



Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du Diplôme de

MASTER en Génie Electrique et Electronique

Spécialité : Automatique Et Informatique industrielle

Présenté par : AID Adel et ZEKRI Fayssal

**la commande directe du couple DTC d'un véhicule électrique
à deux roues Motrices.**

Soutenu le 29 septembre 2020 devant le Jury :

Président :	Mr. BENSALAH Choukri .	MCB	Université de Tlemcen
Examineur :	Mr. BENARIBA Hassan.	MCB	Université de Tlemcen
Directeur de mémoire :	Mr. YAKOUBI Boumediene.	MCA	Université de Tlemcen
Co-Directeur de mémoire :	Mr. GHAZOUANI Abdelkader.	Dr	Université de Tlemcen

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes parents qui m'ont accompagnés durant mon chemin d'étude.

Adel.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, mes frères, toute ma famille et mes amis.

Fayssal.

Remerciement :

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier nos encadreurs : Mr. YAKOUBI Boumediene et Mr. GHEZOUNI Abdelkader pour leurs soutiens, leurs conseils précieux et leurs disponibilités tout au long de ce travail.

Nos vives remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés et qui par leurs compétences nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Enfin, Nous tenons à remercier nos parents qui nous ont toujours encouragés dans la poursuite de nos études.

Table des matières

1	Les véhicules électriques et leurs systèmes de traction	1
1.1	Introduction :	1
1.2	Bref historique	1
1.3	La chaîne de traction	3
1.4	Principales configurations des véhicules	3
1.4.1	Les véhicules hybrides	3
1.4.2	Les véhicules tout électriques (VTE)	4
1.5	Avantages et inconvénients des véhicules électriques	5
1.6	Système de transmission d'un véhicule électrique	6
1.6.1	Description générale de la chaîne de traction électrique	6
1.6.2	Différentes architectures des chaînes de motorisation de VTE	6
1.7	Motorisation des véhicules tout électriques	9
1.7.1	Moteur à courant continu (MCC)	10
1.7.2	Moteurs asynchrones (MAS)	10
1.7.3	Moteurs synchrones (MS)	10
1.8	Source d'énergie électrique embarquée	11
1.8.1	Les batteries	11
1.8.2	Les Piles à combustible	12
1.8.3	Les supercondensateurs	13
1.9	Conclusion	13
2	Modélisation des composants du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD	14
2.1	Introduction	14
2.2	Présentation de la structure du véhicule électrique étudié	14
2.3	Modélisation mécanique du véhicule	15
2.3.1	Modèle dynamique du véhicule	15
2.3.2	Modèle mécanique en vue de la simulation du véhicule	16
2.4	Bilan des efforts appliqués au véhicule	18
2.4.1	Force de résistance au roulement (F_{roul})	19
2.4.2	Force de résistance aérodynamique (F_{aero})	20
2.4.3	Force de résistance due à la pente (F_{pente})	21
2.4.4	Force due à l'accélération (F_{acc})	21
2.5	Modélisation des éléments de la chaîne de traction électrique	22
2.5.1	Modélisation de la machine asynchrone	23
2.5.2	Description du convertisseur d'énergie électrique (DC/AC)	29
2.5.3	Modélisation de la source d'énergie	32
2.6	Couplage entre le modèle mécanique et celui de la motorisation	34
2.6.1	Modèle de la chaîne de transmission mécanique	35
2.7	Modélisation de différentiel électronique de vitesse (DEV)	35
2.8	Conclusion	37
3	Commande directe du couple DTC de la machine asynchrone MAS	38
3.1	Introduction	38
3.2	Principe de la commande direct du couple DTC	38
3.2.1	Contrôle du flux statorique de la machine	39
3.2.2	Contrôle de couple électromagnétique de la machine	40
3.2.3	Choix du vecteur tension	41
3.2.4	Les estimateurs	42
3.2.5	Elaboration du vecteur de commande	43
3.2.6	Elaboration de la table de commutation	45
3.2.7	Régulation de la vitesse de la machine asynchrone	45

3.2.8	Caractéristiques générales d'une DTC [39]	46
3.3	Résultats de simulation	47
3.3.1	Test de démarrage à vide suivi d'une application du couple de charge	48
3.3.2	Test d'inversion de la vitesse	49
3.3.3	Test à basse vitesse	51
3.3.4	Test de variation de la résistance statorique	52
3.3.5	Test d'affaiblissement de flux statorique	54
3.4	Conclusion	55
4	Résultats de simulation de structure de contrôle appliquées au véhicule électrique 2WD	56
4.1	Introduction	56
4.2	Structures de contrôle du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD	56
4.3	Cycle de vitesse pour le véhicule électrique 2WD	58
4.4	Résultats de simulations	60
4.4.1	Résultats de la partie propulsion	60
4.4.2	Résultats de la partie source d'énergie (Batterie Li-ion)	65
4.5	Conclusion	68

Table des figures

1.1	Véhicule électrique de Thomas Parker (a), et la Jamais Contente (b).	1
1.2	(a) La Buick Skylark de GM (General Motors) [4], (b) La Prius de 1997	2
1.3	Composants qui peuvent faire partie d'une chaîne de traction.	3
1.4	Chaîne de traction du véhicule hybride : (a) hybride série, (b) hybride parallèle, et (c) série-parallèle [5].	4
1.5	Chaîne de traction du véhicule tout électrique.	5
1.6	Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.	6
1.7	Solution monomoteur : (a) avec boîte de vitesse, (b) avec réducteur.	7
1.8	Solution multi moteur : (a) motoréducteur répartis, (b) entraînement direct.	7
1.9	Moteur-Roue [11].	8
1.10	Couple/Puissance-vitesse requises pour le VE [13].	9
1.11	Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM [19].	13
2.1	Structure générale du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD étudié.	15
2.2	Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée.	16
2.3	Configuration complète du véhicule.	17
2.4	Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement.	19
2.5	Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement.	21
2.6	Chaîne de traction électrique.	22
2.7	Structure électrique de la machine asynchrone.	23
2.8	Schéma de la machine asynchrone.	24
2.9	Représentation des phases du MAS dans les axes(d,q)	26
2.10	Comportement dynamique de la MAS alimentée en tension sinusoïdale de valeur efficace de 220V.	28
2.11	Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux connecté au moteur asynchrone.	29
2.12	Différentes topologies de l'onduleur et vecteur tension \vec{V}_i .	31
2.13	Représentation des vecteurs de tension dans le plan $(\alpha - \beta)$.	31
2.14	Modèle électrique statique de la batterie (pour une cellule).	33
2.15	Modèle électrique dynamique de la batterie (pour une cellule).	33
2.16	Couplage entre la partie mécanique et électrique.	34
2.17	Géométrie du véhicule dans virage et le schéma de la structure du différentiel électronique de vitesse des deux roues motrices.	36
3.1	Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple (DTC Classique).	39
3.2	Evolution du vecteur flux pendant une période T_e .	40
3.3	Position des vecteurs flux statorique $\vec{\varphi}_s$ et rotorique $\vec{\varphi}_r$.	40
3.4	Exemple de l'évolution de l'angle ζ .	41
3.5	Choix du vecteur tension.	42
3.6	(a) Sélection des tensions correspondant au contrôle du flux, (b) Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.	44
3.7	Correcteur à hystérésis du couple : (a) à deux niveaux, (b) à Trois niveaux.	45
3.8	Schéma bloc de régulation de vitesse.	46
3.9	Résultats de simulation de la DTC lors du démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge.	49
3.10	Résultats de simulation de la DTC lors de l'inversion de sens de rotation.	51
3.11	Résultats de simulation de la DTC à basses vitesses.	52
3.12	Résultats de simulation de la DTC lors de la variation de résistance statorique.	54
3.13	Résultats de simulation de la DTC lors d'affaiblissement du flux.	55
4.1	structure de contrôle de véhicule électrique à deux roues motrices 2WD.	57
4.2	Configuration générale de la stratégie de contrôle de vitesse des deux roues-moteur.	58
4.3	Cycle de conduite proposé pour l'EV2WD.	59
4.4	Angle de braquage imposé.	59
4.5	Courbe de la vitesse de consigne en fonction du temps (a), et accélération subie (b).	59
4.6	Vitesse linéaire du véhicule électrique 2WD (a), Erreur de vitesse (b).	61
4.7	Vitesse linéaire des roues du véhicule électrique 2WD en utilisant la DTC.	62

4.8	Réponse de couple électromagnétique développé par les moteurs de VE en utilisant la commande DTC.	62
4.9	Allure de courant statorique appelé par les moteurs en utilisant la DTC.	63
4.10	Trajectoire de flux statorique dans le plan $(\alpha - \beta)$ de moteur arrière droite (rr)	63
4.11	Force de traction développé par les moteurs du véhicule.	64
4.12	Evolution des couples résistants du véhicule en utilisant la DTC.	64
4.13	Evolution de couple résistance au roulement total du véhicule en utilisant la DTC.	65
4.14	Variation de la distance parcourue par le véhicule électrique 2WD durant le cycle de conduite.	66
4.15	Variation de l'état de charge (SoC) de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.	66
4.16	Variation de puissance de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.	67
4.17	Variation de courant de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.	67
4.18	Variation de tension de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.	68

Liste des tableaux

1.1	Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées	5
1.2	Exemples des véhicules électriques à moteur-roues.	8
1.3	Technologies de motorisation et sources d'énergie des quelques véhicules électriques.	9
1.4	Comparaison des motopropulseurs utilisés en traction électrique.	11
1.5	Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE.	12
2.1	Coefficient de la résistance de roulement pour différents état de route.	20
2.2	Valeurs indicatif de coefficient de pénétration, dans l'air pour les différentes carrosseries [25].	20
2.3	Puissance maximale nécessaire pour divers véhicules.	22
2.4	Calcul des vecteurs de tensions.	32
2.5	Paramètres de la batterie Lithium-ion.	34
2.6	Variables utilisées lors de développement de différentiel électronique.	36
3.1	Position du vecteur flux statorique	43
3.2	Table de commutation de la commande DTC.	45
4.1	Spécifications de cycle de vitesse proposé.	59
4.2	Performances de la réponse de vitesse par DTC	60
4.3	Valeur de vitesse des roues motrices pour la phase 02 et 04.	62
4.4	Valeur de couple électromagnétique de chaque moteur durant tout le cycle de conduite.	63
4.5	Variation des couples résistants au roulement du VE2WD durant le cycle de conduite.	65
4.6	Variation de la distance parcourue par le véhicule durant le cycle de conduite.	65
4.7	Variation de l'état de charge (SoC) de la Batterie durant le cycle de conduite.	66

Notations et abréviations utilisées

Les notations et les abréviations utilisées lors de la rédaction de ce mémoire, sont indiquées dans les tableaux suivants.

1. Notations utilisées :

Symbole	Signification
ρ	Rayon du virage ;
V	Vitesse du véhicule ;
μ	Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.
$\alpha :$	l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale
(x, y, θ)	repère cartésien
$F(X_F, Y_F)$	les coordonnées du centre de l'essieu avant
$R(X_R, Y_R)$	les coordonnées du centre de l'essieu arrière
V_F	le braquage des roues de l'essieu avant
V_R	le braquage des roues de l'essieu arrière
ρ_F	le rayon de giration instantané associé au point F
ρ_R	le rayon de giration instantané associé au point R
δ	l'angle de direction
$\Delta\omega$	la variation de vitesse angulaire (nulle en ligne droite).
γ_{acc}	l'accélération de véhicule
F_T	l'effet de traction totale du véhicule
F_R	la force totale de résistance à l'avancement du véhicule
M_v	la masse totale du véhicule
σ_v	un coefficient intervenant sur la masse
F_{roul}	la force de résistance de roulement des roues
F_{aero}	la force aérodynamique
F_{pente}	la force résistance due à la pente
F_{acc}	la force d'accélération.
T_R	Le couple résistant
R_ω	le rayon de la roue motrice.
C_{rr}	le coefficient de résistance au roulement
ρ_{air}	la densité volumique de l'air en (kg/m^3)
S_f	la section frontale du véhicule en (m^2)
C_{px}	le coefficient de pénétration dans l'air
V_{veh}	la vitesse du véhicule en (m/s)
V_{vent}	la vitesse du vent (V_{vent}).
ω_v	les vitesses angulaires du véhicule
ω_r	les vitesses angulaires de la roue motrice
α_p	une pente d'angle

ω_s	Pulsation des courants statoriques
ω_r	Pulsation des courants rotorique
$v_{sabc} = \begin{bmatrix} v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \end{bmatrix}^T$	Tensions statoriques triphasées
$i_{sabc} = \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix}^T$	Courants statoriques
R_s	Résistance d'une phase du stator
R_r	Résistance d'une phase de rotor
θ	Position de rotor par rapport au stator
$\varphi_{sabc} = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} & \varphi_{sb} & \varphi_{sc} \end{bmatrix}^T$	Flux statorique
$\varphi_{rabc} = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} & \varphi_{rb} & \varphi_{rc} \end{bmatrix}^T$	Flux rotorique
p	Nombre de paires de pôles
θ_r	Position de rotor par rapport au stator
θ_s	Position de stator par rapport au repère (d,q)
L_s	Inductance propre de stator
L_r	Inductance propre de rotor
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
M_{sr}	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor
M	La valeur maximale de l'inductance mutuelle cyclique
l_s	Inductance cyclique propre de stator
l_r	Inductance cyclique propre de rotor
$J_m(kg.m^2)$	le moment d'inertie total sur l'arbre du moteur
$f_c(N.m.s/rad)$	le coefficient de frottement visqueux
$T_{em}(N.m)$	le couple électromagnétique délivrer par le moteur
$T_L(N.m)$	le couple de charge.
Ψ	l'angle entre l'axe d du repère de Park et l'axe de la phase (a).
$P(\Psi)$	la matrice de Park
$P^{-1}(\Psi)$	la matrice inverse $P^{-1}(\Psi)$ de Park
(d, q)	le plan de Park
T_s	Constante de temps statorique
T_r	Constante de temps rotorique
T_e	Période d'échantillonnage
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	des tensions à l'entrée de l'onduleur (valeurs continues).
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	des tensions de phase à la sortie de l'onduleur (valeurs alternatives).
S_a, S_b, S_c	les états de commutation de l'onduleur

R	Résistance interne de la batterie ;
E_0	Force électromotrice à vide ;
V_{batt}, I_{batt}	Tension et courant de la batterie.
J_ω	moment d'inertie de la roue (kg.m^2) ;
T_{em-i}	couple moteur de la roue $i \in [1, 2]$ ($N.m$) ;
T_{R-i}	couple résistant de la roue $i \in [1, \dots, 4]$ ($N.m$) ;
N_{red}	rapport de réduction de vitesse des moteurs ;
ω_{ij}	vitesse angulaire des roues motrices avant et arrière ;
ω_{r-ij}	vitesse angulaire de chaque moteur
$\overline{\varphi}_s(k+1)$	Vecteur du flux statorique à l'instant d'échantillonnage t_{k+1}
$\overline{\varphi}_s(k)$	Vecteur du flux statorique à l'instant d'échantillonnage t_k
$\overline{\varphi}_s$	un module de flux
\overline{I}_r	le courant rotorique
lr, rr	les roues- moteurs arrière gauche et arrière droite.
ξ	le coefficient d'amortissement
$\hat{\omega}_{r-lr}, \hat{\omega}_{r-rr}$	la vitesse estimée
$\hat{\omega}_{r-ij}$	la vitesse estimé
ω_{r-ij}^*	de référence pour chaque roue-moteur.

2. Abréviations utilisées :

VE	les véhicules électriques
BV	boîte de vitesse
DC/AC	convertisseur électrique
VTE	Les véhicules tout électriques
AC	courant alternative
DC	courant continu
MCC	le Moteur à Courant Continu
MI	Induction
MRV	Reluctance Variable
MAS	Moteurs asynchrones
FOC	la commande vectorielle à flux rotorique orienté
MS	Moteurs synchrones
MSAP	Le moteur synchrone à aimants permanents
PAC	les piles à combustible
EV2WD	véhicule électrique à deux roues motrices
SCM	Source-Convertisseur-Machine
MLI	la modulation de largeur d'impulsions
DTC	Directe Torque Control
SOC	State Of Charge
MD	moteur droite
MG	Moteur gauche
DTFC	Direct Torque and Flux Control
DSC	Direct Self Control
PI	un régulateur proportionnel-intégral
FTP	Federal Test Procédure
NEDC	New European Driving Cycle

Résumé

Les avantages du véhicule électrique l'ont rendu une solution recommandée aux problèmes énergétiques et écologiques, pour cela elle a subi des améliorations d'une façon continue et dans plusieurs aspects, ces développements ont causé un impact sur le marché de l'automobile et ont permis de placer le véhicule électrique comme une alternative pour le futur de l'industrie automobile.

Notre objectif dans ce mémoire est de synthétiser une commande d'un véhicule électrique avec deux roues motrices arrière 2WD.

En un premier lieu, on a donné quelques généralités et un bref historique sur les véhicules électriques, puis on a présenté la structure du véhicule électrique adoptée qui est un véhicule à entraînement direct propulsée par deux moteurs asynchrones, chaque moteur est commandés par un onduleur de tension triphasé de deux niveaux, le véhicule est alimenté par une source continue de type batterie Li-ion via un convertisseur DC-DC, et nous nous sommes intéressés à la modélisation de différentes composantes constituant la chaîne de traction de ce véhicule.

En un seconde lieu, on a présenté une stratégie de commande robuste (DTC) appliquée aux machines asynchrones avec un régulateur de vitesse de type PI, pour cette stratégie de commande, on a expliqué le principe de réglage de flux et de couple électromagnétique on se basant sur le modèle d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Le travail est clôturé par une étude des performances de cette commande selon un cycle de conduite.

Mots Clés : Véhicule électrique à deux roues motrices (EV2WD), Commande directe du couple (DTC), différentiels électroniques de vitesse (DEV), moteur asynchrone (MAS), Lithium-ion.

Introduction Général

Problématique

La consommation de l'énergie au niveau mondiale est liée étroitement à la population. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays en voie de développement ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour satisfaire ces besoins est le responsable majeur des rejets des gaz polluants ; dont la pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques. Actuellement, le secteur des transports est à l'origine, presque du tiers des émissions mondiales de CO₂.

Dans le secteur de l'automobile, les constructeurs s'orientent vers l'amélioration des moteurs thermiques et l'hybridation avec des moteurs électriques pour minimiser le taux d'émission du CO₂. Cette voie consiste à développer ces solutions hybrides couplant les moteurs thermiques classiques à des moteurs électriques. Il existe différentes architectures de ce véhicule selon la disposition des deux moteurs : architecture série, architecture parallèle et architecture série-parallèle.

Une alternative plus ambitieuse consiste à se passer du moteur thermique et construire ainsi des véhicules dits tout électriques fonctionnant exclusivement avec un (ou plusieurs) moteur(s) électrique(s), pour la propulsion dite zéro émission. Ce type de véhicules n'a pas connu les progrès attendus à cause de leur faible autonomie, leur temps de charge important et leur coût élevé.

Comme le véhicule automobile est un système physique complexe composé de plusieurs sous-systèmes, la modélisation de chaque sous-système s'avère une tâche difficile qui nécessite des études cinématique et dynamique approfondies du véhicule. Ainsi que l'étude de la commande du véhicule en considérant plusieurs phénomènes régissant son comportement tel que le système motorisation électrique du véhicule et les non-linéarités présentées sur le système lui-même. A ce titre, les systèmes de contrôle du véhicule électrique ont fait des avancées significatives ces vingt dernières années. Ils assurent de manière efficace la tenue de route, la stabilité et le freinage du véhicule.

La stratégie de contrôle directe du couple DTC est actuellement reconnue comme étant la technique la plus répandue dans le domaine des machines à courant alternatif. Ses principaux avantages sont la rapidité de la réponse dynamique de couple et la faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la machine.

Objectif de la mémoire

Notre principal travail, consiste à synthétiser une commande robuste d'un système de traction multi-machine en utilisant une stratégie de contrôle appelé commande directe du couple DTC. Cette méthode améliore d'une façon significative les performances dynamiques des machines asynchrones et elle est moins sensible aux paramètres du moteur.

Le véhicule présenté dans ce travail, possède deux roues motrices 2WD possédant deux moteurs asynchrones, équipé chacun par son propre convertisseur d'énergie électrique. Chaque couple de ces moteurs-roues est contrôlé par la structure de contrôle DTC. La vitesse de référence, nécessaire à chaque roue motrice en fonction de la courbure de la trajectoire routière et de la nature de contact pneu-chaussée, est assurée par un système de différentiel électronique de vitesse (DEV), afin d'éviter tout risque de dérapage du véhicule.

Organisation de la mémoire

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'articulent autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre aura pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées dans le domaine du véhicule électrique. En premier lieu, un aperçu sur l'historique du véhicule électrique est donné au début du chapitre. Ensuite, une description des différentes configurations des VE, du côté source, ainsi que du côté moteur propulseur a été donnée.

Dans **le deuxième chapitre**, nous présentons d'abord la structure et la description du véhicule électrique adoptée qui est un véhicule à entraînement direct propulsé par deux moteurs de types asynchrones qui sont alimentés par des batteries de type Lithium-ion à travers deux onduleurs triphasés. Ensuite, nous présentons le modèle dynamique du véhicule. Puis, une modélisation mathématique de différentes composantes, constituant la chaîne de traction (motorisation, convertisseurs, source d'énergie) a été explicitement donnée. Ensuite, on présente en détail les différentes forces constituant le bilan des efforts appliqués au véhicule, ces efforts qui représentent le couple résistant exercé sur le véhicule et qu'il faut vaincre afin d'assurer son déplacement, alors qu'en fin du chapitre, en mettant en relief le

principe et le modèle du différentiel électronique de vitesse.

Dans le **troisième chapitre**, nous allons développer le principe de la commande directe du couple DTC de la machine asynchrone alimenté par un onduleur deux niveaux. Pour cette stratégie de commande, nous expliquerons le principe de réglage du flux et du couple électromagnétique et nous présenterons des résultats de simulation montrant les avantages et les inconvénients de cette structure.

Le **quatrième chapitre** est consacré à la présentation des résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink du système globale du véhicule électrique en utilisant la structure de commande DTC. Les performances dynamiques du véhicule et la robustesse de stratégies de commande seront présentées suivant un cycle de conduite.

Enfin, sur la base de cette étude et les résultats de simulation obtenus, des conclusions sont tirées et des perspectives seront mentionnées quant aux travaux de recherches futurs.

Chapitre 1

Les véhicules électriques et leurs systèmes de traction

1.1 Introduction :

les véhicules électriques (VE's) et hybrides (VHE's) constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels, permettant aux constructeurs de véhicules de pouvoir répondre aux exigences demandées par les utilisateurs des véhicules (performances et consommation du carburant) et les lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants) .

Ce chapitre a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine (le véhicule électrique). On commence par une présentation de l'état de l'art de la traction (l'évolution des véhicules à propulsion électrique depuis leur apparition, les différents architectes de la chaîne de traction). Ensuite on présentera une analyse des principaux avantages et inconvénients des véhicules électriques afin de déterminer la configuration la plus avantageuse. Nous nous intéressons principalement au système de traction multi-machine. Puis, nous discutons les différents types de motorisation existante dans la littérature où une étude comparative à été faite entre les différents types. Enfin, nous citons quelques types des sources d'énergies utilisées dans la traction électrique avec les avantages et les inconvénients de chaque type.

1.2 Bref historique

Aujourd'hui, la voiture propre est un problème sur lequel travaille un nombre d'industriels de l'automobile, pour répondre aux problèmes que posent la pollution atmosphérique. La voiture électrique, que l'on présente d'ailleurs comme "la solution" au problème de la pollution des gaz d'échappement, ne date pas d'hier. Déjà, à la fin du 19ème siècle, au début de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en compétition (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique). D'ailleurs, les performances des premiers prototypes de véhicule électrique n'avaient rien à envier à celles des véhicules à propulsion thermique de l'époque. Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique. Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h. En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, on voit sur la photo de la Figure 1.1(a), Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui est la première au monde.



(a)



(b)

FIGURE 1.1 – Véhicule électrique de Thomas Parker (a), et la Jamais Contenté (b).

En 1899 en Belgique, une société a construit "La Jamais Contente", la première voiture électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h) [1]. La voiture était pilotée par le belge Camille Jenatzy et elle était en forme de torpille (Figure 1.1(b)). Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des voitures à essence et à vapeur. Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que ceux à essence. En 1966, l'environnement commence à devenir une préoccupation. Le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. L'opinion publique américaine y est largement favorable et avec l'augmentation du prix de l'essence en 1973, date du premier choc pétrolier. Ce choc a dû favoriser l'utilisation de l'énergie électrique. Cependant, pratiquement rien n'a été fait dans ce sens. En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors), Figure 1.2(a). En 1976, le Congrès américain adopte «The Electric and Hybrid Vehicle Research, Développement and Démonstration Act», qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides. Dès 1988, la société automobile General Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV1 et qui va être produite entre 1996 et 1998.



FIGURE 1.2 – (a) La Buick Skylark de GM (General Motors) [4], (b) La Prius de 1997

En 1976, le Congrès américain adopte « The Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act », qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.

Dès 1988, la société automobile General Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV1 et qui va être produite entre 1996 et 1998.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, la Prius (Figure 1.2(b)).

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

Cependant à partir de l'an 2000, la voiture électrique va ré-mourir à nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1 ; GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et malgré ces plusieurs mouvements de protestation ; Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières.

En Juillet 2009, La Mitsubishi i-MiEV a été lancée au Japon pour les professionnels, et pour les clients individuels en Avril 2010 suivie par la vente au public à Hong Kong en mai 2010.

En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car) est une voiture électrique à cinq places annoncée par Nissan en 2009, a été commercialisée au Japon et aux Etats-Unis et elle est devenue disponible dans l'ensemble de l'Europe depuis fin 2011.

Aujourd'hui, la voiture tout électrique commence à percer, moyennant une autonomie en évolution permanente. De nombreux modèles sont proposés à la vente. L'implication des villes dans la protection de l'environnement joue également un rôle : les villes développent les réseaux de bus électriques et récemment de voitures électriques en location qui donnent ainsi une bonne visibilité à l'électrique.

A l'heure actuelle, l'ensemble des véhicules électriques proposés par les constructeurs disposent d'une autonomie comprise entre 70 km et 200 km. De nouvelles perspectives apparaissent toutefois avec l'utilisation de la pile à combustible qui permet d'augmenter considérablement l'autonomie (400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques.

Le prix de ces véhicules est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique.

1.3 La chaîne de traction

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

Dans ce contexte d'une voiture électrique, la terminologie ci-dessous sera adoptée pour tout le rapport [2].

1- Système de traction : c'est un ensemble des organes traversés par le flux d'énergie, et qui assure à un véhicule sa capacité de mouvement. Il est composé d'une chaîne de traction et d'un générateur d'énergie embarquée.

2- 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.

3- 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).

4- Convertisseur d'énergie : système qui change la nature de l'énergie (moteur, radiateur, etc. . .).

5- Transformateur d'énergie : système qui conserve la nature de l'énergie mais change son typage (boîte de vitesse, convertisseur électrique DC/AC).

6- Typage de l'énergie : caractérise les paramètres d'une énergie de même nature (pour l'électrique : tension, courant, fréquence, . . .).

7- Nature de l'énergie : caractérise les différentes formes que peut prendre l'énergie (mécanique, électrique, chimique, hydraulique, rayonnante ou nucléaire, . . .).

8- 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.

9- 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.

La Figure 1.3 présente les symboles des composants qui seront utilisés pour expliciter le principe des différentes chaînes de traction présentées [3].

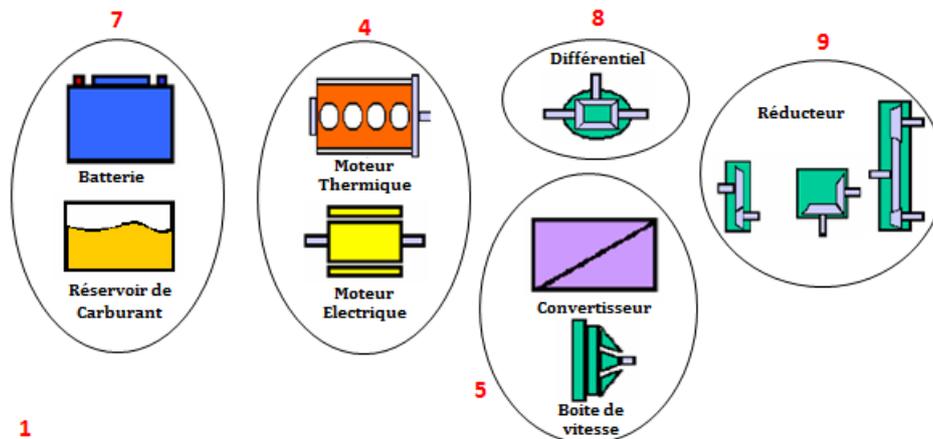


FIGURE 1.3 – Composants qui peuvent faire partie d'une chaîne de traction.

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 [4].

On distingue alors trois principaux concepts de véhicule hybride :

1. *Hybride série* ;
2. *Hybride parallèle* ;
3. *Le Bimode (série-parallèle)*.

Dans la solution **hybride série** (Figure.1.4(a)), le moteur thermique entraîne un générateur électrique qui débite sur une batterie et alimente le ou les convertisseurs du ou des moteurs électriques de traction.

Le moteur thermique peut être classique (à combustion interne) mais il peut être aussi une turbine qui présente l'avantage d'une plus grande capacité. 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 [1].

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 présentée 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.

La Figure 1.4(b) montre la motorisation **hybride parallèle** qui permet aux deux moteurs, thermique et électrique, de fonctionner ensemble ou séparément. Le fonctionnement simultané et optimisé des deux moteurs permet d'améliorer le rendement et de réduire la pollution.

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 inconvénients majeurs à savoir d'une part le poids et l'encombrement élevé, de son système de motorisation et d'autre part, la redondance de fonctionnalités entre ses deux moteurs . Il peut être intéressant de combiner les deux types hybrides précédant pour réaliser un système **série-parallèle** (Figure.1.4(c)).

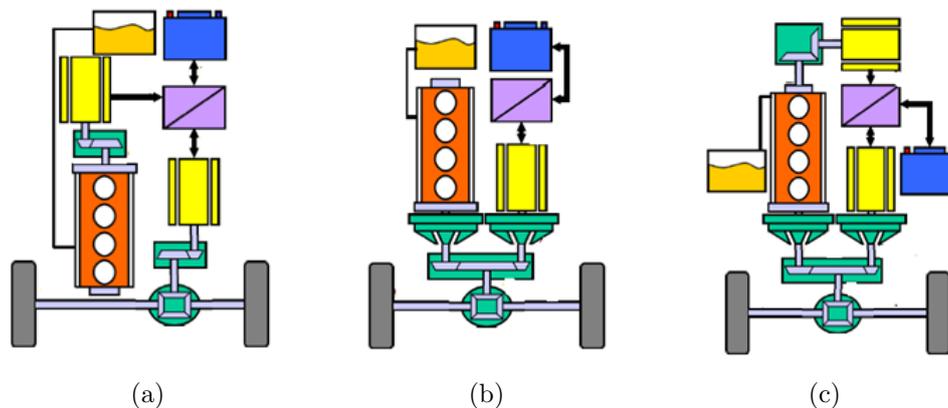


FIGURE 1.4 – Chaîne de traction du véhicule hybride : (a) hybride série, (b) hybride parallèle, et (c) série-parallèle [5].

1.4.2 Les véhicules tout électriques (VTE)

La propulsion d'un véhicule électrique est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue. Compte tenu des progrès scientifique et technologique accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie avec de nouvelles conceptions sont explorés pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le stockage et l'utilisation d'électricité. Il s'agit d'un véhicule qui possède uniquement un accumulateur comme source d'énergie. La structure est donnée par le schéma de la Figure 1.5. Les véhicules tout électriques proposés actuellement sont exclusivement urbains, leur autonomie est comprise entre 100 et 500 km avec des technologies de batteries relativement conventionnelles.

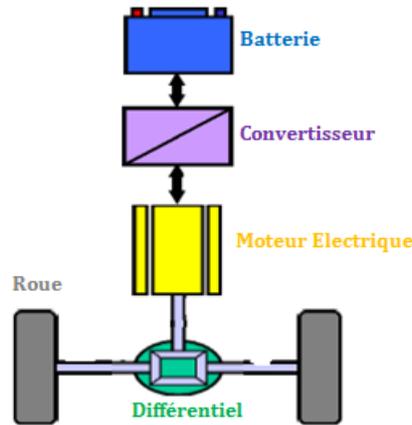


FIGURE 1.5 – Chaîne de traction du véhicule tout électrique.

1.5 Avantages et inconvénients des véhicules électriques

Depuis les premières réalisations de véhicules 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 véhicules électriques 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. 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. Une confrontation des différentes configurations est présentée dans le Tableau 1.1, [6].

TABLE 1.1 – 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 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

1.6 Système de transmission d'un véhicule électrique

1.6.1 Description générale de la chaîne de traction électrique

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la Figure 1.6. Il s'agit d'une part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur des batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur [7]. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique .

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la chaîne de traction proprement dite, mais il va de soi que la totalité des équipements électriques doit être optimisée pour maximiser l'autonomie du véhicule [8].

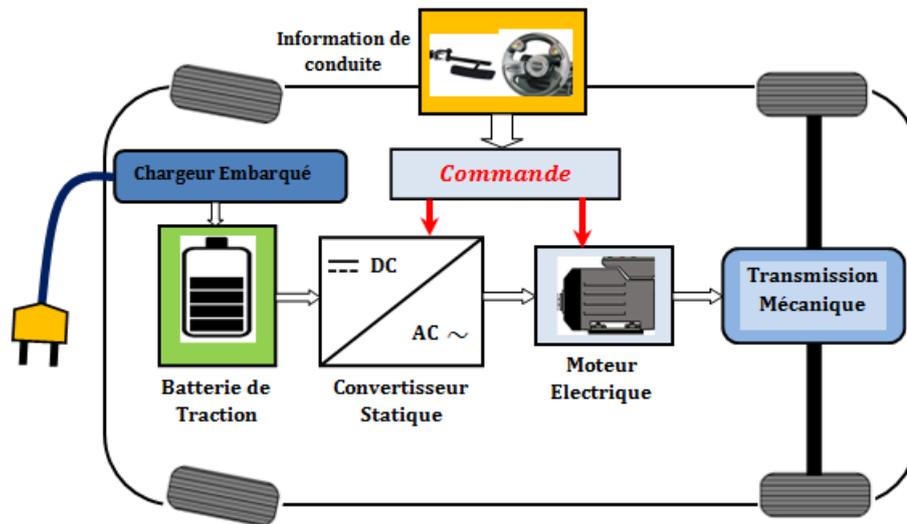


FIGURE 1.6 – Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.

Le fonctionnement de l'ensemble est très simple : Lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélération, il libère du courant à partir de la batterie, le point de stockage de l'électricité. Il est transformé en courant alternatif (AC) si le moteur est de type alternatif ou en courant continu (DC) si le moteur est de type continu. Le moteur développe ainsi sur son arbre un couple moteur aux roues motrices par l'intermédiaire du réducteur de vitesse afin de vaincre les différents couples résistants exercés sur le véhicule et ce dernier se met en mouvement suivant les sollicitations du conducteur.

Le paragraphe suivant décrit les structures possibles pour les composants de la chaîne de traction sans rentrer dans les détails de leur modélisation.

1.6.2 Différentes architectures des chaînes de motorisation de VTE

L'architecture de la chaîne de traction de la voiture électrique est beaucoup plus simple : il n'est pas besoin de boîte de vitesse ou de composants pour convertir le mouvement vertical des pistons en mouvement rotatif (cas d'un moteur thermique) : l'axe du moteur tourne directement sur l'axe des roues de la voiture électrique.

La chaîne de traction classique d'une voiture électrique comprend la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique. Plusieurs possibilités d'association d'éléments nécessaires à la transmission de puissance qui sont le réducteur mécanique, la boîte de vitesse, et éventuellement le différentiel.

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 [1]. La Figure 1.7(a) montre cette solution.

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 1.7(b) . 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 [1].

Solution multimoteurs

Il peut à 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 [2].

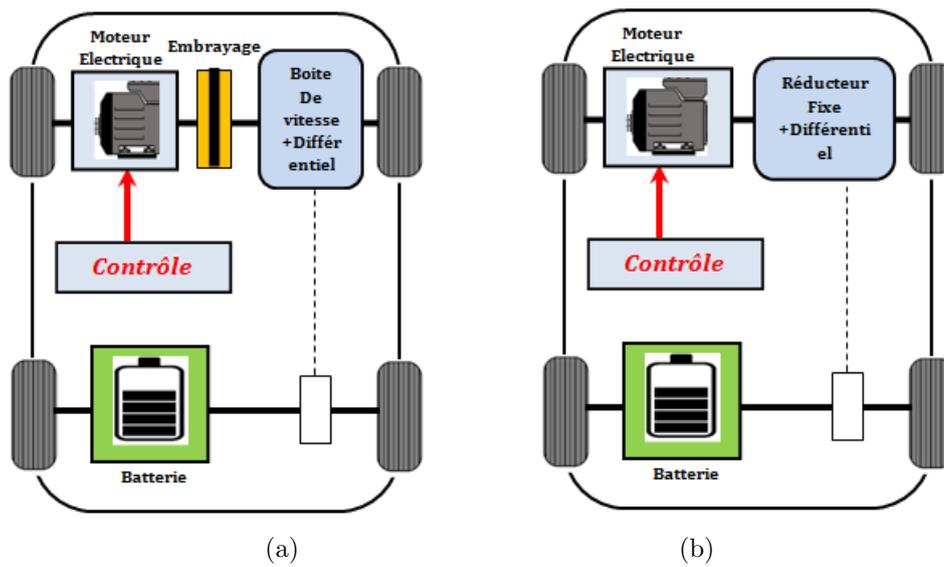


FIGURE 1.7 – Solution monomoteur : (a) avec boîte de vitesse, (b) avec réducteur.

La chaîne de traction dans ce cas est simplifiée en utilisant un moteur (avec réducteur ou moteur-roue) pour chaque roue motrice. Ainsi le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur. Pour ce cas, deux configurations sont possibles : avec réducteur ou à entraînement directe (Figure 1.8).

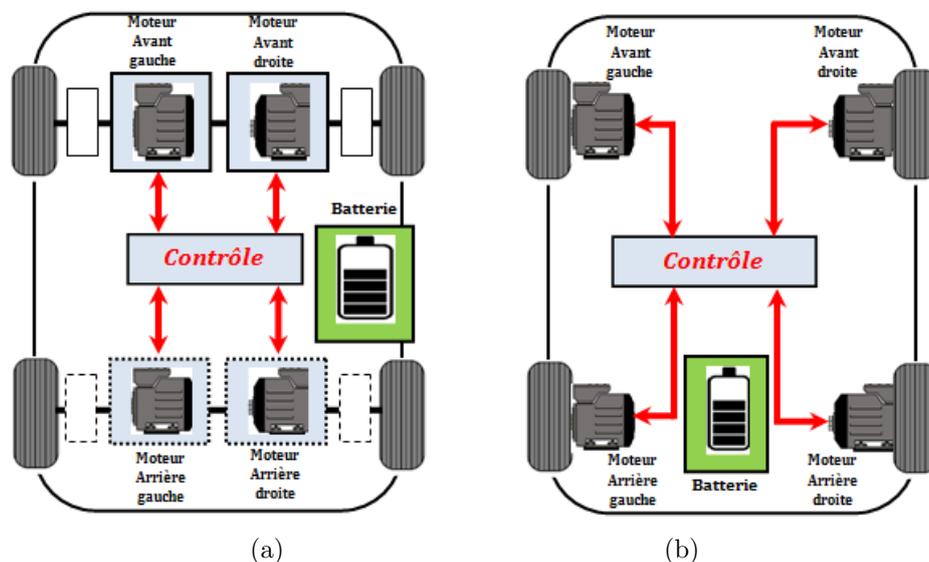


FIGURE 1.8 – Solution multi moteur : (a) motoréducteur répartis, (b) entraînement direct.

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 1.9 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 régénérateur. L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices, permet [9, 10] :

- 1- La suppression de toutes les parties mécaniques liées à la transmission (différentiel, boîte de vitesse, embrayage, ect...);
- 2- De commander indépendamment les roues et en même temps,
- 3- De libérer de l'espace dans le véhicule, notamment utilisable par les batteries.

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 .

Dans le présent travail, l'architecture choisie est celle du système multi-moteur où chaque roue est entraînée indépendamment.

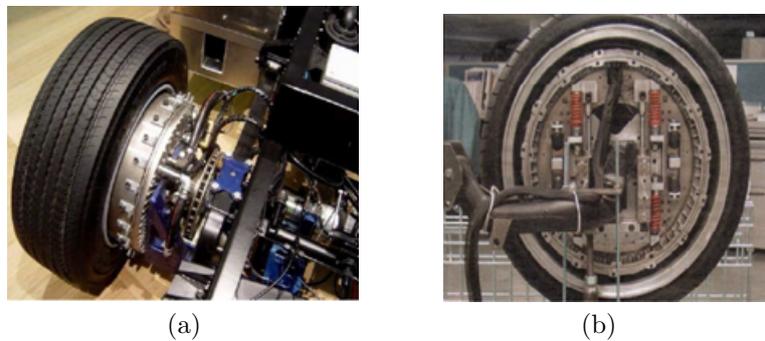


FIGURE 1.9 – Moteur-Roue [11].

Le Tableau 1.2. présente quelques véhicules à technologies moteur-roues.

TABLE 1.2 – Exemples des véhicules électriques à moteur-roues.

Véhicule	Nombre des Moteur-roues	photo	Puissance moteur (Kw)	Batterie	Vitesse maximale (Km/h)
WEEZ-EON	04		01	Li-ion LiFePO4	45
MOOVILLE	04 30Kg/moteur		10	Plomb	90
Opel Agila (Heuliez)	02 43kg/moteur		30	Li-ion	140
Venturi (Volage)	04		55	Li-ion polymère	150

1.7 Motorisation des véhicules tout électriques

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent amplement du type de moteur d'entraînement employé. Un moteur électrique convient beaucoup mieux à la propulsion d'un véhicule qu'un moteur thermique. Les voitures électriques pourraient donc avoir une meilleure efficacité au cours de la conversion d'énergie en plus de ne pas produire les émissions associées au processus de combustion avec un bruit inférieur. De plus, un moteur électrique offre un couple élevé et s'adapte à toutes les situations. Il peut récupérer sa propre énergie, celle de la décélération. Si pour un véhicule thermique les freins transforment l'énergie cinétique en chaleur qu'il n'est guère possible de réutiliser. Le VE en revanche, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoie progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [1, 12, 13] :

1- Assurer un démarrage en côte du VE (couple élevé),

2- Obtenir une vitesse maximale,

3- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la Figure 1.10 exhibant l'évolution de couple/vitesse.

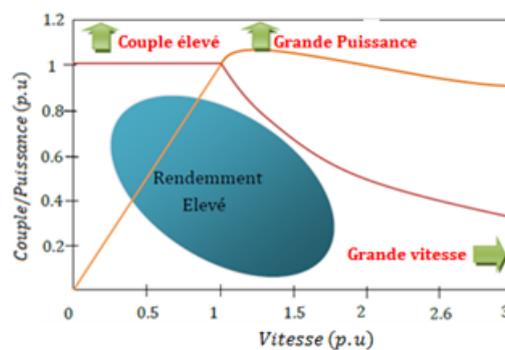


FIGURE 1.10 – Couple/Puissance-vitesse requises pour le VE [13].

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entrainements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le Moteur à Courant Continu (MCC), à Induction (MI), Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), à Reluctance Variable (MRV) etc. Le Tableau 1.3 montre les technologies de motorisation et les sources d'énergie de quelques véhicules électriques présents sur le marché.

En plus des caractéristiques de fonctionnement citées précédemment, d'autres considérations importantes de conception sont à prendre en considération à savoir : coût acceptable et encombrement.

TABLE 1.3 – Technologies de motorisation et sources d'énergie des quelques véhicules électriques.

Véhicule	photo	Type du moteur	Puissance moteur (Kw)	Batterie	Autonomie (Km)
Smart Fortwo Electric		BLDC	55 Kw	Li-ion 17.6 kwh	110 Km
Fiat 500e (2014)		MSAP	82 Kw	Li-ion 24 kwh	140 Km
Toyota Scion IQ		MS	47 Kw	Li-ion 16.6 kwh	85 Km
Chevrolet Spark EV (2014)		MAS	104 Kw	Li-ion	130 Km
Nissan Leaf		MSAP	80 Kw	Li-ion 24 kwh	195 Km
Tesla model S (2013)		MAS	238 Kw A 401 Kw	Li-ion 40 kwh- 85 kwh	220 Km -420 Km
Toyota Rav 4 (2014)		MAS	115 Kw	Li-ion 41.8 kwh	160Km

1.7.1 Moteur à courant continu (MCC)

Parmi les différents types de moteurs à courant continu, c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé dans les véhicules électriques. 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 [14] :

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

Ces raisons donc, qui ont conduit les différents industriels à s'orienter vers l'utilisation des machines alternatives triphasées.

1.7.2 Moteurs asynchrones (MAS)

Le moteur asynchrone est la solution envisagée par de nombreux constructeurs. On peut distinguer deux types : les moteurs à bagues et à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est robuste. 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 électriques (VE), grâce à l'implantation des techniques de commande nouvelles. Actuellement, les techniques de commandes les mieux adaptées sont la commande directe du couple DTC et la commande vectorielle à flux rotorique orienté FOC pour piloter la machine en vitesse variable avec une grande souplesse [14].

1.7.3 Moteurs synchrones (MS)

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons deux types les plus fréquents 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 réactant :

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

Les avantages dont disposant 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) [13, 15, 16].

Le moteur synchrone à réluctance variable

Le moteur synchrone à réluctance variable gagne l'intérêt des constructeurs car c'est un moteur solide, facile à contrôler, sans balais donc sans usure ou entretien, et pouvant avoir de bonnes performances en termes de couple maximum, de rendement et de facteur de puissance. Cependant, pour obtenir ces performances, il est nécessaire de rendre maximal le rapport des inductances extrêmes mais cette technologie reste délicate à réaliser. De plus, n'étant pas encore standardisée, son coût reste élevé.

Donc, à chaque application de propulsion électrique s'applique un type de moteur différent. Il n'y a pas de moteur universel, tout comme pour les batteries et les contrôleurs. Le spécifique donnant toujours un meilleur résultat que le standard [12]. Chacun des moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui s'affrontent. Le Tableau 1.4. Ci-dessous résume bien, de manière qualitative, les avantages et les inconvénients des principaux types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques.

TABLE 1.4 – Comparaison des motopropulseurs utilisés en traction électrique.

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

Dans notre cas, le choix est porté sur le moteur asynchrone. D'une part, cette machine est la plus utilisée dans les applications industrielles où la variation de vitesse, une haute précision de régulation et de hautes performances en couple sont requises. D'autre part, c'est parce qu'elle bénéficie de la plus grande expérience en matière de moteurs électriques et commence à être utilisée dans les chariots de manutention. Dans les grandes puissances (jusqu'à plus de 10 MW), c'est la machine qui est la plus utilisée, elle continue à occuper, ainsi, une place de choix en traction ferroviaire [1].

1.8 Source d'énergie électrique embarquée

Un des problème majeurs des véhicules électriques est la source d'énergie. Dans cette partie, nous présentons de manière succincte trois voies technologiques possibles d'alimentations embarquées. Il s'agit des batteries utilisées dans tous les véhicules électriques actuels, les piles à combustible (PAC), et les supercondensateur [2].

1.8.1 Les batteries

Les systèmes de stockage d'énergie sont d'une importance critique pour les véhicules électriques [17]. La batterie constitue la source la plus largement utilisée. Cependant, pour les applications à traction électrique, la batterie nécessite d'avoir une densité de puissance élevée afin de répondre aux pointes de puissance lors de l'accélération ou de freinage.

Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. La batterie est chargée, à partir d'une source extérieure pendant les périodes de repos. Le choix de la batterie pour un véhicule électrique doit répondre aux conditions suivantes :

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

Bien que la littérature technique décrive de nombreux accumulateurs, parmi eux, on cite :

L'accumulateur au plomb

Est le plus ancien et le plus utilisé, sa tension par élément est de 2V. Il reste le système le moins cher produit industriellement avec une des meilleures durées de vie. Son inconvénient c'est qu'il présente une faible énergie massique de l'ordre de 40Wh/kg. Ce type de batterie a été adopté par General Motors pour la commercialisation de l'EV1 qui développe une forte puissance et de faible autonomie [18].

L'accumulateur au Nickel-Cadmium

Est le plus performant et plus largement commercialisé avec une énergie massique plus meilleure que celle de l'accumulateur au plomb, sa tension par élément est de 1,2 V. Son problème c'est qu'il a une mauvaise tenue à des températures supérieures à 40°, aussi il présente un coût élevé par kilowattheure et une toxicité de la matière utilisée (cadmium) dans sa conception. Cet accumulateur a été choisi par les constructeurs automobiles français pour équiper

leurs véhicules commercialisés depuis 1995.

La Batterie Lithium-ion

Les batteries lithium-ion demeurent l'espoir du véhicule électrique pur. Actuellement, seul ce système permet d'augmenter l'autonomie des véhicules électriques grâce à ces performances massiques et volumiques de capacité énergétique. Il présente une tension élémentaire de 4 volt/élément. 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. L'autre paramètre critique de ces batteries est le compromis coût/ durée de vie car pour obtenir des durées de vies raisonnables pour l'application véhicule électrique pur, il faut ajouter à l'électrode positive des additifs augmentant le coût de la batterie. 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).

Le Tableau 1.5. présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques [16].

TABLE 1.5 – Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE.

Type de Batterie	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Rendement énergétique (%)	Tension par cellule chargée (V)	Cycle de vie
Plomb-acide (Pb-PbO₂)	35-50	150-400	80	2.1	500-1000
Nickle-cadimium (NiCd)	30-50	100-150	75	1.35	1000-2000
Nickel-Métal-Hydrur (NiMh)	60-80	200-300	70	1.2	1000-2000
Lithium-Polymère (Li-P)	150-200	350	/	3.4	1000
Lithium-ion (Li-ion)	80-130	200-300	>95	4	1000

La chaîne de traction du véhicule fonctionne le plus souvent avec des tensions supérieures à 12V, 3,2V ou 1,2V. Afin d'atteindre les niveaux demandés pour l'application, il faut faire une mise en série de batteries élémentaires. Ensuite l'autonomie du véhicule est directement liée à l'énergie que l'on peut emmagasiner dans le pack de batteries. En fonction de la capacité nominale de la batterie élémentaire il faudra faire une association parallèle des batteries. Donc le pack d'un véhicule résulte d'une association série parallèle de batteries élémentaires [6].

1.8.2 Les Piles à combustible

Une pile à combustible (PAC) est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible (hydrogène, méthanol, etc.) en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé. Le fonctionnement global d'une pile à combustible est décrit sur la Figure 1.11. 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 :



Donc le fonctionnement des piles à combustible 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, ect. . .). D'autre part, distribution d'hydrogène à grande échelle nécessiterait une mise à jour complète du système de distribution de carburant actuel.

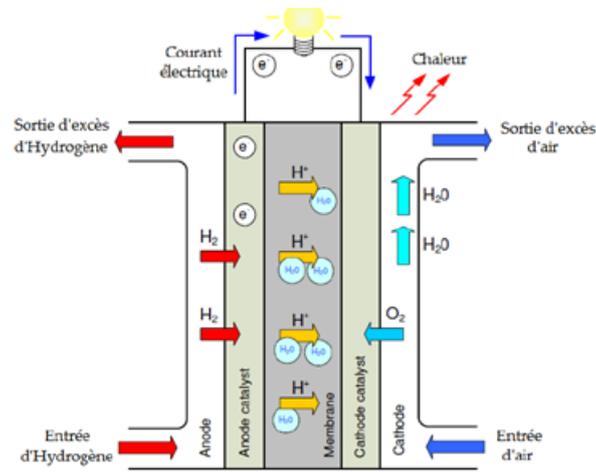


FIGURE 1.11 – Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM [19].

1.8.3 Les supercondensateurs

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 [20]. Les supercondensateurs sont des systèmes électrochimiques de stockage de l'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.

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.

1.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur les véhicules électriques et leurs systèmes de motorisation. En commençant par un bref historique sur les véhicules électriques en insistant sur les différentes technologies disponibles dans le littérature. Une synthèse sur ces derniers, nous a permis de dégager une vision plus claire sur leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, nous avons donné une description globale sur le système de transmission du véhicule électrique et les différents architectes des motorisations les plus utilisées.

Une partie de ce chapitre a été consacrée aux organes de la traction, principalement les différents motopropulseurs et les différentes sources d'énergie embarquées. Du côté moteur, et après une étude comparative faite sur les différents moteurs de traction et on a vu les avantages des autres types de moteurs tournants, parmi lesquels nous pouvons citer : robustesse, prix relativement bas, entretien moins fréquent. Le moteur à induction semble le mieux placé pour la propulsion électrique du véhicule électrique.

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

Chapitre 2

Modélisation des composants du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD

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, . . .).

Nous avons donc dédié ce chapitre à l'exposition des différents modèles des composants du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD proposé dans cette étude, en vue du dimensionnement et de la commande du véhicule.

D'abord, nous présentons la structure du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD proposé. Ensuite, nous développons la modélisation dynamique et le bilan des efforts appliqués au véhicule électrique. On passe après, à la modélisation des composantes de la chaîne de traction (motorisation, batterie, convertisseur d'énergie. . .) ainsi que le couplage entre les deux parties électriques et mécanique pour arriver à la fin à un modèle global d'un véhicule électrique propulsé par deux roues motrices. Enfin, nous achevons notre chapitre par la modélisation du système de différentiel électronique de vitesse.

2.2 Présentation de la structure du véhicule électrique étudié

Le système utilisé dans notre étude est présenté par la figure 2. 1. C'est un véhicule électrique à double chaîne de traction (version multi moteur). Les deux roues avant sont des roues directrices. Notre véhicule électrique est doté d'un différentiel électronique qui joue le rôle d'un conducteur virtuel. Les deux moteurs arrière sont commandés par deux onduleurs de tension à deux niveaux. C'est derniers sont commandés par une commande directe du couple. Notre véhicule est propulsé par les moteurs arrières. Deux réducteurs arrières, l'un pour la roue droite et l'autre pour la roue gauche. Le véhicule bimoteur est équipé par un volant de direction et un accélérateur en avant. La vitesse de consigne doit fournir les références de vitesse de chaque moteur. Il doit prendre en compte un certain nombre d'informations en provenance des capteurs de vitesse de déplacement du véhicule et des mesures de l'angle de braquage du volant. A partir de ces deux informations, ce bloc calcule les vitesses de référence à imposer aux moteurs arrière.

Le véhicule électrique est équipé de batterie Li-ion haute tension délivrant une tension et un courant continu à l'onduleur via un convertisseur continu-continu élévateur/abaisseur de tension (Buck-Boost), formé ainsi le bus DC. En mode traction, l'onduleur transforme les grandeurs continues délivrées par le convertisseur continu-continu (Buck-Boost) en courants et tensions alternatifs alimentant les deux Machines Asynchrone (MAS). L'objectif de la structure présentée est d'adapter la vitesse de rotation et le couple électromagnétique de chaque moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule, c'est-à-dire le couple résistant.

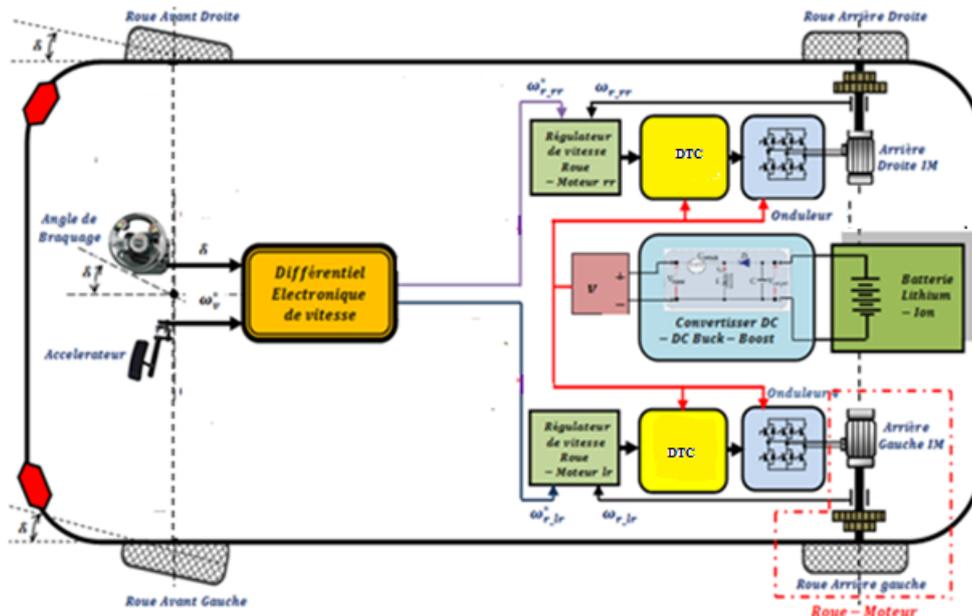


FIGURE 2.1 – Structure générale du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD étudié.

2.3 Modélisation mécanique du véhicule

2.3.1 Modèle dynamique du véhicule

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui rend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif; la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender. La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante et doit prendre ces non-linéarités en considération. Dans un premier temps, nous décrivons les différentes contraintes dynamiques sur le véhicule qui déterminent les limites à ne pas dépasser. Ces contraintes ont donc une influence sur les trajectoires autorisées pour le véhicule.

Contraintes dynamiques sur le véhicule

Il faut bien étudier les contraintes dynamiques, car le véhicule étant un système mécanique réel. Il est évident qu'il existe des limites sur les forces ou les couples qui peuvent être générés. Des critères prennent en compte la vitesse et l'accélération maximale pour éviter les problèmes de dérapage et de patinage.

a) Contraintes d'accélération : accélération et freinage.

Les contraintes d'accélération sont simples mais néanmoins importantes. Il est clair que le moteur a une borne maximale sur l'accélération qu'il peut fournir. Cela se traduit par

$$\gamma < \gamma_{\max} \tag{2.1}$$

De même, le freinage du véhicule est contrôlé par une force de freinage qui est proportionnelle à la décélération des roues. Cette nouvelle contrainte impose :

$$\gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max} \tag{2.2}$$

b) Contrainte de vitesse maximale

Il semble naturel que le véhicule ait une vitesse maximale. Alors la cinématique du véhicule peut être exprimée avec les contraintes additionnelles suivantes :

Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximales

Lorsqu'un véhicule se déplace dans un virage, la force centrifuge le pousse hors de la courbe avec une valeur dépendante de la vitesse et du rayon de courbure. Pour cette force, il n'y a pas besoin d'un point d'appui matériel, elle est produite par l'inertie du corps. Par contre, afin d'effectuer le virage, l'accélération normale produite par l'angle de rotation pousse le véhicule dans le sens contraire. Les roues posées sur le sol doivent produire la force centripète qui ramène le véhicule dans la courbe. Ces deux forces en équilibre vont se traduire par un déplacement correct, sinon le déséquilibre produira la dérive du véhicule. Cette dérive a lieu à cause d'une adhésion des roues au sol qui ne correspond pas à la vitesse de déplacement. Lors d'un démarrage, les roues motrices imposent une force de traction au véhicule qui va engendrer le mouvement, si cette force est très importante, les roues patinent.

Vitesse maximale d'un véhicule dans un virage

Décomposons le poids du véhicule en une composante dirigée vers le centre de la trajectoire du véhicule, et une composante oblique, dirigée vers le sol, Soit α l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale [23]. La condition de non dérapage se traduit par :

$$\frac{MV^2}{\rho} < (Mg \sin \alpha + \mu Mg \cos \alpha) \quad (2.3)$$

Où :

ρ : Rayon du virage ;

V : Vitesse du véhicule ;

μ : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.

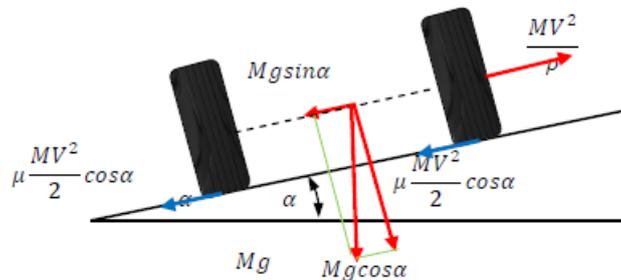


FIGURE 2.2 – Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α

Par suite, la valeur maximale V_{max} de la vitesse avec laquelle le véhicule peut aborder le virage sans risque de dérapage vaut :

$$V^2 = \sqrt{Mg\mu} \quad (2.4)$$

Pour diminuer le risque de dérapage, nous pouvons ;

- diminuer la vitesse du véhicule V ;
- Augmenter le rayon de courbure p de la trajectoire ;
- Augmenter le Coefficient de friction des pneus du véhicule.

Pour virer, le véhicule doit donc incliner son plan vers la concavité du virage. L'inclinaison dépend de la vitesse et du rayon de la trajectoire ; plus le véhicule va vite et vire court, plus il doit s'incliner. La vitesse maximale est donc contrainte par les mouvements en rotation.

b) Remarque

La détermination de la vitesse maximale et l'accélération maximale ne sont que des approximations, puisque le fait que les roues tournent, modifient ces valeurs (déformation des roues). Ces valeurs donnent cependant un ordre des grandeurs de ce qui peut être utilisé

2.3.2 Modèle mécanique en vue de la simulation du véhicule

La (figure 2.3) représente le modèle cinématique du véhicule dans un repère cartésien (x, y, θ) avec x l'abscisse, y l'ordonnée et θ caractérise l'angle que fait l'axe longitudinal du véhicule avec l'axe des abscisses du repère lié à l'environnement (fixé au sol).

Soit $F(X_F, Y_F)$, (resp $R(X_R, Y_R)$) les coordonnées du centre de l'essieu avant (Respectivement arrière). De même V_F (respectivement V_R représente le braquage des roues de l'essieu avant (respectivement arrière). ρ_F (Respectivement

ρ_R) est le rayon de giration instantané associé au point F (Respectivement R)

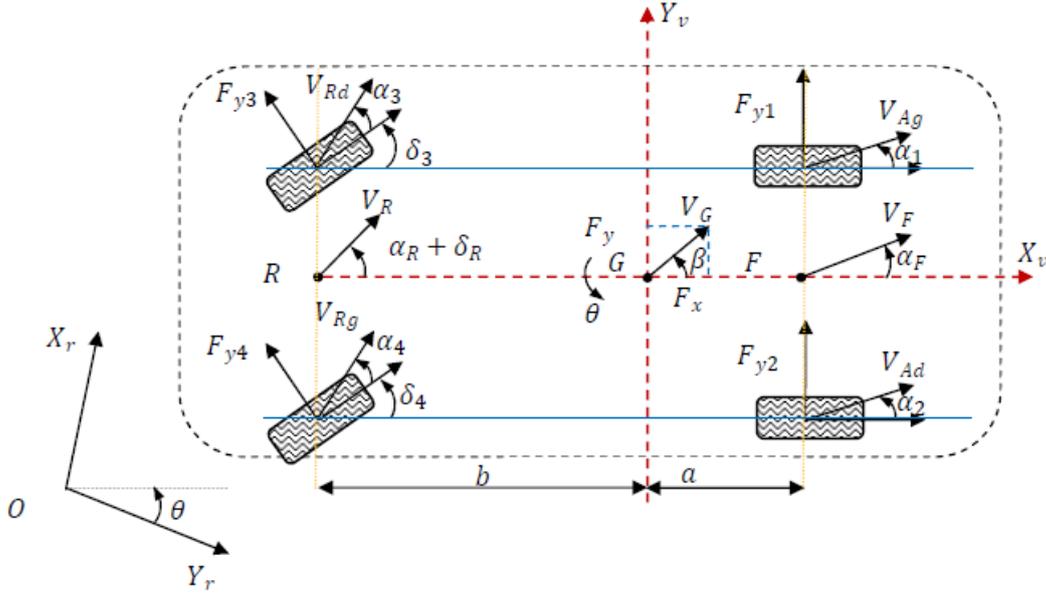


FIGURE 2.3 – Configuration complète du véhicule.

L'angle entre le vecteur V_R et l'axe longitudinal du véhicule s'appelle l'angle de glissement du véhicule, qui est en général identique avec l'angle de direction δ , un coefficient de proportionnalité ($k = 0.69$) entre ces deux angles est définis :

$$\beta = k\delta \tag{2.5}$$

La distance CG peut être exprimée de la manière suivante :

$$CG = \frac{RG}{\text{tg}\beta} = \frac{GF}{\text{tg}\delta} \tag{2.6}$$

Ce qui permet d'obtenir :

$$RG = GF \cdot \frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}\beta} \tag{2.7}$$

De plus :

$$RG + GF = l_\omega \tag{2.8}$$

On en déduit les expressions de RG et GF en fonction de L_ω, δ, β :

$$RG = \frac{1}{1 + \frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}\beta}} = l_\omega \cdot \frac{(\cos \delta \cdot \sin \beta)}{\sin(\delta + \beta)} \tag{2.9}$$

$$GF = \frac{1}{1 + \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\delta}} = l_\omega \cdot \frac{(\cos \beta \cdot \sin \delta)}{\sin(\delta + \beta)} \tag{2.10}$$

Les rayons de braquage ρ_R, ρ_F sont donnés par :

$$\rho_R = \frac{RG}{|\sin \beta|} = l_\omega \cdot \frac{\cos \delta}{\sin(\delta + \beta)} \tag{2.11}$$

$$\rho_F = \frac{GF}{|\sin \delta|} = l_\omega \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\delta + \beta)} \tag{2.12}$$

$$CG = \rho_R = \rho_R \cos \beta = \rho_\delta \cos \beta \tag{2.13}$$

La vitesse de rotation instantanée peut s'écrire :

$$\theta = \frac{V_R}{\rho_R} = \frac{V_F}{\rho_F} = \frac{V_h}{\rho_G} \tag{2.14}$$

Les équations du mouvement en R sont obtenues de manières géométriques :

$$x_R = V_R \cos(\theta + \beta) \tag{2.15}$$

$$y_R = x_R = V_R \sin(\theta + \beta) \tag{2.16}$$

$$\theta = V_R \frac{\sin(\theta + \beta)}{l_\omega \cos \delta} \tag{2.17}$$

$$\omega = \dot{\theta} \tag{2.18}$$

Les vitesses au point R sont données par :

$$V_R = \frac{V_{Rr} + V_{RI}}{2} \quad (2.19)$$

$$\omega = \frac{V_{Rr} + V_{RI}}{d} \quad (2.20)$$

Les équations suivantes sont utilisées pour retrouver les différents paramètres cinématiques du véhicule. A partir des équations précédentes, on peut déterminer les vitesses linéaires des roues motrices :

$$V_{Rr} = V_R + \Delta V \quad (2.21)$$

$$V_{RI} = V_R - \Delta V \quad (2.22)$$

avec :

$$\Delta V = \frac{d_\omega}{2} \frac{\sin(\delta + \beta)}{l_\omega \cos \delta} \quad (2.23)$$

En général, les expressions des vitesses des roues motrices sont reformulées comme suite :

$$V_{Rr} = V_R + k\delta\Delta V \quad (2.24)$$

$$V_{RI} = V_R - k\delta\Delta V \quad (2.25)$$

avec $k\delta = \pm 1$ correspond à un choix de braquage des roues, à droite (-1) ou à gauche (+1). Les vitesses linéaires des roues :

$$V_{Rr} = \omega_{Rr} R_r \quad (2.26)$$

$$V_{RI} = \omega_{RI} R_r \quad (2.27)$$

Les vitesses angulaires des roues motrices s'écrivent :

$$\omega_{Rr} = \omega_R + k\delta\Delta\omega \quad (2.28)$$

$$\omega_{RI} = \omega_R + k\delta\Delta\omega \quad (2.29)$$

avec :

$$\Delta\omega = \frac{\Delta V}{R_r} \frac{\sin(\delta + \beta)}{l_\omega \cos \delta} \frac{V_R}{R_r} = \frac{d_\omega}{2} \frac{\sin(\delta + \beta)}{l_\omega \cos \delta} \cdot \omega_R \quad (2.30)$$

$\Delta\omega$: la variation de vitesse angulaire (nulle en ligne droite).

L'équation (2.15) montre bien que la variation de vitesse des roues motrices est imposée par la trajectoire. Le cas particulier de la ligne droite, où les deux roues parcourent des trajectoires identiques, la variation de vitesse est nulle. Donc les vitesses de rotation sont égales.

2.4 Bilan des efforts appliqués au véhicule

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. Figure 2.4 montre les forces agissant sur un véhicule qui monte une pente. L'effort de traction F_T dans la zone de contact entre les pneus des roues motrices et la surface de la route propulse le véhicule en avant et arrière. Il est produit par le couple de la centrale et il est transféré à travers transmission et entraînement final aux roues motrices. Pendant que le véhicule roule, il y a une résistance qui tente d'arrêter son mouvement. La résistance comprend généralement le roulement des pneus, résistance aérodynamique et résistance en montée. D'après la deuxième loi de Newton, l'accélération de véhicule peut être écrite par :

$$\gamma_{acc} = \frac{dV_{veh}}{dt} = \frac{F_T - F_R}{\sigma_v M_v} \quad (2.31)$$

Où V_{veh} est la vitesse linéaire du véhicule, F_T est l'effet de traction totale du véhicule, F_R est la force totale de résistance à l'avancement du véhicule, et M_v est la masse totale du véhicule (motorisation, élément de stockage de l'énergie...) avec σ_v est un coefficient intervenant sur la masse qui prend en compte l'effet de masse en rotation dans la chaîne de traction.

Comme il est présenté dans la Figure 2.4, l'effort total F_T nécessaire à l'avancement du véhicule est la somme des différentes composantes issues du bilan des forces mécaniques et aérodynamiques appliquées aux véhicules [1, 21] :

$$\begin{aligned} F_T &= F_{roul} + F_{aero} + F_{pente} + F_{acc} \\ &= F_R + F_{acc} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Où

- F_{roul} : est la force de résistance de roulement des roues ;
- F_{aero} : est la force aérodynamique ;
- F_{pente} : est la force résistance due à la pente ;
- F_{acc} : est la force d'accélération.

Le couple résistant (T_R) lié à l'effort résistant total (F_R) que doit vaincre le système de motorisation est donné par la relation :

$$T_R = F_R \times R_\omega = (F_{roul} + F_{aero} + F_{pente}) \times R_\omega \quad (2.33)$$

Avec R_ω est le rayon de la roue motrice.

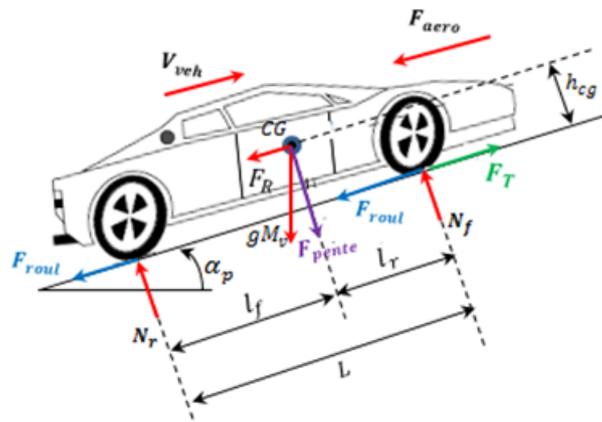


FIGURE 2.4 – Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement.

2.4.1 Force de résistance au roulement (F_{roul})

C'est la force de la 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). Le coefficient dépend de la nature et de l'état du braquage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement. Si les pneus avant sont différents des pneus arrière, ou leurs pressions de gonflage sont différents, l'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_{roul} = (C_{rr-f}M_f + C_{rr-r}M_r) \times g \approx gM_v C_{rr-moy} \quad (2.34)$$

Lorsque le véhicule monte sur une route en pente, la charge gM_v doit être remplacée par une composante, qui est perpendiculaire à la surface de la route. C'est :

$$F_{roul} = gM_v C_{rr-moy} \cos(\alpha_p) \quad (2.35)$$

Le couple résistance au roulement correspondant s'écrit comme suit :

$$T_{roul} = F_{roul} R_\omega \quad (2.36)$$

Nous donnons dans le Tableau 2.1 [24] quelques valeurs indicatives de C_{rr} pour différents états de route.

TABLE 2.1 – Coefficient de la résistance de roulement pour différents état de route.

Condition de la route	C_{rr}
Très bonne condition-Béton	0.008-0.1
Très bonne condition-Asphalte	0.01-0.012
Etat moyen-Béton	0.01-0.015
Etat moyen- Asphalte	0.018
Bon pavé	0.033-0.055
Mauvaise condition-Béton	0.02
Mauvaise condition- Asphalte	0.3
Mauvaise condition- Pavé	0.085
Neige peu profonde (5cm)	0.025
Neige épaisse (10cm)	0.037
sable	0.15-0.3

2.4.2 Force de résistance aérodynamique (F_{aero})

Cette force est proportionnelle à la masse volumique de l'air (ρ_{air}), au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale (S_f) et son coefficient de pénétration dans l'air qui prend des valeurs $C_{px} \in [0.25 - 0.5]$ selon les formes de carrosserie (Tableau 2.2). Son expression est donnée par la relation suivante [21, 22] :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_{px} (V_{veh} + V_{vent})^2 \quad (2.37)$$

Où :

- ρ_{air} : est la densité volumique de l'air en (kg/m^3) ;
- S_f : est la section frontale du véhicule en (m^2) ;
- C_{px} : est le coefficient de pénétration dans l'air ;
- V_{veh} : est la vitesse du véhicule en (m/s) ;
- V_{vent} : est la vitesse du vent (V_{vent}).

En l'absence de vent, on peut considérer cette force comme proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule. La résistance aérodynamique n'intervient réellement qu'à partir de $60km/h$, mais il devient rapidement prépondérante en suite.

Le couple aérodynamique correspondant au force aérodynamique est exprimé par :

$$T_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_{px} \omega_v^2 R_v^3 = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_{px} \omega_r^2 R_r^3 \quad (2.38)$$

Avec ω_v et ω_r sont les vitesses angulaires du véhicule et de la roue motrice respectivement.

TABLE 2.2 – Valeurs indicatif de coefficient de pénétration, dans l'air pour les différentes carrosseries [25].

Type de véhicule	C_{px}	Type de véhicule	C_{px}
	0.15-0.20		0.5-0.7
	0.23		0.5-0.7
	0.2-0.25	Autobus simplifiés	0.3-0.4
	0.3-0.4	Motocycle	0.6-0.7
	0.4-0.55	Bus	0.6-0.7

2.4.3 Force de résistance due à la pente (F_{pente})

C'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) qui peut être une montée ou une descente comme le montre la Figure 2.5, il y a une force supplémentaire proportionnelle à la masse totale (M_v) du véhicule qui s'oppose à son avancement. Cette force est donnée par :

$$F_{pente} = gM_v \sin(\alpha_p) \quad (2.39)$$

La pente est positive pour une montée et négatif pour une descente. Cela fait que la force devient positive en montée, et devient négative en descente. Dans une descente, cette composante n'est plus une force résistante mais une force motrice, d'où la nécessité d'abandonner la pédale de l'accélérateur et laissant le véhicule en mode frein moteur afin de la transformer en énergie électrique au niveau des roues motrices pour charger les batteries [2]. Le couple résistant correspondant s'écrit :

$$T_{pente} = gM_v R_\omega \sin(\alpha_p) \quad (2.40)$$

Pour simplifier les calculs, $\sin(\alpha_p)$ est souvent remplacé par la pente, pour des faibles valeurs.

$$F_{pente} = gM_v \cdot Pente \quad \text{si} \quad Pente(\%) \leq 20\% \quad (2.41)$$

La pente en pourcentage (%) est définie comme l'évolution verticale en mètre pour une distance horizontale de 100 mètre (Figure 2.5). Si (Y) représente l'évolution verticale, la pente $Pente(\%)$ est donnée par la relation suivante :

$$Pente(\%) = \left(\frac{Y}{100}\right) \times 100\% \quad (2.42)$$

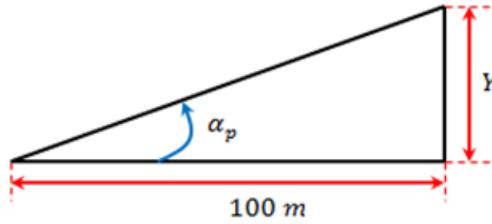


FIGURE 2.5 – Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement.

2.4.4 Force due à l'accélération (F_{acc})

La force due à l'accélération F_{acc} assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Cette force est obtenue par le produit entre la masse de véhicule M_v et l'accélération imposée par le conducteur [8].

$$F_{acc} = M_v \frac{dV_{veh}}{dt} = M_v \gamma_{acc} \quad (2.43)$$

Finalement, l'effort total de résistance à l'avancement du véhicule ainsi que son couple sont données par l'expression suivante :

$$\begin{cases} F_T = gM_v C_{rr_moy} + \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_{px} (V_{veh} + V_{vent})^2 + gM_v \sin(\alpha_p) + M_v \gamma_{acc} \\ T_T = F_T \times R_\omega \end{cases} \quad (2.44)$$

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

$$P_T = F_T V_{veh} \quad (2.45)$$

Le Tableau 2.3 résume les ordres de grandeur de la puissance maximale nécessaire pour les différentes catégories de véhicules.

Dans la suite de ce travail, notre étude portera sur le véhicule de type routier pour la gamme de puissance maximale indiquée dans le Tableau 2.3.

TABLE 2.3 – 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 urbaine	4 Kw
Bus urbain	160 Kw

2.5 Modélisation des éléments de la chaîne de traction électrique

La chaîne de traction électrique représente l'élément principal de la constitution du véhicule électrique. Elle regroupe principalement trois blocs caractérisés par une forte indépendance constituant l'ensemble Source-Convertisseur-Machine (SCM). Cet ensemble est utilisé dans toutes les applications requérant la variation de vitesse ou la commande en position. Leur domaine d'application est donc très vaste et il comprend notamment l'industrie de la voiture électrique, de la traction électrique (métro et train) et l'aérospatial [2].

La chaîne de traction comprend la batterie lithium-ion haute tension, considérée comme source d'énergie, de tension V_{batt} , fournissant une puissance P_{batt} et connecté au bus continu via un convertisseur continu-continu réversible en courant (convertisseur DC-DC de type Buck-Boost il s'agit de maintenir la tension constante en sortie de la batterie quel que soit son niveau de charge, augmenter la tension lors de fortes accélérations), la machine électrique et le(s) convertisseur(s) de puissance permettant le pilotage de la machine (Figure 2.6). Un convertisseur AC-DC est nécessaire au niveau du stator afin de relier le bus continu au stator triphasé. Un bus continu de nature capacitive (Cbus).

Cette section est consacrée à la modélisation des différents éléments qui constituent la chaîne de traction asynchrone du véhicule électrique. La figure suivante illustre la chaîne de traction du véhicule électrique.

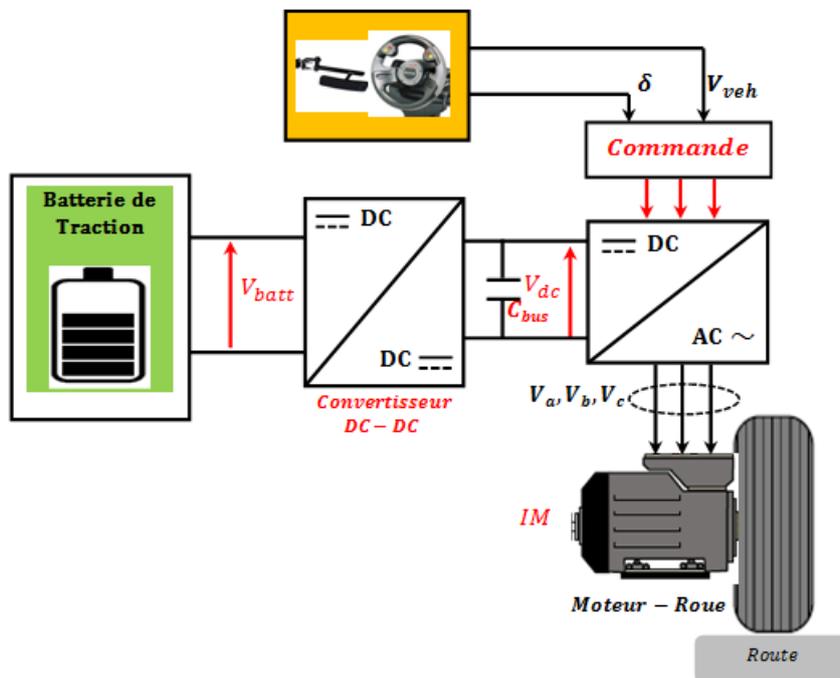


FIGURE 2.6 – Chaîne de traction électrique.

2.5.1 Modélisation de la machine asynchrone

La machine asynchrone, ou à induction (MI), est une machine AC dont le rotor tourne à une vitesse légèrement différente de la vitesse de synchronisme. Cette machine est utilisée dans une large variété d'applications industrielles grâce à ses propriétés : il s'agit d'une machine robuste, fiable, de coût modéré, sans besoin de maintenance périodique, capable de démarrer en boucle ouverte et facile à commander pour des applications à vitesse variable ne nécessitant pas une haute précision dynamique.

Dans ce qui suit, on va exposer le modèle classique et connu qui décrit le MAS sous formes condensées (matricielles). Pour cette mise en équation, on suppose que le bobinage soit bien reparti pour donner une f.é.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

On suppose également que le circuit magnétique du MAS n'est pas saturé. Le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau sont négligés. Et puisque le neutre n'est pas relié la machine et son alimentation est supposée symétrique, alors le régime homopolaire est absent [32, 26, 27] et [28].

Ces hypothèses simplificatrices ont pour principales conséquences :

- Additivité des flux, constance des inductances propres ;
- Loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statorique et rotorique en fonction de l'angle électrique.

Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone repose sur les lois d'électromagnétique. L'application symétrique d'une tension triphasée de pulsation ω_s aux enroulements statorique crée un champ magnétique tournant à la vitesse dite de synchronisme. Ce qui entraîne la création d'un courant triphasé de pulsation ω_r , l'interaction selon loi de Laplace et de Lorentz entre le champ statorique et le courant rotorique provoque ainsi la création d'une force (couple électromagnétique), qui s'exerce sur le rotor et fait tourner à la vitesse électrique ω . Nous obtenons, finalement, la relation interne de la machine asynchrone [16] :

$$\omega_s = \omega + \omega_r \tag{2.46}$$

Modélisation généralisée

La machine est alimentée en tension, les composantes du vecteur de commande de l'équation d'état seront donc des tensions. La Figure 2.7 rappelle le schéma élémentaire du MAS [29] :

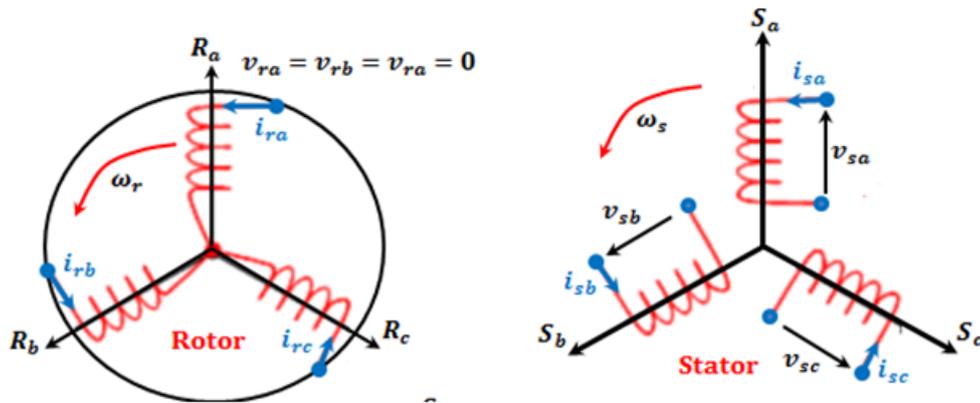


FIGURE 2.7 – Structure électrique de la machine asynchrone.

Les trois phases statoriques sont alimentées par trois tensions alternatives triphasées de pulsation ω , et de même amplitude :

$$v_{sabc} = [v_{sa} \quad v_{sb} \quad v_{sc}]^T \tag{2.47}$$

Ces trois phases sont parcourues par trois courants alternatifs triphasés de pulsation ω tels que :

$$i_{sabc} = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \quad (2.48)$$

Les équations de tension peuvent être écrites sous forme matricielle comme suite [31, 32] :

• Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{sa} \\ \dot{i}_{sb} \\ \dot{i}_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

• Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{ra} \\ \dot{i}_{rb} \\ \dot{i}_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

D'autre part, les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances $[L(\theta)]$. Celle-ci comporte 36 coefficients non nuls, dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique " θ ", position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) du stator (voir la Figure 2.8 suivante).

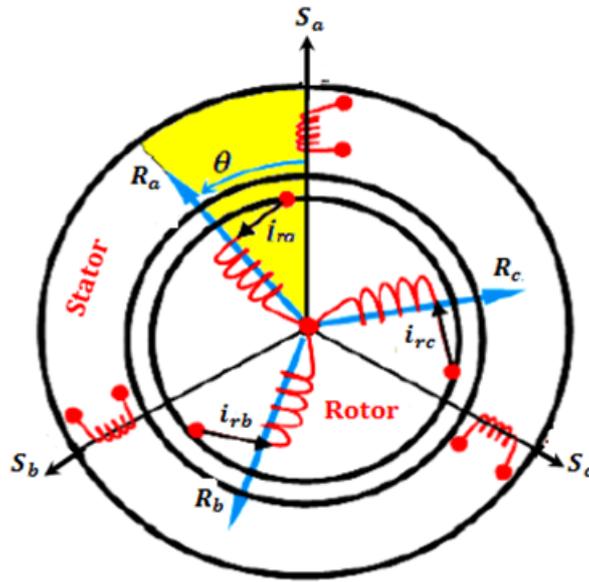


FIGURE 2.8 – Schéma de la machine asynchrone.

Les flux statoriques engendrés sont exprimés par :

$$\varphi_{sabc} = [\varphi_{sa} \quad \varphi_{sb} \quad \varphi_{sc}]^T \quad (2.51)$$

Et les flux rotoriques par :

$$\varphi_{rabc} = [\varphi_{ra} \quad \varphi_{rb} \quad \varphi_{rc}]^T \quad (2.52)$$

L'angle électrique s'exprime par : $\theta = p\theta_r$ où p est le nombre de paires de pôles magnétiques de la machine et θ_r est la position mécanique du rotor par rapport au stator.

Couramment, les flux statoriques et rotoriques sont donnés par la forme matricielle condensée suivante [32, 33] et [34] :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sabc} \\ \varphi_{rabc} \end{bmatrix} = L(\theta) \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Tels que :

$$[L_{s,r}] = \begin{bmatrix} l_{s,r} & M_{s,r} & M_{s,r} \\ M_{s,r} & l_{s,r} & M_{s,r} \\ M_{s,r} & M_{s,r} & l_{s,r} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Où $[L_s]$ et $[L_r]$ sont les matrices des inductances propres et mutuelles statoriques et rotoriques respectivement, tandis que $[M_{sr}]$ correspond à la matrice des inductances mutuelles Stator-Rotor, et M_{sr} étant la valeur maximale de ces inductances mutuelles.

Les flux s'expriment en fonction de deux courants statorique et rotorique ce qui implique un couplage entre les grandeurs du stator et du rotor. Ce couplage est à la base des non-linéarités du MAS. Les stratégies de commande moderne (commande vectorielle, DTC, ... etc.), permettent de découpler les grandeurs électriques du moteur afin de disposer de variables indépendantes à commander [33].

La dernière relation importante complétant le modèle du MAS, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$J_m \frac{d\Omega_r}{dt} + f_c \Omega_r = T_{em} - T_L \quad (2.56)$$

Tels que :

- $J_m(kg.m^2)$ est le moment d'inertie total sur l'arbre du moteur ;
- $\Omega_r(rad/s)$ est la vitesse angulaire mécanique du rotor ;
- $f_c(N.m.s/rad)$ est le coefficient de frottement visqueux ;
- $T_{em}(N.m)$ est le couple électromagnétique délivrer par le moteur ;
- $T_L(N.m)$ est le couple de charge.

Modèle dynamique de Park du MAS

Dans le modèle dynamique du MAS, la matrice des inductances varie en fonction de la vitesse de rotation du moteur, donc en fonction du temps. Afin d'en réduire la complexité et obtenir un système des équations à coefficients constants, on applique la transformation de Park. Ainsi, un changement de variables faisant intervenir le décalage angulaire entre l'axe des enroulements et les axes (d,q), permet de considérer un système d'enroulements équivalents pour le stator et le rotor. Ce système est formé de deux bobinages statorique et rotorique d'axes (d,q) en quadrature tournant à une même vitesse angulaire arbitraire [31].

En se basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de Park au stator et au rotor, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans ce repère qui tourne à une vitesse arbitraire. Des choix plus ou moins pertinents peuvent être faits en fonction du repère auquel on lie la réorientation de Park [30, 31] et [34].

a) Principe de la transformation de Park

Dans un système triphasé quelconque de tensions, de courants ou de flux $[x_a, x_b, x_c]^T$, on associe un système biphasé $[x_d x_q]^T$ donnant le même champ tournant. Les deux systèmes sont liés par la matrice de Park $[A]$ donnée ci-dessous [35] :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Avec :

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Psi + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\Psi) & -\sin(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Où : Ψ est l'angle entre l'axe d du repère de Park et l'axe de la phase (a) du système triphasé.

Ce système n'étant pas réversible, il faut lui adjoindre une équation supplémentaire. Pour cela, on introduit x_0 proportionnelle à la composante homopolaire des grandeurs triphasées, telle que :

$$x_0 = \frac{1}{3} (x_a + x_b + x_c) \quad (2.58)$$

D'où la matrice de Park s'écrit :

$$P(\Psi) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Psi + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\Psi) & -\sin(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Sa matrice inverse $P^{-1}(\Psi)$ s'écrit sous la forme :

$$P^{-1}(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 1 \\ \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

D'autre part, la Figure 2.9, représente les phases du MAS et leurs équivalents dans le plan de Park (d,q) :

L'équation 2.49 sous forme matricielle compacte peut être généralisée pour trois phases repérées par les indices a,b et c, que ce soient statoriques ou rotoriques [31] :

$$[v_{abc}] = [r] [i_{abc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) [\varphi_{abc}] \quad (2.61)$$

En appliquant la transformation de Park aux équations de tension, on obtient le système d'équations des tensions dans le repère de Park, qui constitue un modèle électrique dynamique pour l'enroulement équivalent [31, 34] :

$$\begin{cases} v_d = r i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \varphi_q \\ v_q = r i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \varphi_d \\ v_0 = r i_0 + \frac{d\varphi_0}{dt} \end{cases} \quad (2.62)$$

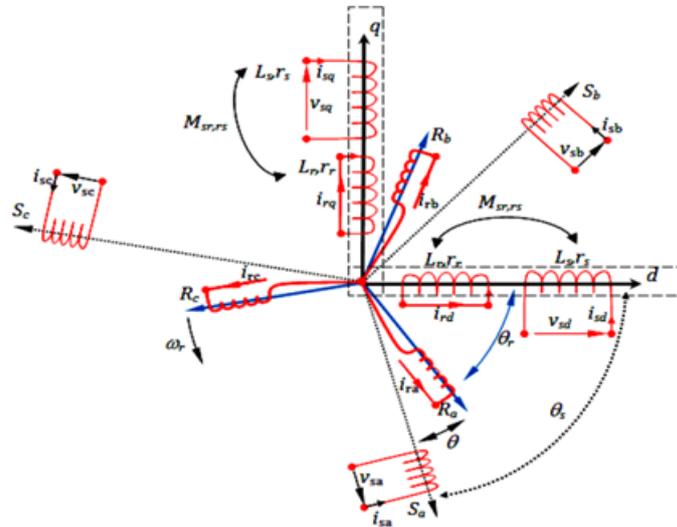


FIGURE 2.9 – Représentation des phases du MAS dans les axes(d,q) .

Dans le cas d'un système symétrique et une alimentation équilibrée (la somme des composantes a, b, c est nulle), la troisième équation, toujours vérifiée car identiquement nulle, devient inutile.

b) Equation des tensions du MAS dans le repère de Park

Les équations des tensions statoriques et rotoriques s'écrivent dans le repère de Park sous la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} = 0 \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} = 0 \end{cases} \quad (2.63)$$

Sachant que les flux dans le repère de Park, sont exprimés en fonction des courants statoriques et rotoriques par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Rappelons que :

- l_s est l'inductance propre d'une phase statorique ;
- l_r est l'inductance propre d'une phase rotorique ;
- M_s est un coefficient de mutuelle inductance entre deux phases statoriques ;
- M_r est coefficient de mutuelle inductance entre deux phases rotoriques ;
- $M_{(sr/rs)}$ est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique est une phase rotorique, obtenu lorsque les axes sont alignés ;
- $L_s=l_s-M_s$ est l'inductance cyclique statorique ;
- $L_r=l_r-M_r$ est l'inductance cyclique rotorique ;
- $M=3/2 M_{sr}$ est l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

c) Référentiels utilisés

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axe (d,q) qui dépendent des objectifs de l'application [31, 34] :

- Axes solidaires au champ tournant : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ et $\frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega_r$
- Axes tournant à la vitesse du rotor : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ et $\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$
- Axes liés au stator : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ et $\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r$

Pour agir sur les grandeurs réelles, il faut alors opérer un changement de référentiel c'est-à-dire la transformation inverse de Park. De même à partir des grandeurs saisies pour l'estimation ou la commande du système, il convient pour passer dans ce repère de Park, d'opérer les deux transformations de Clarke et de Park respectivement : $abc \rightarrow \alpha\beta$ et $\alpha\beta \rightarrow dq$.

Cependant le repère lié au stator est utilisé pour l'estimation des flux dans les commandes directes. On présente le modèle complet de la machine dans le repère de Park lié au référentiel statorique (α, β) et mis sous la forme d'état suivante :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2.65)$$

Telque :

$$X = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \varphi_{s\alpha} \quad \varphi_{s\beta}]^T, U = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T \quad (2.66)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & -\omega_r & K & \frac{\omega_r}{\sigma L_s} \\ \omega_r & -\gamma & -\frac{\omega_r}{\sigma L_s} & K \\ R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Avec :

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ le coefficient de dispersion de blondel ;

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$ et $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ les constantes de temps statorique et rotorique respectivement ;

$\omega_r = p\Omega_r$ la pulsation mécanique du rotor et p le nombre de paires de poles du MAS ;

$$K = \frac{1}{\sigma L_s T_r}, \gamma = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right).$$

d) Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être exprimé par plusieurs expressions [30, 31] dont on retient la suivante qui convient à la DTC et qui est exprimée en fonction des variables d'état utilisées précédemment :

$$T_{em} = \frac{3}{2}p (\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (2.68)$$

Résultats de simulation

Après avoir modélisé la machine, nous simulons le fonctionnement de la MAS, dont les paramètres sont indiqués en annexe (Tableau 0.2). La Figure 2.10 montre l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques lors du démarrage à vide de la MAS suivie d'une application d'une charge égale à 30N.m entre l'instant 1s et 2s.

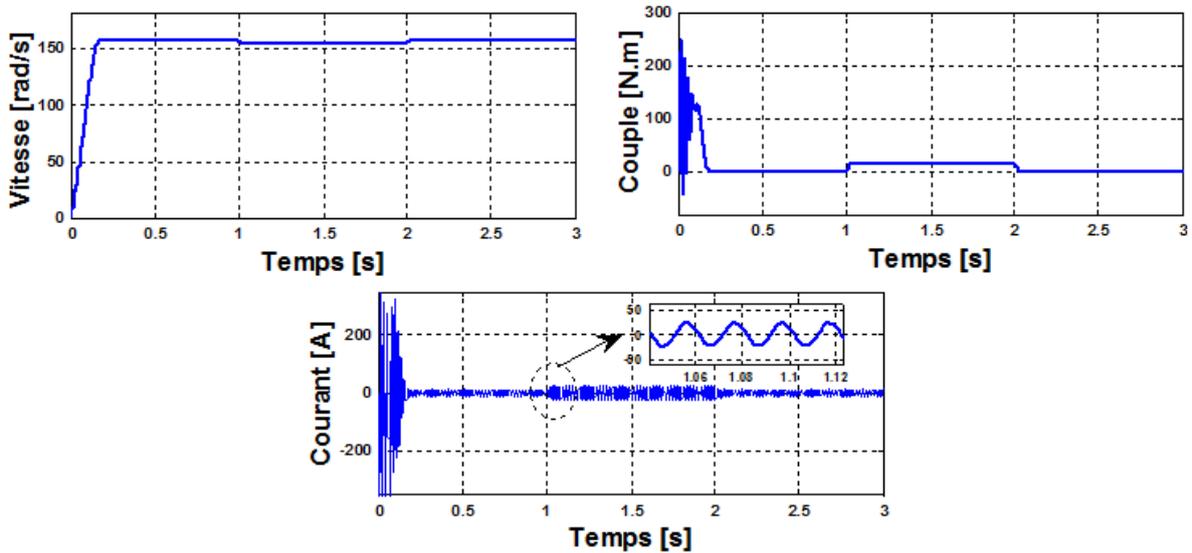


FIGURE 2.10 – Comportement dynamique de la MAS alimentée en tension sinusoïdale de valeur efficace de 220V.

L'analyse des courbes de simulation permet de tirer les remarques suivantes :

- La vitesse du moteur diminue pendant l'application de la charge.
- Pendant le régime transitoire de démarrage de la machine, le couple électromagnétique prend des valeurs relativement élevées, ainsi que le courant statorique.
- En régime permanent, toutes les grandeurs prennent des valeurs constantes.

2.5.2 Description du convertisseur d'énergie électrique (DC/AC)

Après avoir présenté le modèle de la machine, on présentera le cœur de l'organe de commande : le convertisseur d'énergie électrique. Le type du convertisseur utilisé dans la chaîne de traction est un onduleur de tension à deux niveaux (VSI : Voltage Source Inverter) [2]. L'onduleur de tension triphasé permet l'échange d'énergie entre une source de tension continu et une charge triphasée (enroulements statoriques de la machine).

On considère le cas idéal de l'onduleur de tension constitué de trois bras, de deux interrupteurs parfaits à commutation instantanée pour chacun. Chaque interrupteur est monté en parallèle avec une diode inversée de récupération possédant deux états possibles commandé à partir des grandeurs logique S_i . Les instants de commutation des interrupteurs doivent être contrôlés de manière complémentaire deux à deux T_1, T_2, T_3, T_4 et T_5, T_6 pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source [2]. Le schéma détaillé de l'onduleur triphasé à deux niveaux assure l'alimentation de la machine est représenté par la figure suivante :

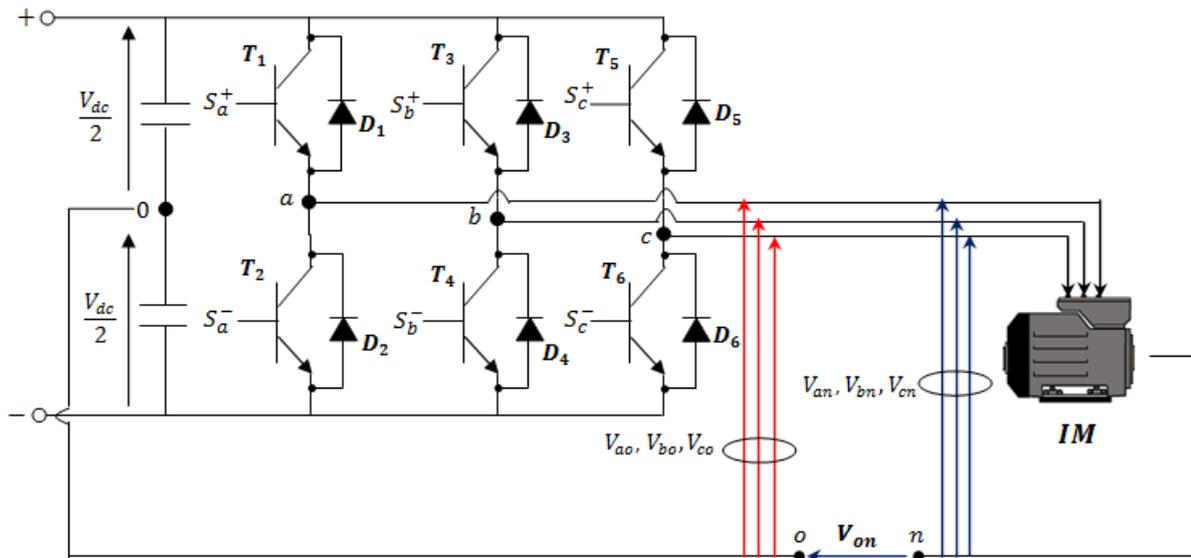


FIGURE 2.11 – Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux connecté au moteur asynchrone.

L'état des interrupteurs T_i supposés parfaits, peut être défini par une grandeur booléenne de commande S_i ($i=a,b,c$) :

- $S_i=1$ le cas où l'interrupteur de haut (T_1, T_3, T_5) est fermé et celui d'en bas (T_2, T_4, T_6) ouvert.
- $S_i=0$ le cas où l'interrupteur de haut (T_1, T_3, T_5) est ouvert et celui d'en bas (T_2, T_4, T_6) fermé.

On peut définir la fonction de commutation suivante [36] :

$$\begin{cases} T_2 = 1 - T_1 \\ T_4 = 1 - T_3 \\ T_6 = 1 - T_5 \end{cases} \quad (2.69)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur par rapport au point milieu (o) de la source prise comme référence de potentiel, sont données par la relation suivante :

$$V_i - V_0 = V_{dc} (S_i - \frac{1}{2}) \quad (2.70)$$

Soit n le point neutre du côté alternatif (MAS), alors les trois tensions composées V_{ab}, V_{bc} et V_{ca} sont définies par les relations suivantes [37] :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (2.71)$$

La charge constitué par la machine asynchrone est équilibrée ($V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$), on aura donc [12] :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (2.72)$$

faisant apparaitre le point « 0 », les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2.73)$$

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} : sont des tensions à l'entrée de l'onduleur (valeurs continues).

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : sont des tensions de phase à la sortie de l'onduleur (valeurs alternatives).

En remplaçant (2.68) dans (2.67) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix}$$

Des relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2.75)$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et o :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.76)$$

V_{no} : la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice $\langle o \rangle$.

L'utilisation de l'expression (2.70) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Il reste à déterminer les fonctions S_i , celles-ci dépendent de la stratégie de commande de l'onduleur afin de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies ont été développées par plusieurs auteurs à savoir la commande pleine onde (180°), la commande décalée, la commande à modulation de largeur d'impulsion MLI.

Séquences d'un onduleur de tension triphasé :

L'état des interrupteurs de l'onduleur de tension, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande $S_i (i = a, b, c)$ telle que :

Si=1 si l'interrupteur du haut est fermé et celui du bas ouvert.

Si=0 si l'interrupteur du haut est ouvert et celui du bas fermé.

Comme nous disposons de trois interrupteurs, il ya donc huit possibilités pour le vecteur de tension V_s , Les vecteurs tensions sont représentées par la relation suivante :

$$\vec{V}_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} & i = 1, \dots, 6 \\ 0 & i = 0, 7 \end{cases} \quad (2.76)$$

La représentation spatiale du vecteur de tension dans le repère fixe $(\alpha - \beta)$ est illustrée par la Figure 2.12 et les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan $(\alpha - \beta)$ par la Figure 2.13.

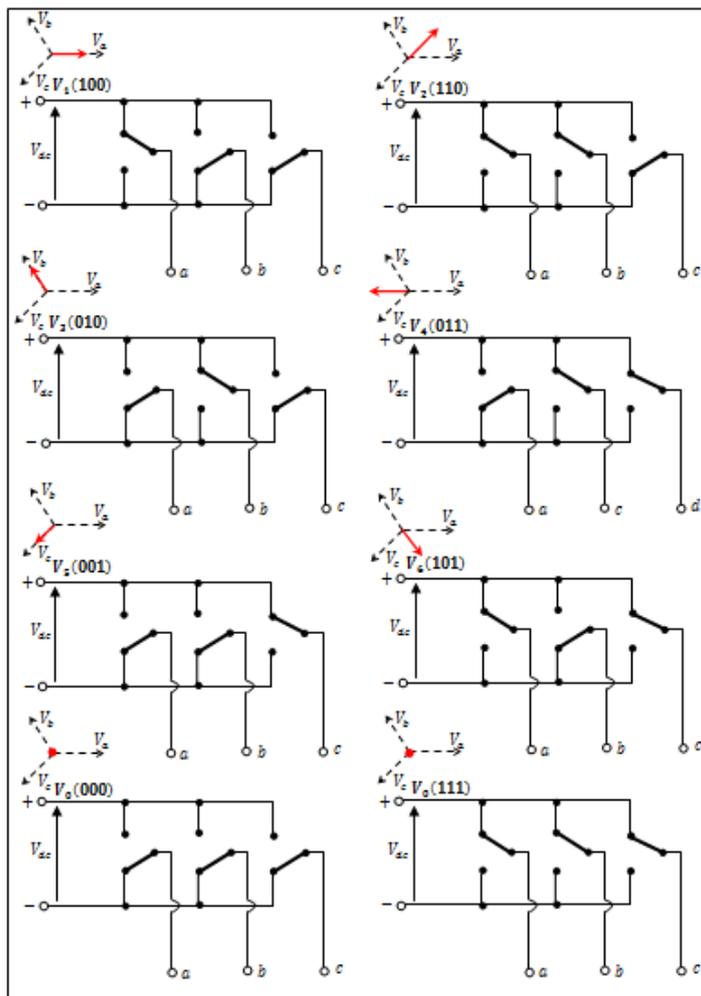


FIGURE 2.12 – Différentes topologies de l'onduleur et vecteur tension \vec{V}_i .

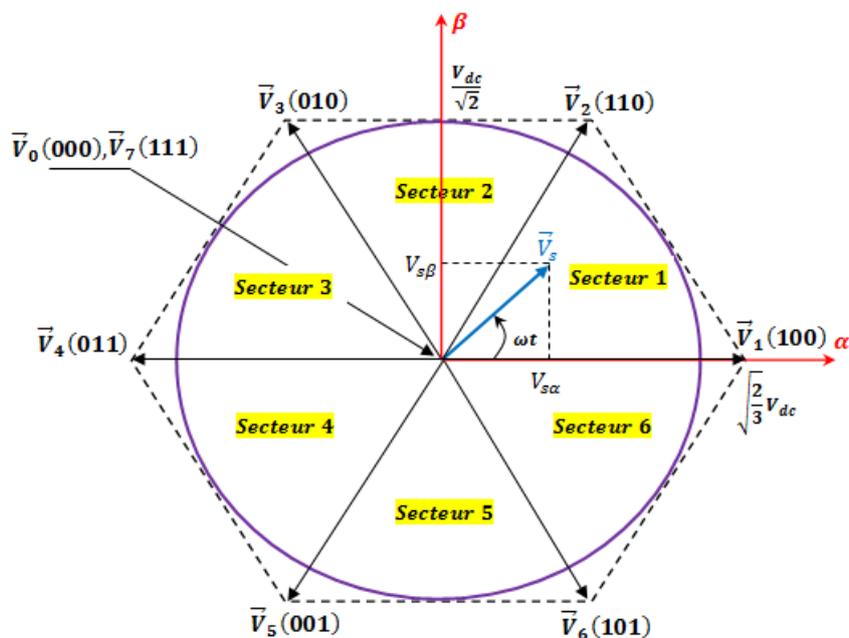


FIGURE 2.13 – Représentation des vecteurs de tension dans le plan $(\alpha - \beta)$.

A partir de la relation (2.75) nous pouvons définir les tensions aux bornes des enroulements de la machine asynchrone. Pour obtenir ces tensions dans le repère $(\alpha - \beta)$ nous utilisons la transformation de Concordia.

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

Ce qui, pour les huit vecteurs de commutation de l'onduleur, fournira le Tableau ci-dessous :

TABLE 2.4 – Calcul des vecteurs de tensions.

S_a	S_b	S_c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$	\vec{V}_s
0	0	0	0	0	0	0	0	\vec{V}_0
1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3}$	0	\vec{V}_1
1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/\sqrt{6}$	$V_{dc}/\sqrt{2}$	\vec{V}_2
0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/\sqrt{6}$	$V_{dc}/\sqrt{2}$	\vec{V}_3
0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3}$	0	\vec{V}_4
0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/\sqrt{6}$	$-V_{dc}/\sqrt{2}$	\vec{V}_5
1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/\sqrt{6}$	$-V_{dc}/\sqrt{2}$	\vec{V}_6
1	1	1	0	0	0	0	0	\vec{V}_7

2.5.3 Modélisation de la source d'énergie

En ce qui est du stockage de l'énergie, le composant le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. Du fait qu'elles sont parmi les moins chères, les batteries au plomb sont les plus utilisées dans le domaine du transport, mais elles sont aussi les plus lourdes et peu performantes. D'autres technologies, comme Nickel Métal Hydrure ou le Lithium-Ion, qui ont généralement un meilleur rendement et de meilleures performances spécifiques peuvent être utilisées. Mais ces technologies ont un coût encore élevé qui peut représenter un point limitant pour des applications à des véhicules électriques et hybrides électriques d'une part et, d'autre part leur gestion (température, cycles de charge-décharge, estimation de l'état de charge) s'avère plus délicate.

La batterie peut être modélisée par deux méthodes différentes, soit par des lois mathématique selon une série d'équations chimiques et semi empiriques ou électriquement par un circuit équivalent [2]. Nous décrivons dans la suite plusieurs modèles électrique de batterie de différentes complexités.

Modèles à paramètres constantes

2.5.3.1.1 Modèle statique (E_0, R)

Le modèle le plus simple de batterie est le modèle statique (E_0, R) à paramètres constants présenté par la Figure 2.14, qui implémente l'équation suivante :

$$V_{batt} = E_0 - RI_{batt} \quad (2.78)$$

Avec :

- R : Résistance interne de la batterie ;
- E_0 : Force électromotrice à vide ;
- V_{batt}, I_{batt} : Tension et courant de la batterie.

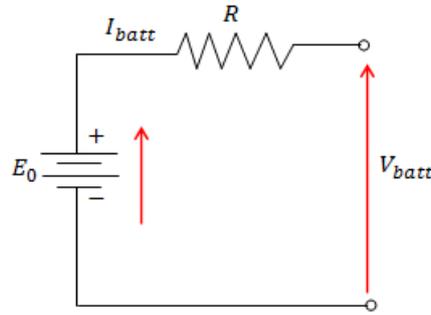


FIGURE 2.14 – Modèle électrique statique de la batterie (pour une cellule).

La variation de tension en fonction du courant prélevé à la batterie I_{batt} est ainsi modélisée. La valeur du paramètre R est une donnée connue du constructeur. Elle peut également être déduite de courbes de tension issues d’essais (de même que le paramètre E_0). Le paramètre E_0 étant constant, l’état de charge de la batterie ne varie pas. Ce modèle à quantité d’énergie infinie ne convient donc pas à une étude d’autonomie.

2.5.3.1.2 Modèle dynamique (E_0, R, C)

L’ajout d’un élément capacitif introduit une dynamique dans le modèle (Figure 2.15). L’équation désormais implémentée est la suivante :

$$V_{batt} = E_0 - \frac{R}{1+RCp} I_{batt} \tag{2.79}$$

Les valeurs des paramètres E_0, R et C sont calculées à partir de données d’essais (ou de courbes constructeur).

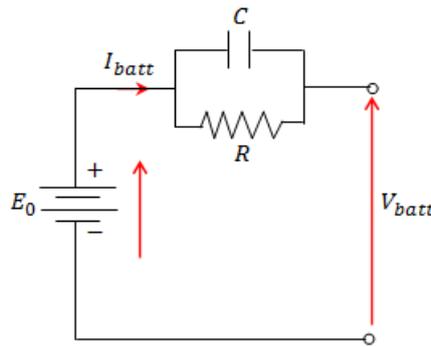


FIGURE 2.15 – Modèle électrique dynamique de la batterie (pour une cellule).

Modèles à paramètres variables

L’inconvénient majeur des modèles précédents à paramètre E_0 constant lors des études d’autonomie est la non prise en compte de la variation de l’état de charge (SOC : State Of Charge) de la batterie et de la tension à ses bornes au cours de son utilisation. Le modèle ci-dessous modélise ces phénomènes. L’estimation de l’état de charge de la batterie est une tâche importante parce que plusieurs paramètres doivent être pris en compte comme par exemple le vieillissement de la batterie. Lié directement avec la durée de vie des batteries (cette dernière étant directement liée à leurs conditions d’utilisation). Il dépend essentiellement du nombre de cycles « charge et décharge ».

Le SOC correspond à la quantité de charge, notée C_N , pouvant être restituée par la batterie par rapport à sa capacité nominale, notée C_{N0} et correspondant à $SOC = 100\%$ (batterie pleinement chargée) :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - 100 \frac{C_N(t)}{C_{N0}} \tag{2.80}$$

Où la capacité de la batterie $C_N(t)$ à l’instant t , est donnée par l’équation ci-dessous :

$$C_N(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_0}^t I_{batt}(t) .dt \tag{2.81}$$

Avec

$SOC(t_0)$: représente l'état de charge à l'instant initial t_0 entre 0 et 100 et constitue un paramètre de simulation. C_N et C_{N0} : sont exprimés en [A.h].

La tension V_{batt} est fonction du SOC, de la température T° du pack et du courant I_{batt} selon une relation non explicitée :

$$V_{batt} = f(SOC(t), T^\circ, I_{batt}(t)) \tag{2.82}$$

Les paramètres de ce modèle sont donc C_{N0} et la fonction $f(SOC(t), T^\circ, I_{batt}(t))$. Toute technologie de batterie sans restriction peut être représentée par ce modèle.

Modèle Sim Power Systems

Quatre technologies de cellule de batterie sont implémentées dans le modèle de la librairie Matlab Simulink SimPowerSystems : Acide-Plomb, Lithium-Ion, Nickel-Cadmium et Nickel-Métal-Hydrure. Ce modèle présente l'avantage d'être plus précis que le modèle précédent. La difficulté liée à l'utilisation de ce modèle réside dans le paramétrage complexe.

La batterie utilisée dans ce mémoire est composée des cellules Lithium ion de modèle SimPowerSystems. La capacité d'une cellule de batterie Lithium-ion égale à 6.5A.h. Sa tension nominale est 5.8V. Les paramètres de la batterie Li-ion du modèle SPS (SimPowerSystems) utilisé sont donnés par le Tableau 2.5.

TABLE 2.5 – Paramètres de la batterie Lithium-ion.

Paramètres	Unité	Valeur
Tension nominale	[V]	200
Capacité à la tension nominale	[A.h]	6.5
Capacité nominale	[A.h]	5.878
SOC (State Of Charge) initial (entre 0 et 100)	/	75
Capacité maximale	[A.h]	6.5
Tension maximale	[V]	232.794
Courant nominal de décharge	[A]	2.8261
Résistance interne	[ohms]	0.307
Limites de la zone exponentielle (Tension, Capacité)	[V], [A.h]	216.077/0.319

2.6 Couplage entre le modèle mécanique et celui de la motorisation

Faisons référence à la Figure 2.16, le couplage entre la partie dynamique et celle de la motorisation se donne par la fameuse équation [22, 23].

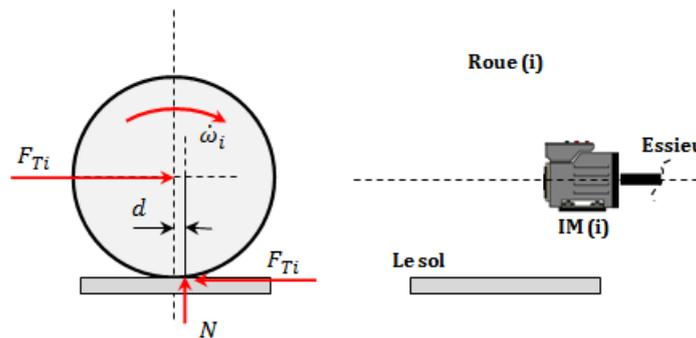


FIGURE 2.16 – Couplage entre la partie mécanique et électrique.

$$(J_\omega + J_m) \dot{\omega}_i = T_{em_i} - T_{R_i} \tag{2.83}$$

Avec :

- J_ω : moment d'inertie de la roue (kg.m²) ;
- T_{em_i} : couple moteur de la roue $i \in [1, 2]$ (N.m) ;
- T_{R_i} : couple résistant de la roue $i \in [1, 4]$ (N.m) ;

Les expressions des couples résistants qui agissent sur chaque roue sont données par [23] :

$$\begin{cases} T_{R-i} = R_\omega F_{T_i} - d_z N_f & \text{si } i \in [1, 3] \\ T_{R-i} = R_\omega F_{T_i} - d_z N_r & \text{si } i \in [2, 4] \end{cases} \quad (2.84)$$

Les valeurs de la distance d_z sont tout à fait petites (leur différence est habituellement égale à zéro) et peuvent être négligées [21]. Les charges 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, 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 petites ($\sin(\alpha_p) = \alpha_p$) 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 [22] :

$$\begin{cases} N_f = \frac{gM_v}{2} \left(\frac{l_r}{L} - \frac{h_{cg}}{gL} \frac{dV_{cg}}{dt} \alpha_p - \frac{h_{cg}}{L} \alpha_p \right) \\ N_r = \frac{gM_v}{2} \left(\frac{l_f}{L} + \frac{h_{cg}}{gL} \frac{dV_{cg}}{dt} \alpha_p + \frac{h_{cg}}{L} \alpha_p \right) \end{cases} \quad (2.85)$$

2.6.1 Modèle de la chaîne de transmission mécanique

La partie mécanique du véhicule électrique est couplée à la motorisation électrique à travers un réducteur. Le réducteur doit être choisi de manière à ce que le couple transmissible soit toujours supérieur au couple résistant, il permet l'adaptation des vitesses de rotation et des couples entre l'arbre de la machine électrique et les roues.

La relation entre la vitesse de la roue et la vitesse du moteur est donnée par [53] :

$$\omega_{r-i} = N_{red} \times \omega_i \quad (2.86)$$

Avec

N_{red} : rapport de réduction de vitesse des moteurs ;

ω_i : vitesse angulaire des roues motrices ;

ω_{r-i} : vitesse angulaire de chaque moteur

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 moteur à induction (IM). Ainsi, la vitesse angulaire de la roue peut être calculée de la vitesse du véhicule.

$$\begin{cases} F_{roue} = \frac{1}{R_\omega} T_{em} \\ \omega_{ij} = \frac{1}{R_\omega} v_{veh} \end{cases} \quad (2.87)$$

Le châssis du véhicule est décomposé en deux fonctions. Un couplage exprime la sommation des forces de traction dues à chacun des moteurs.

$$F_T = F_{roue_lr} + F_{roue_rr} \quad (2.88)$$

2.7 Modélisation de différentiel électronique de vitesse (DEV)

Le modèle du véhicule électrique présenté dans les paragraphes précédents, nous permet de mobiliser le système de différentiels électronique de vitesse (DEV) qui présente le noyau de véhicule électrique étudié dans cette étude. Son principe de fonctionnement est équivalent à celui du différentiel mécanique. Sur un véhicule classique, les roues motrices sont reliées par des demi-arbres commandés par un renvoi d'angle. Sur chacune des roues il s'exerce un couple égal à la moitié de celui fourni par le renvoi d'angle [2]. A cause de la liaison rigide constituée avec l'arbre de transmission, les deux roues motrices tournent à la même vitesse angulaire, ce qui ne présente pas d'inconvénient particulier dans la marche en ligne droite [40, 41]. Pour effectuer un virage, une condition cinématique d'Ackermann entre les angles de braquage des roues motrices se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur du virage doit être vérifiée :

$$\frac{1}{\tan(\delta_{ex})} - \frac{1}{\tan(\delta_{in})} = \frac{d_\omega}{L} \quad (2.89)$$

Suivant la trajectoire imposée par le conducteur de tourner à droite ou à gauche, (Figure 2.17). Lorsque le véhicule arrive au début d'un virage le conducteur applique un angle de braquage sur les roues avant [42]. Le différentiel électronique agit instantanément sur les deux roues motrices, en réduisant la vitesse de roue motrice située à l'intérieur du virage, ce qui augmente la vitesse de roue motrice située à l'extérieur du virage [43].

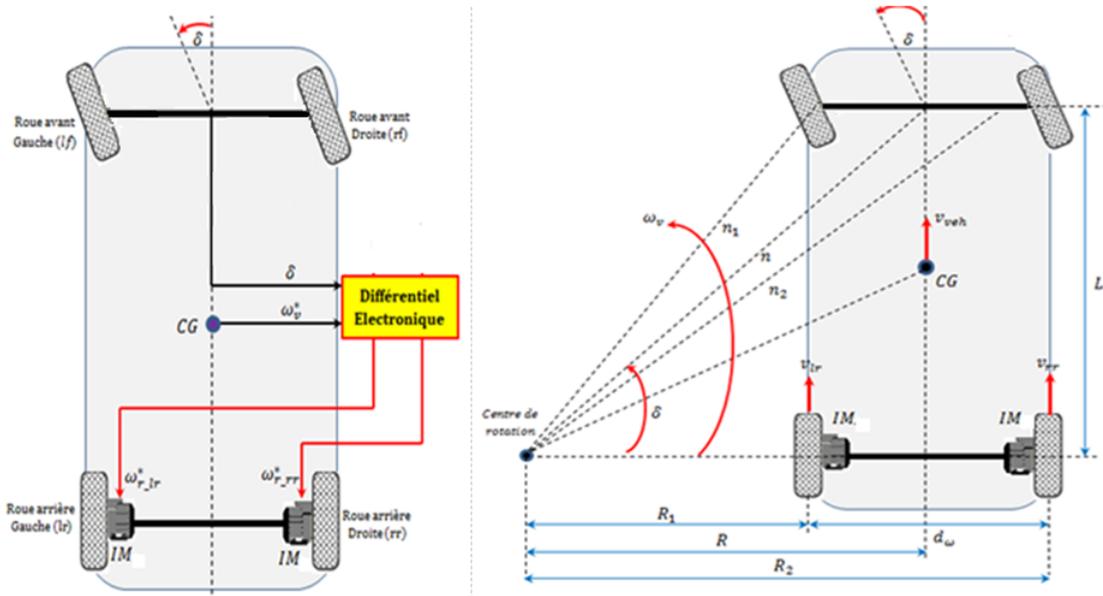


FIGURE 2.17 – Géométrie du véhicule dans virage et le schéma de la structure du différentiel électronique de vitesse des deux roues motrices.

Le Tableau 2.6 précise les notions utilisées dans les équations de modèle cinématique ci-dessous.

TABLE 2.6 – Variables utilisées lors de développement de différentiel électronique.

Paramètres	Définitions	Unité
v_{veh}	Vitesse linéaire de véhicule	Km/h ou m/s
δ	Angle de braquage	Degré (°)
L	Longueur du véhicule	Mètre (m)
d_{ω}	Distance entre les roues motrices du véhicule	Mètre (m)
R	Rayon de braquage du centre de gravité de l'essieu arrière	Mètre (m)
R_1	Rayon de braquage de la roue arrière intérieure	Mètre (m)
R_2	Rayon de braquage de la roue arrière extérieure	Mètre (m)
n	Rayon de braquage du centre de gravité de l'essieu avant	Mètre (m)
n_1	Rayon de braquage de la roue avant intérieure	Mètre (m)
n_2	Rayon de braquage de la roue avant extérieure	Mètre (m)
v_{lr}, v_{rr}	Vitesse linéaire des roues arrière gauche et arrière droite	Km/h ou m/s

A partir de modèle cinématique représenté par la Figure 2.3, une relation géométrique pour les roues arrière peut être exprimée par :

$$\begin{cases} R = \frac{L}{\tan(\delta)} \\ R_1 = R - \frac{d_{\omega}}{2} \\ R_2 = R + \frac{d_{\omega}}{2} \end{cases} \quad (2.90)$$

Pour avoir un roulement pur pour les roues arrière, on a :

$$\frac{v_{lr}}{v_{rr}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.91)$$

En utilisant l'équation (2.90) et l'équation (2.91), la vitesse des deux roues-moteur arrière en fonction de vitesse du véhicule et le rayon de virage est donnée par :

$$\begin{cases} v_{lr} = v_{veh} \left(R - \frac{d_{\omega}}{2} \right) \\ v_{rr} = v_{veh} \left(R + \frac{d_{\omega}}{2} \right) \end{cases} \quad (2.92)$$

La relation entre la vitesse linéaire et angulaire des roues motrices est exprimée par l'expression ci-dessous.

$$\omega_{ij} = \frac{v_{ij}}{R_{\omega}} \quad ij = lf, rf, lr, rr \quad (2.93)$$

Substituant l'équation (2.93) dans (2.92), on obtient la vitesse angulaire des deux roues motrice de l'essieu arrière

$$\begin{cases} \omega_{lr} = \omega_v \left(1 - \frac{d_w \tan(\delta)}{2L}\right) \\ \omega_{rr} = \omega_v \left(1 + \frac{d_w \tan(\delta)}{2L}\right) \end{cases} \quad (2.94)$$

2.8 Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons présenté la structure du véhicule électrique à deux roues motrices qui fera l'objet de notre étude dans ce manuscrit. Ensuite, nous avons montré la modélisation dynamique du véhicule . puis nous avons présenté les différents forces constituant le bilan des efforts appliquées au véhicule, ces efforts qui représentent le couple résistant exercé sur le véhicule et qu'il faut vaincre afin d'assurer son déplacement.

Pour la partie chaine de traction, nous sommes partis dans la modélisation des différents composants constitutifs de cette chaine (motorisation qui est un moteur asynchrone, batterie, convertisseurs...), ainsi le couplage entre les deux parties électrique et mécanique.

A la fin de ce chapitre, on a présenté en détail la modélisation du différentiel électronique, qui est un élément indispensable dans le système de traction donnant une assurance dans la prise en virage par le conducteur.

Après avoir présenté le modèle global du véhicule, la stratégie de contrôle direct du couple de la machine asynchrone utilisé dans la chaine de traction fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Commande directe du couple DTC de la machine asynchrone MAS

3.1 Introduction

Depuis une quarantaine d'années, plusieurs stratégies de commande ont été développées pour pouvoir réaliser un contrôle découplé de la machine asynchrone. Ces méthodes appelées « commande vectorielle » assurant des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu. Ces méthodes présentent l'inconvénient majeur d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine. Pour contourner ces problèmes, des nouvelles méthodes de contrôle ont été développées pour commander la machine asynchrone.

La commande directe du couple (DTC) ou Direct Torque and Flux Control (DTFC) en anglais, est basée sur l'orientation du flux statorique est l'une des méthodes introduite par I. Takahashi et M. Depenbrock en 1985 sous la terminologie DSC « Direct Self Control » [45, 46]. Cette commande est caractérisée par sa simplicité, sa haute performance et sa robustesse par rapport aux variations paramétriques. Le terme commande direct du couple vient du fait que sur la base des erreurs entre les valeurs de références et celles estimées du couple et du flux statorique, il est possible de commander directement les états de l'onduleur. En utilisant des comparateurs à hystérésis.

Dans ce chapitre nous présenterons le principe de la commande directe du couple, ainsi des résultats de simulation sont présentés pour illustrer les performances de cette commande.

3.2 Principe de la commande direct du couple DTC

La DTC a été introduite par I. Takahashi en 1985 à partir de la méthode du flux orienté et du principe du moteur à courant continu [47, 48]. Il a proposé de remplacer le découplage à travers la transformation vectorielle par un contrôle non linéaire tel que les états de commutation de l'onduleur soient imposés à travers un pilotage séparé du flux statorique et du couple électromagnétique du moteur. La DTC est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliqué à un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation des régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et le couple électromagnétique [49, 50]. L'état de ces grandeurs nous permet de définir le vecteur tension statorique à appliquer à la machine asynchrone pour maintenir au mieux le couple et le flux dans leurs bandes d'hystérésis. Une variable intervenant également dans les choix des tensions et la position du vecteur flux statorique dans le plan complexe (α, β)

Pour cela, le plan est divisé en six secteurs. La structure du contrôle direct du couple de base est résumée ci-dessous, Figure 3.1 Sur cette figure un onduleur de tension à deux niveaux est utilisé afin d'atteindre 7 positions distinctes dans le plan de phase. Correspondant aux huit vecteurs tensions de l'onduleur, parmi lesquels deux sont nuls. Ces vecteurs sont choisis à partir d'une table de commutation en fonction des erreurs du flux ($C\varphi_s$), du couple (CT_{em}) et de la position du vecteur flux statorique (θ_s) (où θ_s correspond à une discrétisation de l'angle du vecteur flux statorique, et identifie le secteur angulaire dans lequel se trouve ce vecteur). Les composants du vecteur flux statorique [51], sont déterminés par estimation en intégrant directement les tensions statorique, par la suite le couple électromagnétique est estimé à partir des courants statorique mesurés [51, 52]. L'erreur instantanée du couple est ensuite calculée et appliquée à un régulateur à hystérésis double bande, générant à sa sortie la variable (CT_{em}) à trois niveaux (-1, 0, 1), représentative du sens d'évolution temporelle souhaité pour le couple. De même le module du vecteur flux statorique est calculé à partir des valeurs de ses coordonnées, et l'erreur de flux statorique injecté dans un régulateur à hystérésis de bande unique, générant à sa sortie la variable binaire ($C\varphi_s$) à deux niveaux (0, 1), représentative de l'évolution souhaitée pour le flux [53, 54].

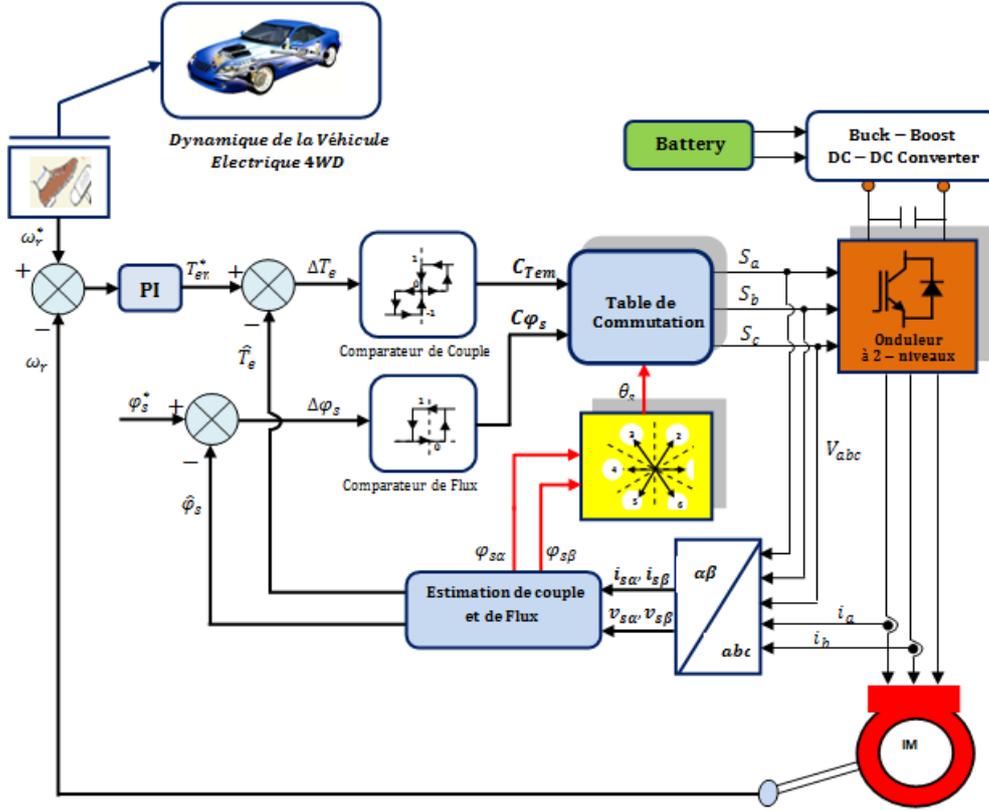


FIGURE 3.1 – Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple (DTC Classique).

3.2.1 Contrôle du flux statorique de la machine

La commande directe du couple est basée sur l'orientation du flux statorique, l'expression du flux dans le référentiel lié au stator (α, β) de la machine est obtenue par l'équation suivante :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \quad (3.1)$$

On obtient :

$$\bar{\varphi}_s = \int_0^t (\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s) dt \quad (3.2)$$

La chute de tension due à la résistance statorique peut être négligée (cas des vitesses élevées par exemple), l'équation (3.1) devient :

$$\frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \cong \bar{V}_s \quad (3.3)$$

Pour une période d'échantillonnage T_e la configuration de l'onduleur ne change pas, par conséquent le vecteur tension \bar{V}_s appliqué reste constant, donne l'équation (3.3) en discret peut s'écrire :

$$\bar{\varphi}_s(k+1) = \bar{\varphi}_s(k) + \bar{V}_s T_e \quad (3.4)$$

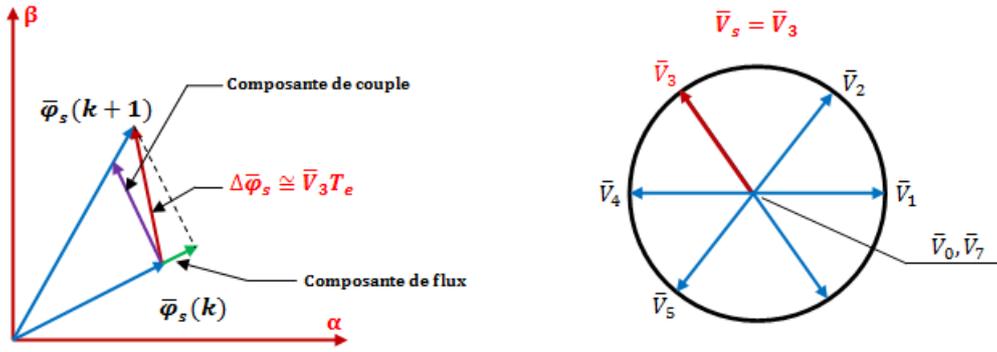
Avec :

$\bar{\varphi}_s(k+1)$: Vecteur du flux statorique à l'instant d'échantillonnage t_{k+1}

$\bar{\varphi}_s(k)$: Vecteur du flux statorique à l'instant d'échantillonnage t_k

T_e : Période d'échantillonnage.

L'équation (3.4) n'implique que l'extrémité du vecteur $\bar{\varphi}_s$ se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur de la tension appliquée \bar{V}_s . La Figure 3.2. montre un exemple d'application du vecteur \bar{V}_s


 FIGURE 3.2 – Evolution du vecteur flux pendant une période T_e .

En choisissant une séquence adéquate des vecteurs \bar{V}_s , sur les périodes de commande T_e , il est donc possible de fonctionner avec un module de flux $\bar{\varphi}_s$ pratiquement constant, en faisant suivre à l'extrémité de $\bar{\varphi}_s$ une trajectoire presque circulaire, si la période T_e est très faible devant la période de rotation du flux statorique. Lorsque le vecteur tension \bar{V}_s sélectionné est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité de $\bar{\varphi}_s$ est donnée par sa dérivée $\frac{d\bar{\varphi}_s}{dt}$, cette dérivée représente aussi la vitesse de déplacement de $\bar{\varphi}_s$. La vitesse est maximale si le vecteur \bar{V}_s choisi est perpendiculaire à la direction de $\bar{\varphi}_s$.

3.2.2 Contrôle de couple électromagnétique de la machine

L'expression du couple électromagnétique dans le repère (α, β) lie au stator de la machine asynchrone s'écrit [55] :

$$T_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \text{Im} \left(\bar{\varphi}_s, \bar{\varphi}_r \right) \quad (3.5)$$

Le vecteurs flux statorique $\bar{\varphi}_s$ et flux rotorique $\bar{\varphi}_r$ peuvent être exprimés comme suit :

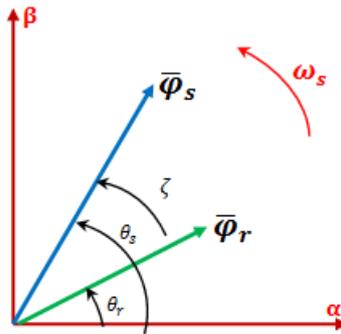
$$\begin{cases} \bar{\varphi}_s = \varphi_s e^{j\theta_s} \\ \bar{\varphi}_r = \varphi_r e^{j\theta_r} \end{cases} \quad (3.6)$$

Avec θ_s et θ_r sont respectivement les positions du flux statorique et rotorique $\bar{\varphi}_s$ et $\bar{\varphi}_r$ dans le repère (α, β) lie au stator comme montre la Figure 3.3.

En désignant par $\zeta = \theta_s - \theta_r$ entre les deux vecteurs flux (Figure 3.3), l'expression du couple devient :

$$T_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin(\zeta) \quad (3.7)$$

Où φ_s et φ_r sont respectivement les modules des flux statorique et rotorique.


 FIGURE 3.3 – Position des vecteurs flux statorique $\bar{\varphi}_s$ et rotorique $\bar{\varphi}_r$.

D'après l'équation (3.7), on peut apercevoir que le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs $\bar{\varphi}_s$ et $\bar{\varphi}_r$ et de leur

position relative.

À partir des équations des flux, le courant rotorique s'écrit :

$$\bar{I}_r = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\bar{\varphi}_r}{L_r} - \frac{M}{L_r L_s} \bar{\varphi}_s \right) \quad (3.8)$$

Et en utilisant les équations de la machine, exprimées dans le repère lié au rotor on trouve :

$$\frac{d\bar{\varphi}_r}{dt} + \frac{1}{\sigma T_r} \bar{\varphi}_r = \frac{M}{L_r L_s} \bar{\varphi}_s \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) montre que le flux $\bar{\varphi}_r$ suit les variations de $\bar{\varphi}_s$ avec une constante de temps T_r . Le rotor agit comme un filtre de constante de temps σT entre les flux $\bar{\varphi}_s$ et $\bar{\varphi}_r$.

Si on suppose que la période d'échantillonnage T_e est telle que :

$$T_e \ll \sigma T_r \quad (3.10)$$

En appliquant un vecteur tension \bar{V}_s pendant une période d'échantillonnage T_e et en tenant compte de la condition (3.10), le flux rotorique $\bar{\varphi}_r$ continue à tourner avec la même vitesse en conservant presque la même amplitude, alors que le flux statorique tourne d'un angle $\Delta\zeta$ [55] avec :

$$\Delta\zeta = \Delta\omega_s T_e \quad (3.11)$$

L'expression du couple devient alors :

$$T_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin(\zeta + \Delta\zeta) \quad (3.12)$$

Cette relation montre que les variations du couple peuvent être contrôlées par $\Delta\zeta$ image de la vitesse de rotation du flux statorique. Deux cas se présentent :

$\Delta\zeta > 0$: $\bar{\varphi}_s$ accéléré \Rightarrow le couple électromagnétique croît.

$\Delta\zeta < 0$: $\bar{\varphi}_s$ décéléré \Rightarrow le couple électromagnétique décroît.

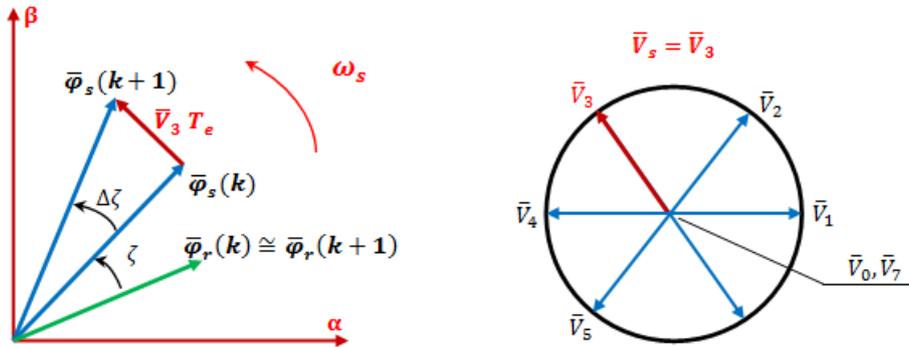


FIGURE 3.4 – Exemple de l'évolution de l'angle ζ .

3.2.3 Choix du vecteur tension

Pour fixer l'amplitude du vecteur flux statorique l'extrémité du vecteur flux doit dessiner une trajectoire circulaire. Pour cela le vecteur tension appliquée doit rester toujours perpendiculaire au vecteur flux. Ainsi en sélectionnant un vecteur approprié, l'extrémité du flux peut être contrôlée de manière à maintenir l'amplitude du vecteur flux à l'intérieur d'une certaine fourchette.

Le choix de \bar{V}_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux mais également de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent pour le couple. On délimite généralement l'espace d'évolution de $\bar{\varphi}_s$ dans le référentiel fixe (α, β) lié au stator, en le décomposant en six zones (secteurs) de 60° symétriques par rapport aux directions des vecteurs tensions non nuls. Comme le montre la Figure 3.5.

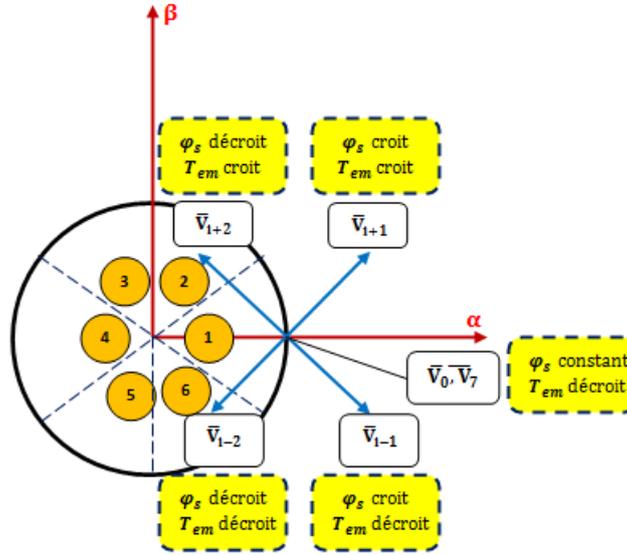


FIGURE 3.5 – Choix du vecteur tension.

Lorsque le vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ se trouve dans le secteur numéroté i , les deux vecteurs \bar{V}_i et \bar{V}_{i+3} ont la composante de flux la plus importante. En plus leur effet sur le couple dépend de la position du vecteur flux dans la zone. Le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivantes :

- ⇒ Si \bar{V}_{i+1} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ croît et T_{em} croît.
- ⇒ Si \bar{V}_{i-1} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ croît et T_{em} décroît.
- ⇒ Si \bar{V}_{i+2} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ décroît et T_{em} croît.
- ⇒ Si \bar{V}_{i-2} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ décroît et T_{em} décroît.

⇒ Si le vecteur \bar{V}_0 ou \bar{V}_7 est choisi, le flux $\bar{\varphi}_s$ ne se déplace pas, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux $\bar{\varphi}_s$ reste inchangé.

Le vecteur de tension sélectionné pour alimenter l'onduleur de la machine asynchrone est déduit selon des écarts du couple et du flux par rapport à leurs références, ainsi que la position du vecteur flux $\bar{\varphi}_s$.

Un estimateur de flux $\bar{\varphi}_s$ en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires.

3.2.4 Les estimateurs

Estimateurs du flux statorique

L'estimation du flux statorique se fait à partir de vecteur tension et courant statorique de la machine. Dans le repère (α, β) lié au stator le vecteur flux statorique $\bar{\varphi}_s$ s'écrit :

$$\bar{\varphi}_s = \varphi_{s\alpha} + j\varphi_{s\beta} \tag{3.13}$$

A partir du système d'équation (3.13), les deux composantes α et β du vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \tag{3.14}$$

On obtient les tensions composées $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$, de \bar{V}_s à partir de la tension d'entrée mesurée de l'onduleur U_{dc} , des états de commande (S_a, S_b, S_c) , et en utilisant la transformation de Concordia, on obtient :

$$\bar{V}_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \tag{3.15}$$

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} (S_a - \frac{1}{2} (S_b - S_c)) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (3.16)$$

Pour calculer les composantes $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$ du vecteur de courant statorique \bar{I}_s , nous utilisons la transformation de Concordia, à partir des courants mesurés (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) , soit :

$$\bar{I}_s = I_{s\alpha} + jI_{s\beta} \quad (3.17)$$

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}}i_{sa} \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}V_{dc} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (3.18)$$

Le module du flux statorique s'écrit :

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (3.19)$$

Le secteur numéroté i dans le quel se situe le vecteur $\bar{\varphi}_s$ est déterminé à partir des composantes $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$. L'angle θ_s entre le référentiel (α) et le vecteur $\bar{\varphi}_s$ est égale à :

$$\theta_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (3.20)$$

La détermination de la position de $\bar{\varphi}_s$ dans l'intervalle $[0 - 2\pi]$ est donné par le Tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Position du vecteur flux statorique

		θ_s
$\varphi_{s\alpha} > 0$	$\varphi_{s\beta} > 0$	$\arctg (\varphi_{s\beta} / \varphi_{s\alpha})$
	$\varphi_{s\beta} < 0$	$\arctg (\varphi_{s\beta} / \varphi_{s\alpha}) + 2\pi$
$\varphi_{s\alpha} < 0$		$\arctg (\varphi_{s\beta} / \varphi_{s\alpha}) + \pi$
$\varphi_{s\alpha} = 0$	$\varphi_{s\beta} \geq 0$	$\pi/2$
	$\varphi_{s\beta} \leq 0$	$3\pi/2$

Estimateurs du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir de l'estimation du flux et de la mesure du courant statorique :

$$T_{em} = \frac{3}{2}p (\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (3.21)$$

3.2.5 Elaboration du vecteur de commande

Correcteur de flux

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande étudiée. En effet, avec ce type de contrôle, on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ dans une couronne circulaire comme le montre la Figure 3.6 [39].

Pour cela un simple comparateur à hystérésis à deux niveaux est utilisé (Figure 3.6 (b)). La sortie du correcteur représentée par une variable booléenne ($C\varphi_s$), indique directement si l'amplitude du flux doit être augmenté ($C\varphi_s = 1$) ou diminuée ($C\varphi_s = 0$) de façon à maintenir :

$$|\varphi_s^* - \varphi_s| \leq \Delta\varphi_s \quad (3.22)$$

Avec :

φ_s^* : est le flux de référence.

$\Delta\varphi_s$: est la largeur d'hystérésis du correcteur

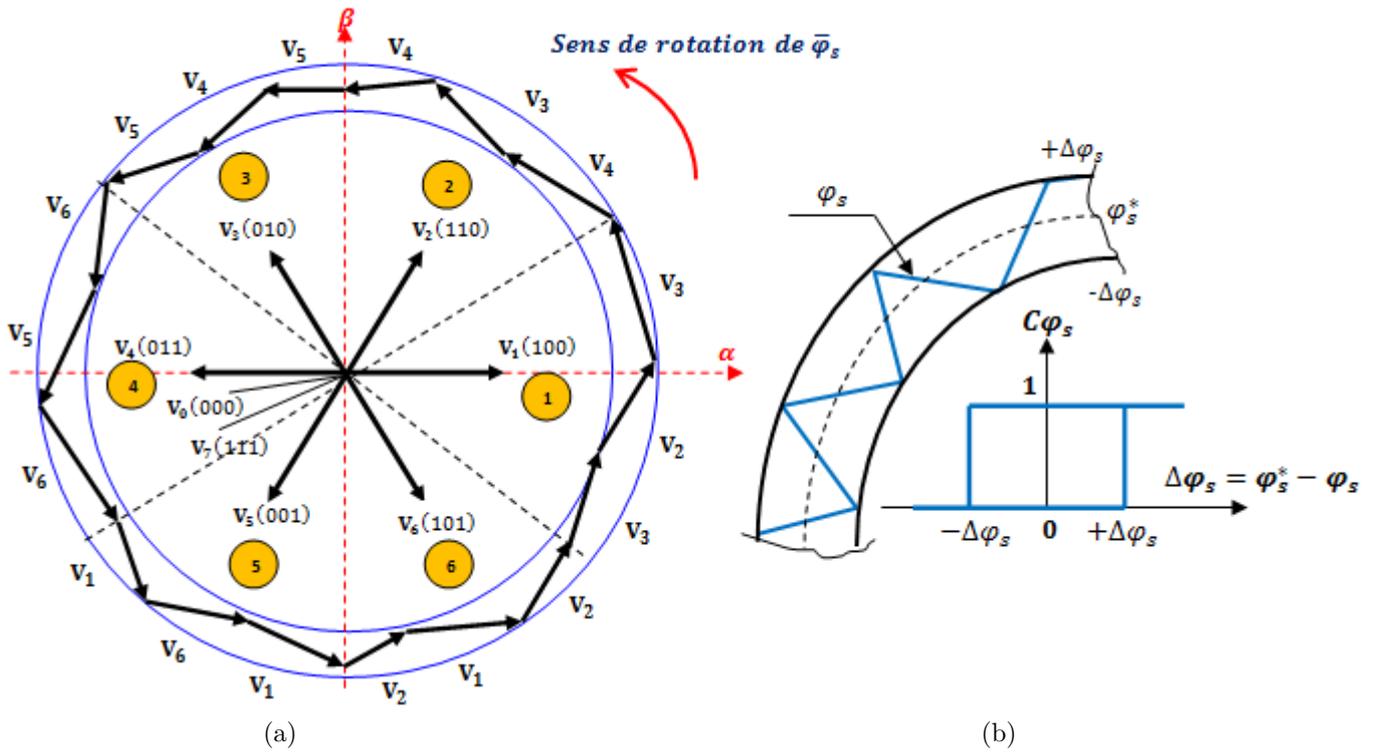


FIGURE 3.6 – (a) Sélection des tensions correspondant au contrôle du flux, (b) Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.

Correcteur de couple électromagnétique

On définit l'erreur sur le couple, noté ΔT_{em} , comme la différence entre le couple de référence et sa valeur estimée [56] :

$$\Delta T_{em} = |T_{em}^* - T_{em}| \tag{3.23}$$

Pour la correction du couple, on utilise aussi un comparateur à hystérésis qui a pour rôle de maintenir le couple dans les limites admissibles définies comme suit :

$$|T_{em}^* - T_{em}| \leq \Delta T_{em} \tag{3.24}$$

Avec :

T_{em}^* : est le couple de référence.

ΔT_{em} : est la largeur d'hystérésis du correcteur.

Cependant la différence avec le contrôle du flux et que le couple peut être positive ou négatif selon le sens de rotation de la machine. Deux solutions peuvent être envisagées (Figure 3.7) :

Un correcteur à hystérésis à deux niveaux.

Un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

3.2.5.2.1 Correcteur du couple à deux niveaux

Le correcteur à deux niveaux est utilisé dans le cas du contrôle du couple dans un seul sens de rotation. Ainsi, seule les vecteurs \bar{V}_{i+1} et \bar{V}_{i+2} et les vecteurs nuls peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le vecteur flux. Le vecteur nul est sélectionné pour diminuer le couple. On peut choisir le vecteur tension nulle de manière à ce qu'un bras d'onduleur ne commute jamais quand le flux est situé dans une zone donnée.

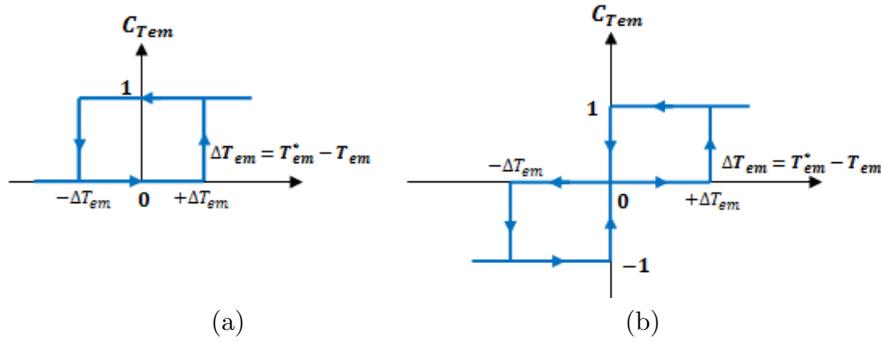


FIGURE 3.7 – Correcteur à hystérésis du couple : (a) à deux niveaux, (b) à Trois niveaux.

3.2.5.2 Correcteur du couple à trois niveaux

Ce correcteur permet de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif. La sortie du correcteur, présentée par la variable booléenne CT_{em} . Figure 3.8 (b) indique directement si l’amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue ($CT_{em} = 1$), pour une consigne positive et ($CT_{em} = -1$), pour une consigne négative, ou diminuée ($CT_{em} = 0$). En effet pour diminuer la valeur du couple, on applique les vecteurs \bar{V}_{i+1} et \bar{V}_{i-2} ce qui permet une décroissance du couple électromagnétique.

3.2.6 Elaboration de la table de commutation

L’onduleur de tension à deux niveaux alimentant la machine asynchrone est piloté par une loi de commande générée à partir d’une table de commutation. Cette dernière est construite en fonction des sorties des régulateurs à hystérésis CT_{em} et $C\varphi_s$, et du numéro de secteur où se trouve le flux statorique $\bar{\varphi}_s$, les vecteurs de tension sont choisis afin de maintenir le flux et le couple à l’intérieur des bandes d’hystérésis. La table de commutation définie par I.TAKAHASHI [57] est donnée par le Tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Table de commutation de la commande DTC.

Numéro de secteur N		1	2	3	4	5	6	
Comparateur de flux	Comparateur de flux							
$C\varphi_s = 1$	$CT_{em} = 1$	\bar{V}_2	\bar{V}_3	\bar{V}_4	\bar{V}_5	\bar{V}_6	\bar{V}_1	2 Niveaux
	$CT_{em} = 0$	\bar{V}_7	\bar{V}_0	\bar{V}_7	\bar{V}_0	\bar{V}_7	\bar{V}_0	
	$CT_{em} = -1$	\bar{V}_6	\bar{V}_2	\bar{V}_3	\bar{V}_4	\bar{V}_5		3 Niveaux
$C\varphi_s = 0$	$CT_{em} = 1$	\bar{V}_3	\bar{V}_5	\bar{V}_6	\bar{V}_1	\bar{V}_2		2 Niveaux
	$CT_{em} = 0$	\bar{V}_0	\bar{V}_0	\bar{V}_7	\bar{V}_0	\bar{V}_7		
	$CT_{em} = -1$	\bar{V}_5	\bar{V}_1	\bar{V}_2	\bar{V}_3	\bar{V}_4		2 Niveaux

3.2.7 Régulation de la vitesse de la machine asynchrone

La stratégie de commande directe du couple de la machine asynchrone avec référence du couple étudiée précédemment, n’est applicable que lorsque le couple de charge est en fonction de la vitesse rotorique. Cette dernière évolue en boucle ouverte. Dans le cas où l’application nécessite une régulation de vitesse, l’utilisation d’un régulateur de vitesse s’impose.

Dans ce paragraphe nous intéresserons à la synthèse du régulateur de vitesse de type PI (proportionnel-intégral) pour la réalisation de notre stratégies de commande DTC avec boucle de vitesse. Le couple électromagnétique est lié à la vitesse par l’équation différentielle suivante :

$$T_{em} = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + f_c \omega_r + T_L \tag{3.25}$$

Le schéma bloc simplifié du système de contrôle de vitesse par régulateur PI est représenté par la Figure 3.8. [47, 58].

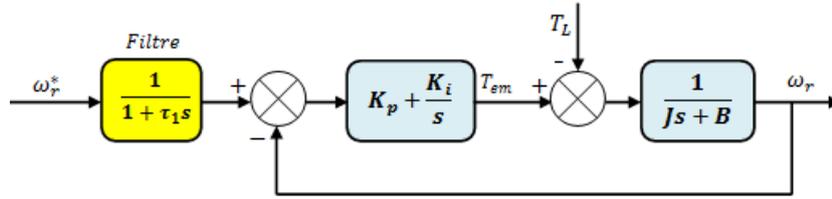


FIGURE 3.8 – Schéma bloc de régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle ouvert $G(s)$ liant la vitesse de rotation et le couple électromagnétique avec un couple de charge nul est donnée par :

$$G(s) = K_{iv} \frac{(\tau s + 1)}{s(J_m s + B)} \text{ avec } B = \frac{f_c}{J_m}, \tau = \frac{K_{pv}}{K_{iv}} \quad (3.26)$$

La fonction de transfert en boucle fermé est :

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{G(s)}{1+G(s)} = K_{iv} \frac{(\tau s + 1)}{J_m s^2 + (B + K_{iv}\tau)s + K_{iv}} \\ &= \frac{(\tau s + 1)}{\frac{J_m}{K_{iv}} s^2 + \tau s + 1} \text{ avec } B \approx 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Par identification avec l'équation caractéristique de second ordre fondamental, on trouve :

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{J_m}{K_{iv}} \\ 2\xi\omega_n = \tau \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{iv} = \frac{4\xi^2 J_m}{\tau} \\ K_{pv} = K_{iv}\omega_n \end{cases} \quad (3.28)$$

On utilise le filtre $\left(\frac{1}{1+\tau_1 s}\right)$ pour éliminer le dépassement dans la vitesse.

3.2.8 Caractéristiques générales d'une DTC [39]

⇒ La DTC est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.

⇒ La commande indirecte des intensités et tensions statorique proches des formes sinusoïdales.

⇒ L'obtention des flux et des courants statorique proches des formes sinusoïdales.

⇒ La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.

⇒ L'existence des oscillations de couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.

⇒ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis.

Avantages de la DTC [39]

⇒ Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator.

⇒ Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI).

⇒ Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle.

⇒ Elle exige deux comparateurs à hystérésis et un contrôleur de vitesse du type PI, tandis que la commande vectorielle exige deux régulateurs PI et un modulateur de PWM.

⇒ Il n'est pas nécessaire de connaître avec une grande précision l'angle de position rotorique, car seule l'information de secteur dans lequel se trouve le vecteur de flux statorique est nécessaire.

⇒ La réponse dynamique du couple est très rapide.

⇒ Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

Inconvénients de la DTC [39]

⇒ L'existence de problèmes à basse vitesse (influence du terme résistif).

⇒ La nécessité de disposer des estimations de flux statorique et du couple.

⇒ L'existence des oscillations de couple.

⇒ La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des régulateurs à hystérésis), ce qui conduit à un contenu riche en harmoniques qui fait augmenter les pertes et amener à des bruits acoustiques et des oscillations de couple pouvant exciter des résonances mécaniques.

Cependant, la DTC est une commande qui est basée sur l'estimation du flux statorique et du couple électromagnétique. Seule la variation de la résistance du stator, due aux changements de la température ou le fonctionnement à des vitesses de rotation petites dégrades les performances de la commande DTC [39].

3.3 Résultats de simulation

Le comportement de la structure de la commande directe du couple DTC, appliqué à une machine asynchrone de 15Kw (dont les paramètres sont définis en annexe (Tableau 0.2)) alimenté par un onduleur de tension triphasé, en présence de la boucle de réglage de la vitesse par un correcteur PI, en utilisant le schéma bloc de la (Figure 3.1), simulé sous l'environnement Matlab/Simulink. La simulation est effectuée dans les conditions suivantes :

⇒ Une bande d'hystérésis de $\pm 0.01Wb$ pour le flux et de $\pm 0.1Nm$ pour le couple.

⇒ Un flux statorique de référence de $\pm 1.1Wb$.

⇒ La période d'échantillonnage est de $2\mu s$.

Les performances de notre commande ont été testées à partir de la simulation des modes de fonctionnements suivante : un démarrage à vide suivi par une application d'un couple de charge, une inversion de sens de rotation, fonctionnement à basse vitesse, la robustesse de la commande vis-à-vis la variation de résistance statorique, tester l'effet de la variation de l'inertie sur le comportement du système et test d'affaiblissement de flux statorique.

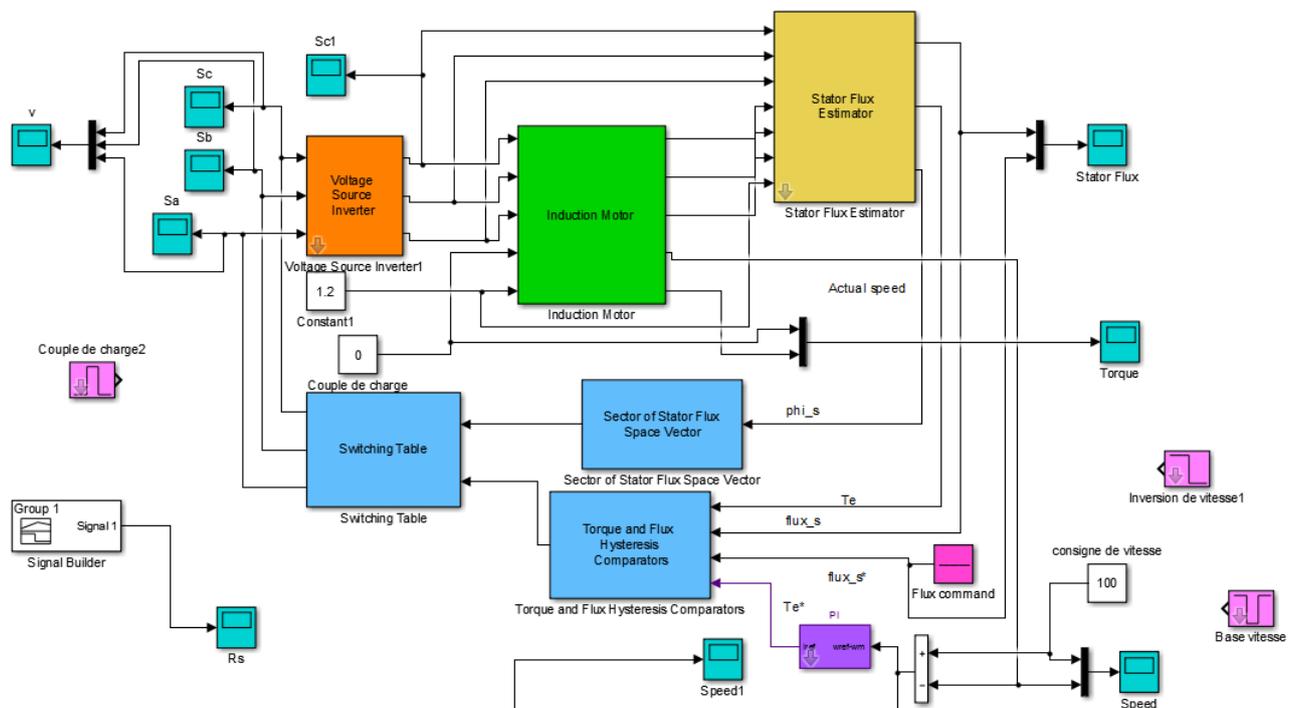


figure : Schéma bloc de la DTC.

3.3.1 Test de démarrage à vide suivi d'une application du couple de charge

Afin d'illustrer les performances statique et dynamique de la commande DTC, On a introduit à simuler les régimes transitoires suivants : démarrage à vide avec une vitesse de consigne de 100rad/s , en appliquant en suite un couple de charge $T_L = 20\text{Nm}$ à l'instant $t = 2\text{s}$ et on cesse l'application à l'instant $t = 3.5\text{s}$. La Figure 3.9. montre les résultats de simulation obtenus avec un démarrage à vide, suivi d'une application de charge nominale à $t = 2\text{s}$. Cette figure représente les réponses de la vitesse, du couple, et du flux statorique ainsi la trajectoire du flux. De ces courbes, on peut noter que la vitesse réelle ω_r du moteur converge vers sa valeur de référence ω_r^* avec un temps de réponse faible de l'ordre de 0.47s avec un dépassement de 7.5rad/s et sans erreur statique. Lorsqu'on applique le couple de charge à $t = 2\text{s}$ on peut voir un sous-dépassement de vitesse d'environ 2.1rad/s de la vitesse de référence qui rejoint par la suite la valeur de référence. L'erreur de vitesse est important au démarrage lorsqu'on applique un couple de charge.

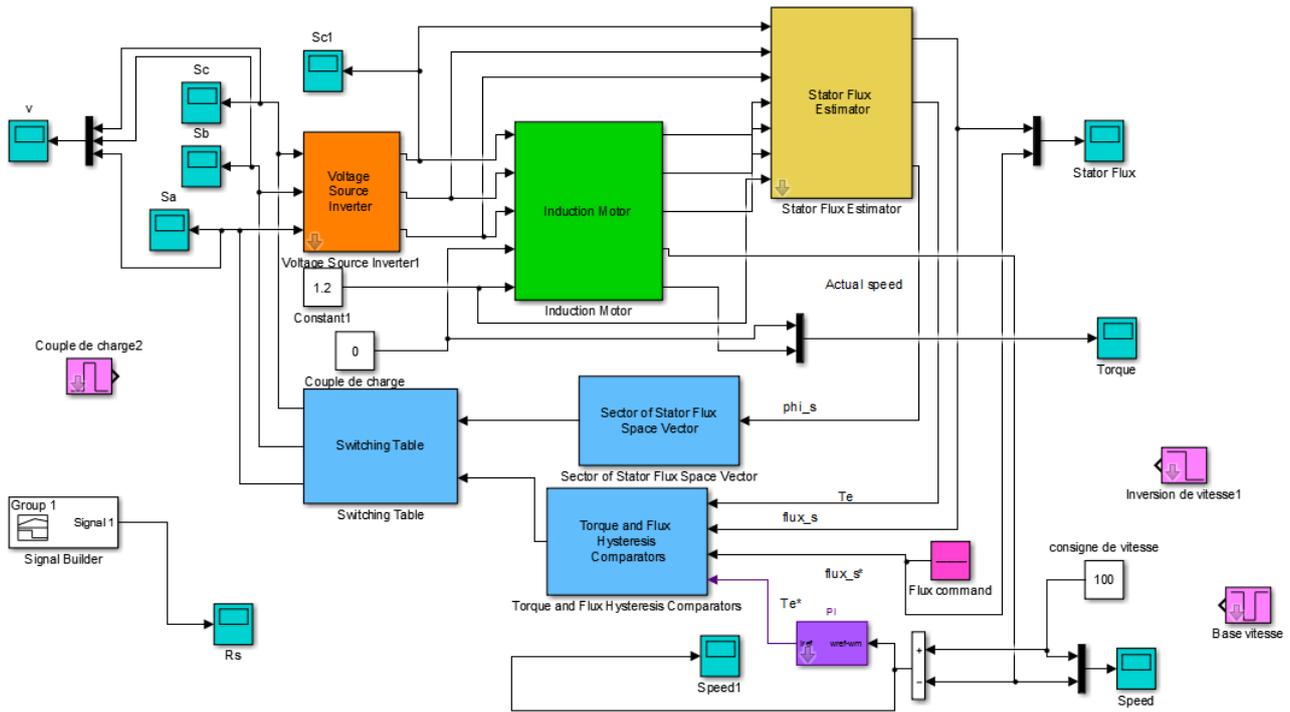
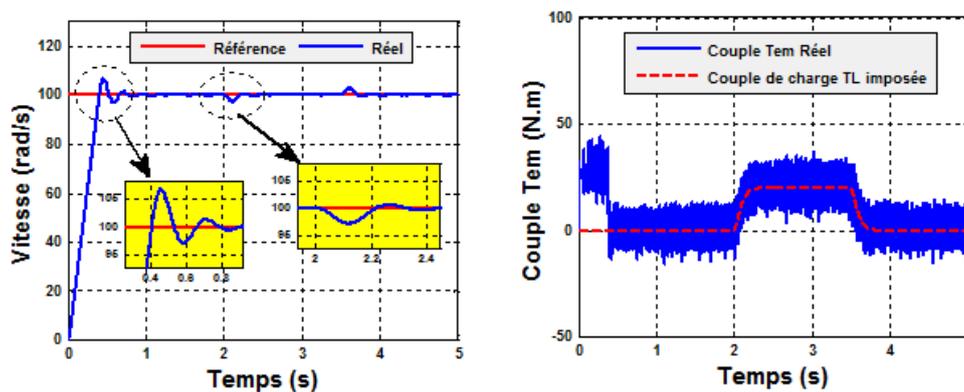


figure :Test de démarrage à vide suivi d'une application du couple de charge



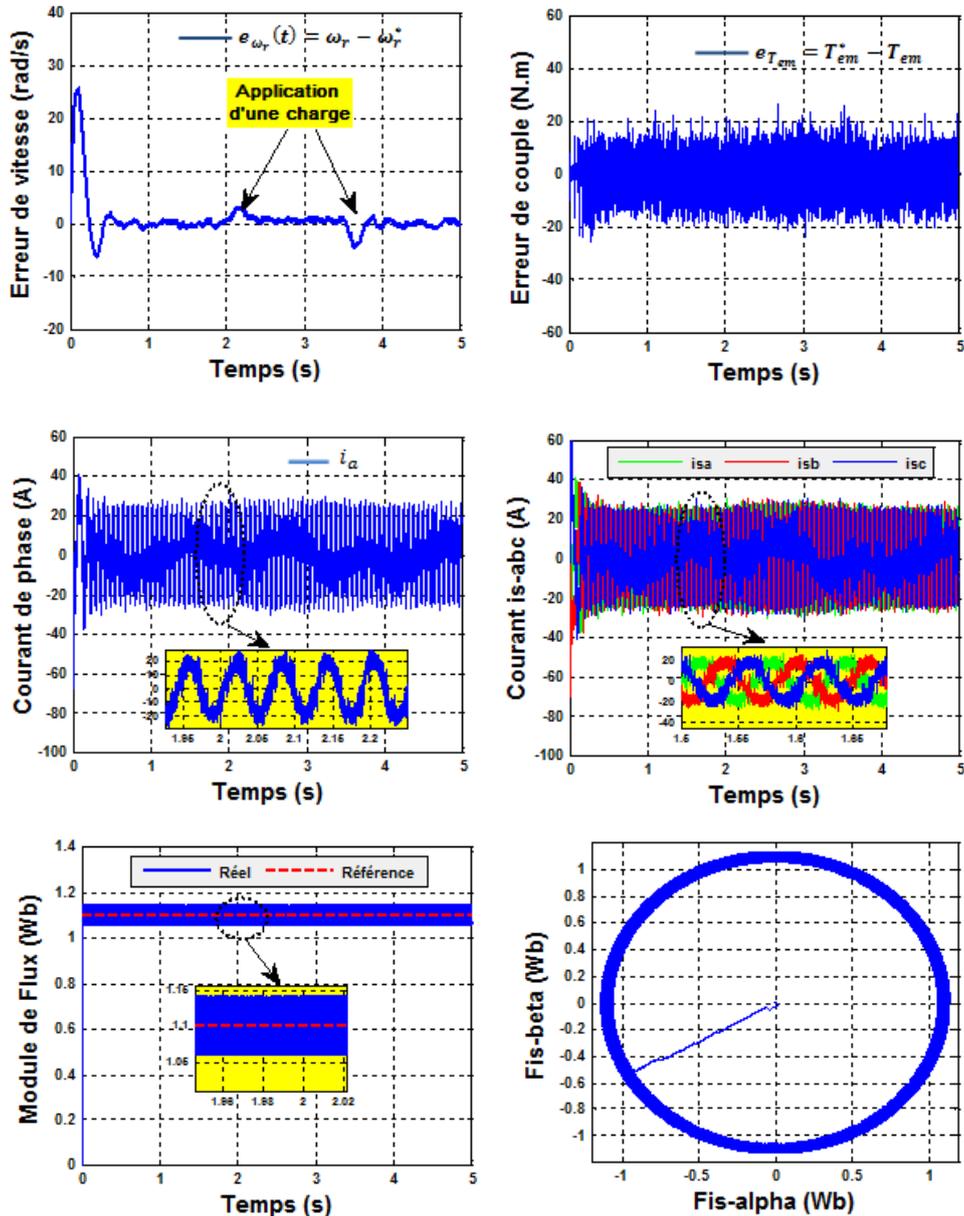


FIGURE 3.9 – Résultats de simulation de la DTC lors du démarrage à vide suivi d’une application d’un couple de charge.

On observe aussi sur la même figure, la réponse de couple électromagnétique réel T_{em} suit parfaitement la valeur de couple de charge imposée et présente un régime transitoire rapide et des oscillations importantes au niveau de son amplitude autour de sa valeur de référence. Ceci constitue un inconvénient majeur de la commande DTC. La réponse de courant statorique présente une allure sinusoïdale bruitée est caractérisé par une forte amplitude au démarrage allant jusqu’à 40A, puis il se stabilise à sa valeur nominale. La réponse de flux statorique illustré dans la Figure 3.9 atteint immédiatement sa valeur de référence de 1.1Wb. La trajectoire du flux statorique est pratiquement circulaire.

3.3.2 Test d’inversion de la vitesse

Afin de tester la robustesse de la commande DTC pour la MAS, vis-à-vis la variation de la référence de la vitesse, on introduit un changement de consigne de vitesse de $100rad/s$ à $-100rad/s$ à l’instant $t = 2s$, et une deuxième inversion à une vitesse de $100rad/s$ à l’instant $t = 4s$.

Nous remarquons d’après les réponses montrées dans la Figure 3.10 que la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse pratiquement le même avec un dépassement égale à 6.2. L’allure du couple et des courants statorique présente des pics lors de l’inversion de la vitesse avant de se stabiliser à la valeur désirée. Au moment de l’inversion de la vitesse, on constate aussi une variation négligeable au niveau de module du flux statorique.

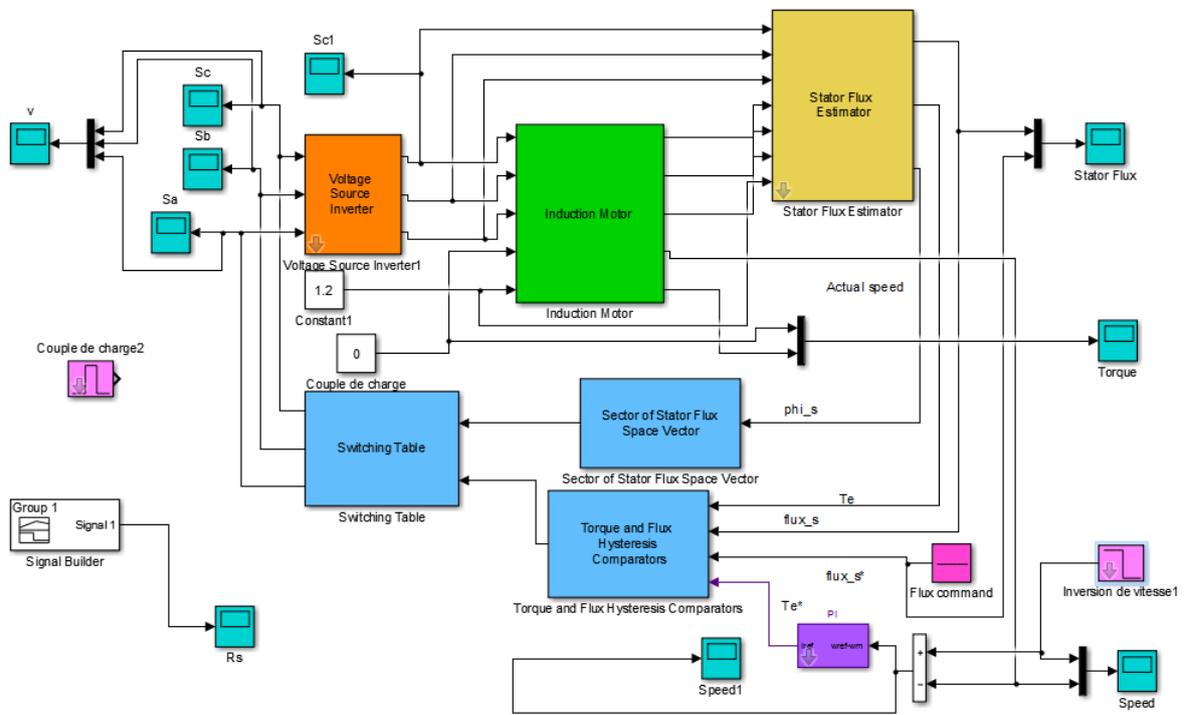
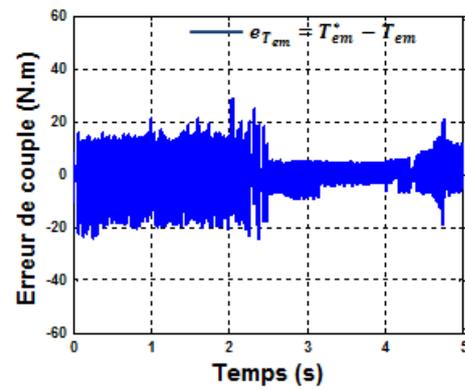
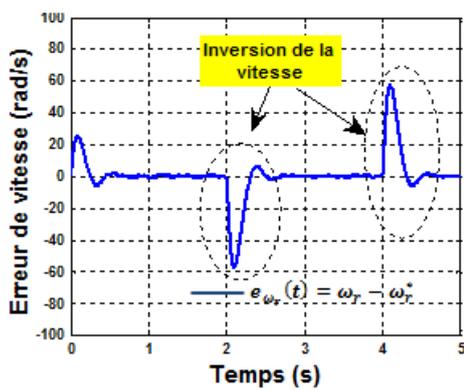
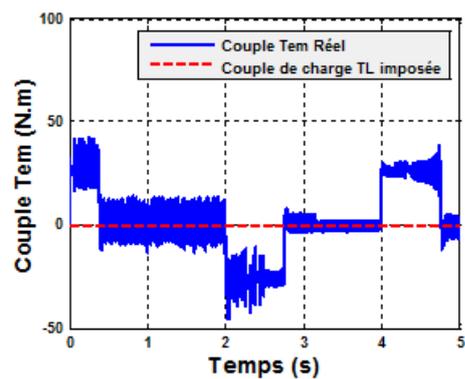
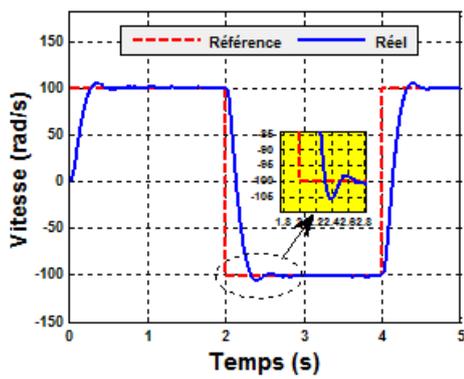


figure :Test d'inversion de la vitesse



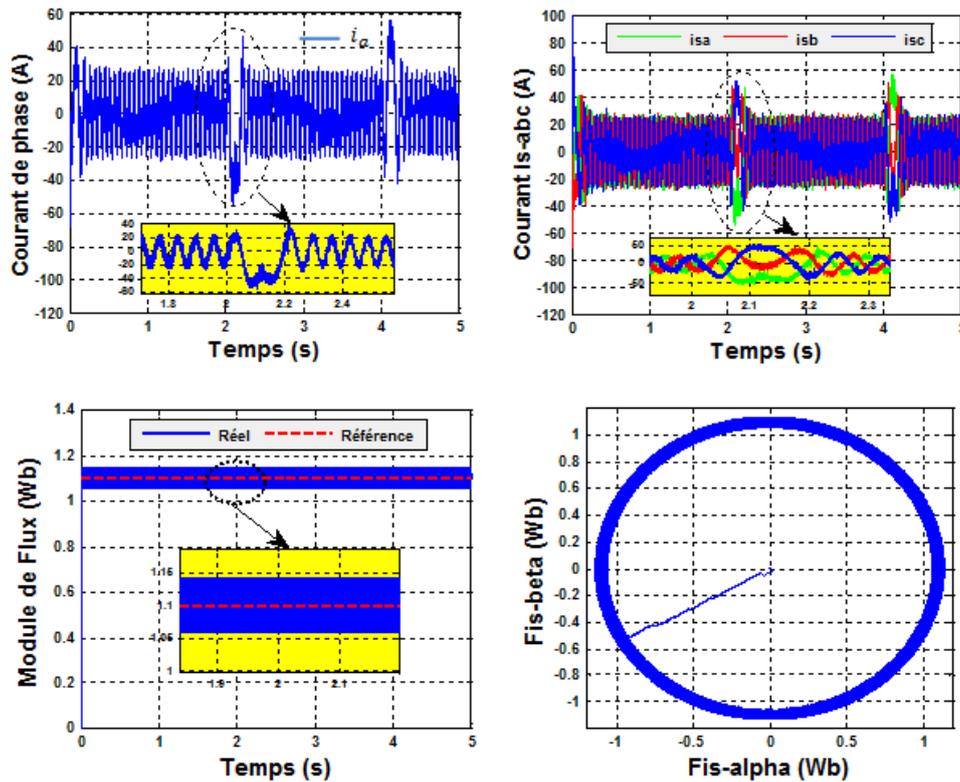


FIGURE 3.10 – Résultats de simulation de la DTC lors de l’inversion de sens de rotation.

3.3.3 Test à basse vitesse

Pour montrer la robustesse de la DTC, on à appliquer une consigne de très faible vitesse avec une variation de 100rad/s à 5rad/s à l’instant $t = 1.5\text{s}$ et une deuxième inversion de 5rad/s à 100rad/s à l’instant $t = 3.5\text{s}$. Les résultats de simulation de cette phase sont présentés dans la Figure 3.11. On remarque pour un fonctionnement à faible vitesse que la vitesse suit parfaitement la référence même au moment d’inversion de vitesse et le découplage des flux est parfaitement assuré, on remarque aussi une oscillation de couple ce qui présente un inconvénient majeur de cette technique de commande.

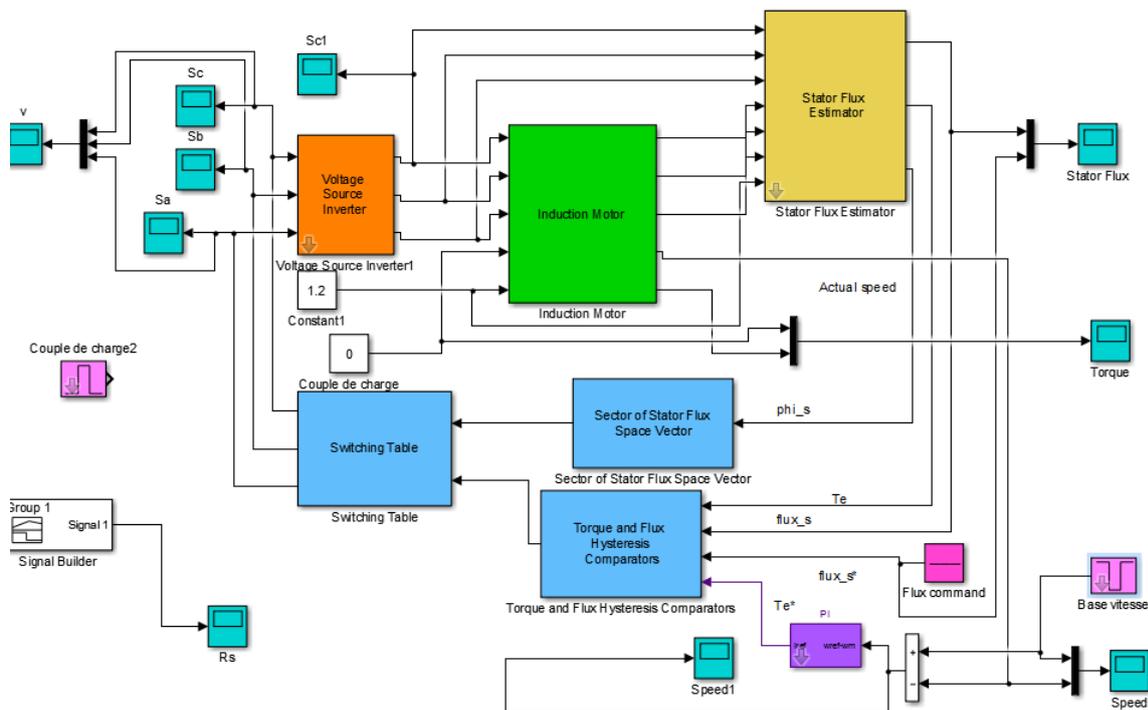


figure : Test à basse vitesse

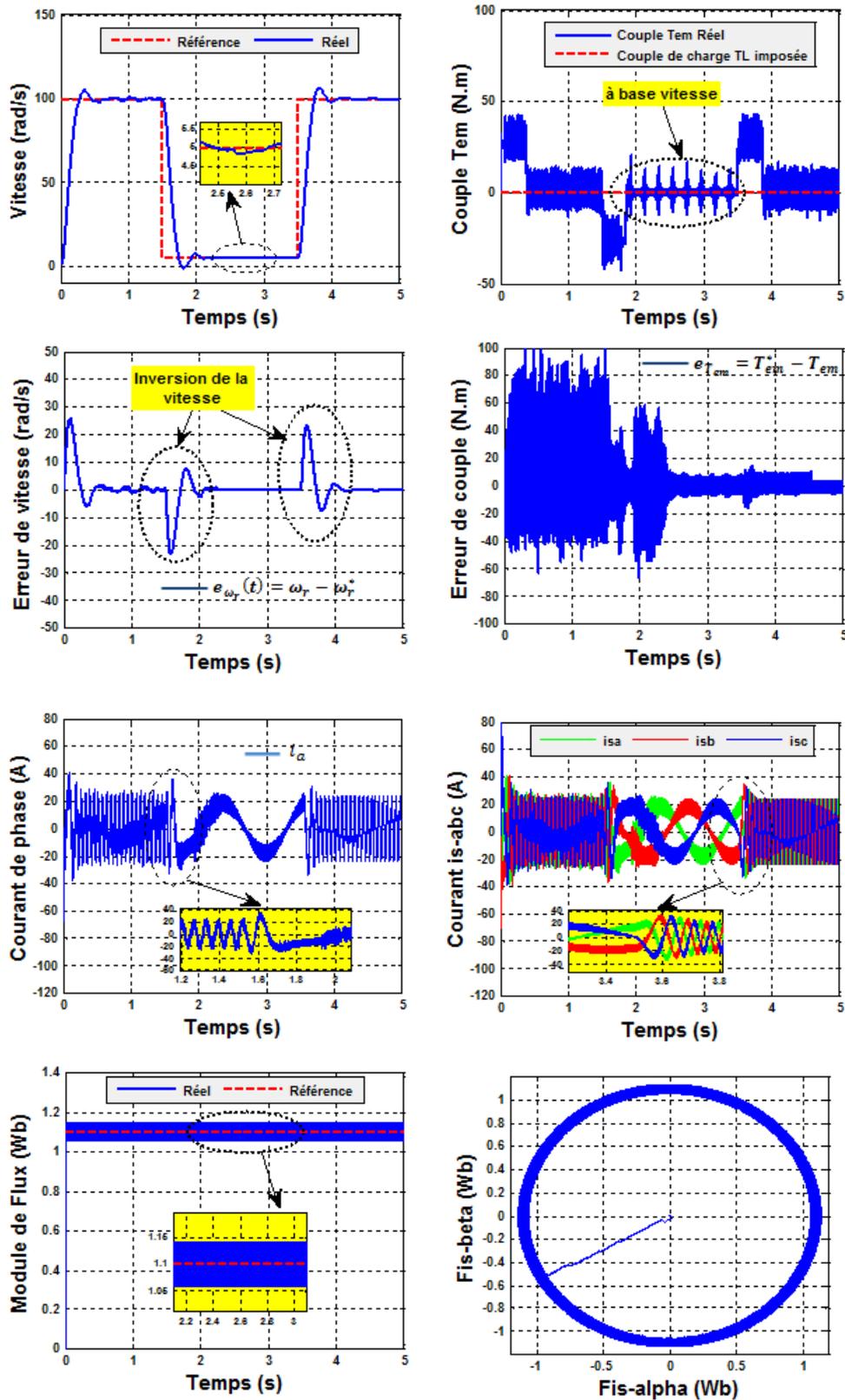


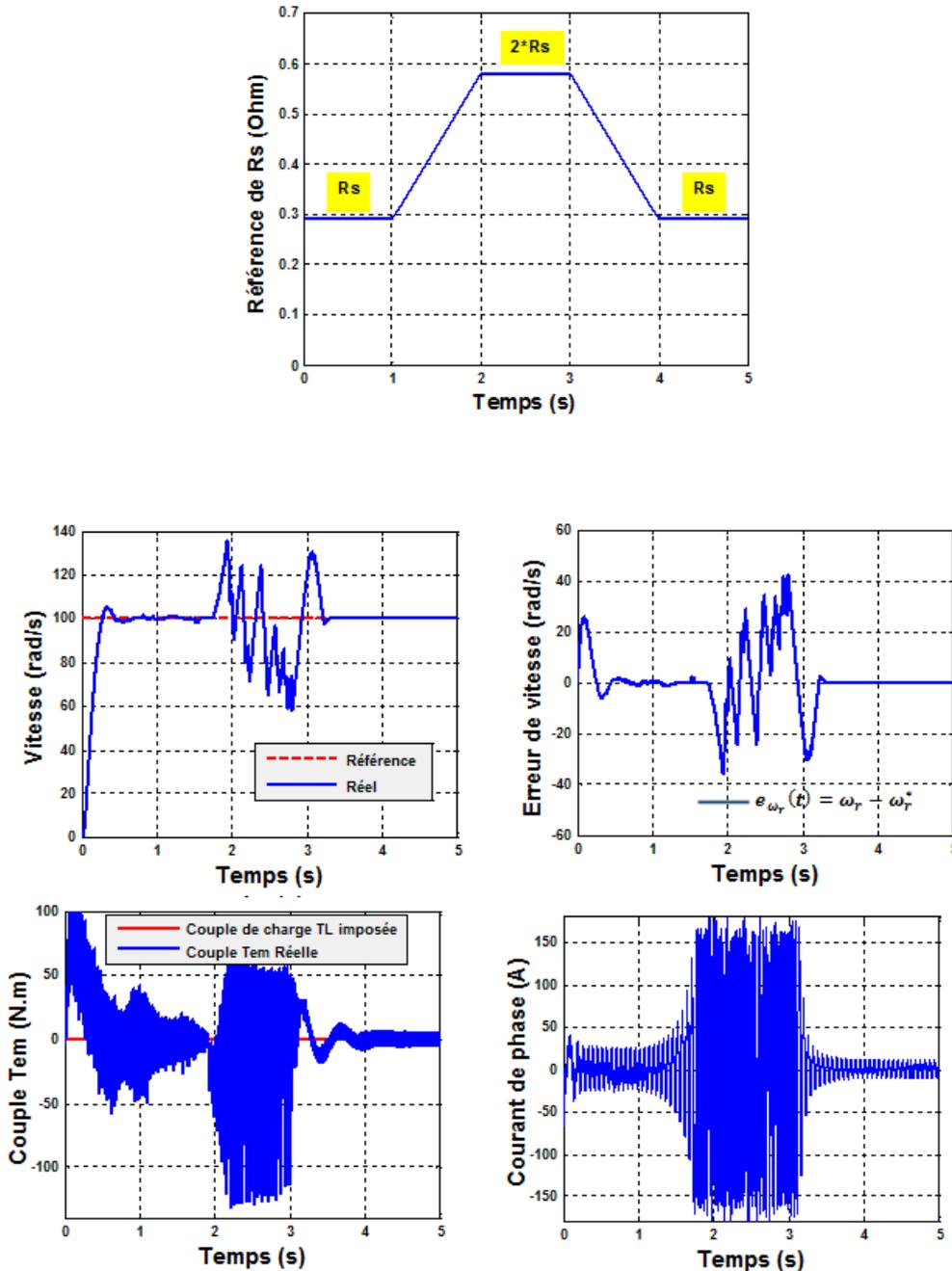
FIGURE 3.11 – Résultats de simulation de la DTC à basses vitesses.

3.3.4 Test de variation de la résistance statorique

Parmi les majeurs inconvénients de la commande DTC on note l'impact des variations de la résistance des enroulements statoriques, qui sont dues principalement aux échauffements de la machine. Les variations de la résistance statorique entraînent des disfonctionnements dans le choix du vecteur tension à appliquer.

Pour étudier l'influence de la résistance statorique R_s sur le comportement de la machine asynchrone lors de la variation des paramètres électriques, nous avons également simulé le système pour une augmentation en rampe de +100% de R_s nominale à l'instant $t = 2s$ et $t = 3s$, comme le montre la Figure 3.12.

La Figure 3.12 illustre l'évolution de la vitesse, du couple, de courant statorique, du module de flux et la trajectoire du flux statorique. Ces courbes, montrent une grande perturbation et une divergence dans l'intervalle de temps où la résistance de stator est au-dessous de sa valeur nominale. L'étude de cette variation excessive de R_s , a pour but d'illustrer les problèmes indésirables qui affectent la commande et qui peuvent détériorer les performances de la DTC.



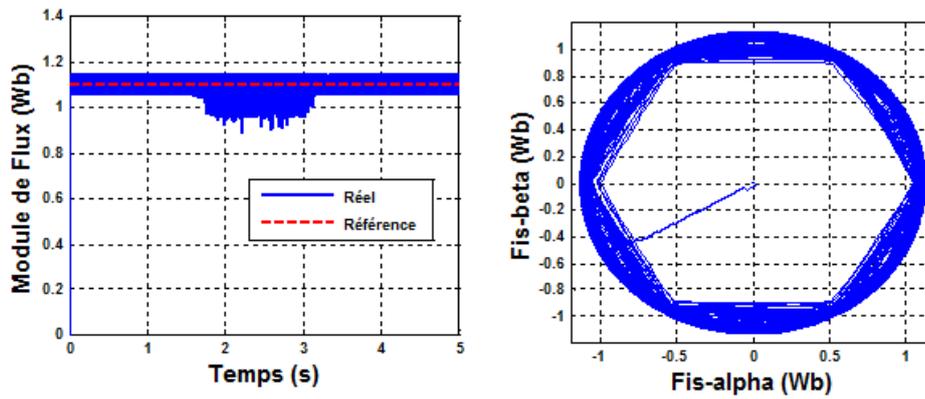
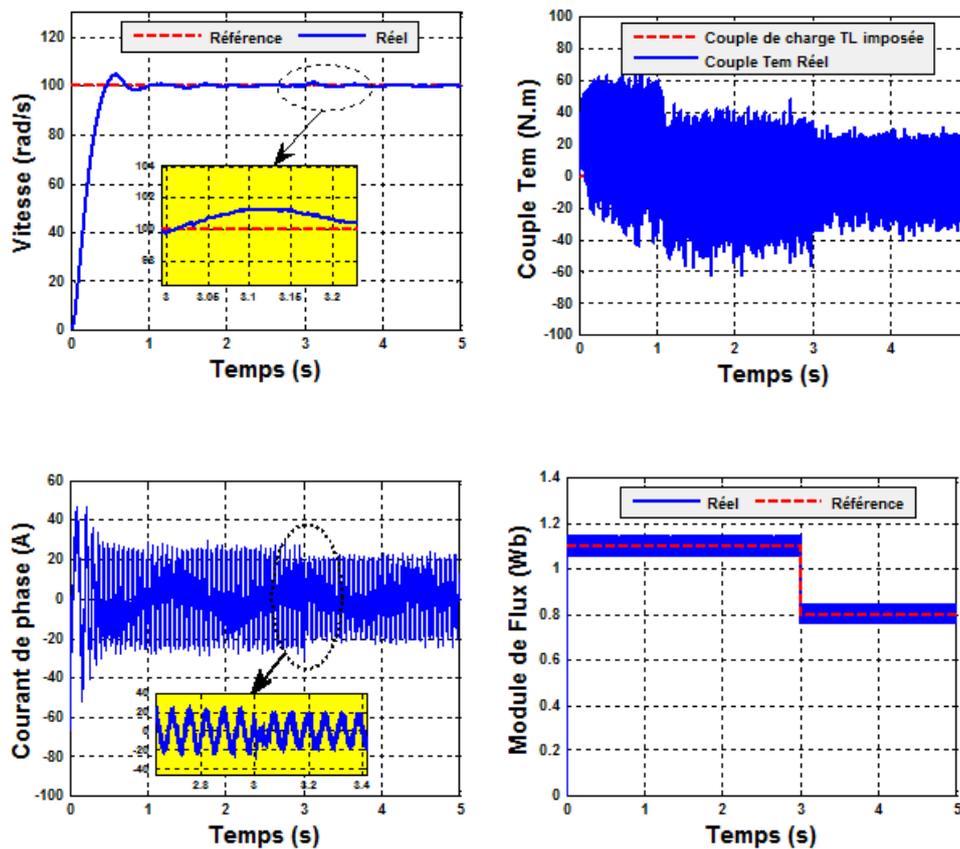


FIGURE 3.12 – Résultats de simulation de la DTC lors de la variation de résistance statorique.

3.3.5 Test d'affaiblissement de flux statorique

Ce test concerne le test d'affaiblissement de flux statorique. Pour réaliser ce test, on a varié la consigne de module de flux statorique φ_s^* de $1.1Wb$ à $0.8Wb$ à l'instant $t = 3s$. Les résultats de simulation sont illustrés par la Figure 3.13. On constate que le flux et la vitesse ne sont pas affectés par la réduction du flux de référence.



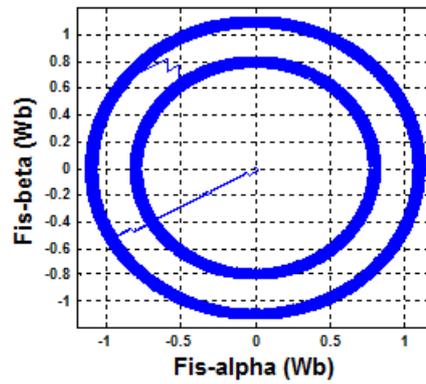


FIGURE 3.13 – Résultats de simulation de la DTC lors d'affaiblissement du flux.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la commande directe du couple (DTC), cette méthode apporte donc une solution concrète aux problèmes de robustesse rencontrée dans les autres structures de contrôle telle que la commande vectorielle à orientation du flux rotorique.

Cette stratégie de commande est insensible aux variations des paramètres rotoriques de la machine, l'estimation de flux ne dépend que de la résistance du stator. En outre, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis, ses derniers engendrent des fluctuations au niveau du couple électromagnétique et du flux statorique qui peuvent provoquer des bruits et par la suite un vieillissement de la machine.

Chapitre 4

Résultats de simulation de structure de contrôle appliquées au véhicule électrique 2WD

4.1 Introduction

Pour mettre en exergue les performances issues des lois de contrôle présentées dans la précédente chapitre, le système de traction par un véhicule électrique à deux roues motrices a été simulé sous l'environnement Matlab/Simulink, et les algorithmes de contrôle ont été testés sous un cycle de conduite règlementaire. On commence par la présentation de structure de contrôle (DTC) du véhicule électrique étudié. Par la suite, nous avons présenté le cycle de conduite utilisée pour évaluer les performances de cette structure pour le VE. Ensuite, on expose les résultats de simulation illustrant la dynamique du véhicule. Enfin, on présente les résultats de la partie source d'énergie.

4.2 Structures de contrôle du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD

La propulsion électrique pour véhicule électrique se conçoit par l'emploi d'un système de contrôle adapté. Dès lors, diverses possibilités d'association convertisseur-machine sont envisageables telles qu'un choix entre type de moteur, type de structure et de stratégie de contrôle du moteur. Dans ce travail, on propose une structure de contrôle du véhicule électrique 2WD basée sur la stratégie de contrôle directe du couple DTC.

La Figure 4.1 présente la structure de contrôle proposée pour la propulsion du véhicule électrique dans lequel deux moteurs à induction commandés par un onduleur de tension directement couplé aux roues arrière propulsent le véhicule. Pour cette structure le contrôle de vitesse est effectué séparément par un régulateur de type proportionnel-intégral (PI) pour calculer les couples de références $T_{em_lr}^*$ et $T_{em_rr}^*$ adéquats nécessaires pour chaque moteur. Le bloc nommé différentiel électronique fournit la différence de vitesse entre les roues motrices lorsque le véhicule effectue un virage, ce qui se traduira par une meilleure stabilité du véhicule sur la trajectoire courbée de la route et dans diverses conditions de freinage. Lorsque l'angle de braquage est égal à zéro ($\delta = 0$), le véhicule électrique roule sur une route droite et le différentiel électronique n'a pas besoin de fonctionner (intervenir). D'autre part, si l'angle de braquage change ($\delta \neq 0$), il indique que le véhicule tourne et le différentiel électronique commence à fonctionner (faire partie du système de contrôle de la vitesse impliquant 2 entraînements). La vitesse de référence du véhicule V_h^* est définie par la commande de la pédale d'accélérateur.

La fonction de transfert en boucle ouverte $G(s)$ liant la vitesse mesurée et le couple électromagnétique estimé pour chaque moteur est donnée par l'équation suivante :

$$G(s) = \frac{\hat{\omega}_{r-ij}(s)}{T_{em-ij}(s)} = \frac{1}{J_{ij}s + b_{ij}} \quad (4.1)$$

avec $ij = lr, rr$

lr, rr : Définissent respectivement les roues- moteurs arrière gauche et arrière droite.

La fonction de Transfer en boucle fermé

$$F(s) = \frac{k_p s + k_i}{J_{ij}s^2 + (k_p + k_{ij})s + k_i} \quad (4.2)$$

Le dénominateur de l'équation (4.2) peut réécrite par :

$$s^2 + \frac{(k_p + b_{ij})}{J_{ij}} s + \frac{k_i}{J_{ij}} \tag{4.3}$$

Par identification de l'équation (4.3) par un système de 2ème ordre, on obtient la pulsation ω_n et le coefficient d'amortissement ξ par

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J_{ij}}}, \xi = \frac{K_p + b_{ij}}{2\sqrt{K_i J_{ij}}} \tag{4.4}$$

Donc, les gains k_p et k_i sont données par

$$K_i = \omega_n^2 J_{ij} \text{ et } K_p = 2\xi\omega_n J_{ij} - b_{ij} \tag{4.5}$$

Finalement, la loi de commande par un régulateur de vitesse de type PI pour chaque roue-moteur est donnée par [44] :

$$T_{em-ij}^* = K_p (\omega_{r-ij}^* - \hat{\omega}_{r-ij}) + K_i \int_{t_0}^t (\omega_{r-ij}^* - \hat{\omega}_{r-ij}) dt \tag{4.6}$$

La structure de régulation de la vitesse pour chaque roue-moteur par la boucle externe en utilisant le régulateur PI est illustrée par la Figure 4.2.

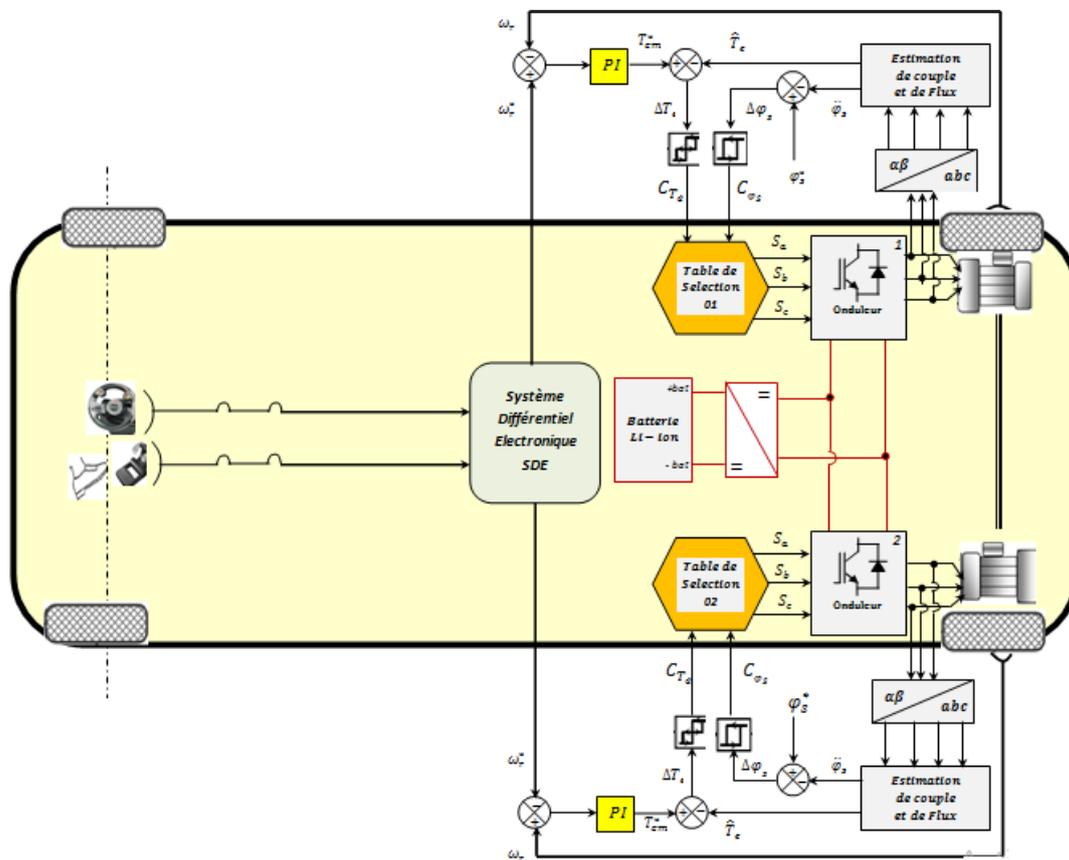


FIGURE 4.1 – structure de contrôle de véhicule électrique à deux roues motrices 2WD.

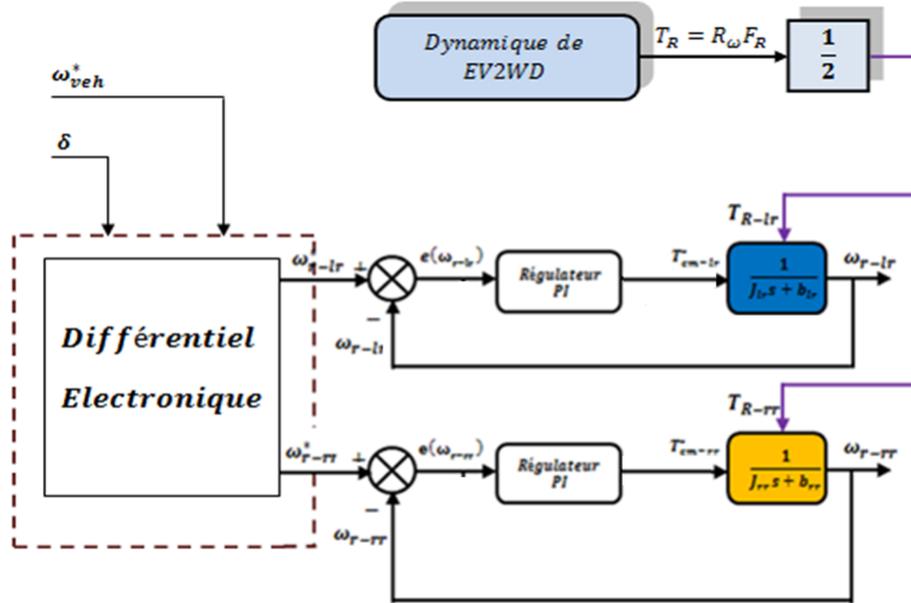


FIGURE 4.2 – Configuration générale de la stratégie de contrôle de vitesse des deux roues-moteur.

4.3 Cycle de vitesse pour le véhicule électrique 2WD

Par définition, un cycle de vitesse donne la vitesse du véhicule en fonction du temps au cours d'un trajet particulier. Il dépend à la fois des conditions de la route et du style de conduite. Les cycles de vitesse normalisés, comme par exemple le cycle FTP (Federal Test Procédure), utilisé aux Etats-Unis ainsi que de nombreux pays d'Amérique latine, le cycle NEDC (New European Driving Cycle) sont des cycles de vitesse construits dans le but de représenter des conditions de route particulières caractérisées par le type de route, c'est-à-dire l'environnement de conduite (ville, autoroute, route de campagne, ...), les conditions de trafic et la densité des infrastructures de signalisation routière. Ces cycles sont couramment utilisés dans l'industrie automobile afin d'effectuer des tests sur le dynamomètre de manière à estimer les émissions et la consommation des véhicules. Ces cycles de conduite présentent l'inconvénient d'être peut long, le NEDC il est constitué d'accélération et de décélérations en palier à vitesse moyenne de 33,6km/h sur une durée de 20 minutes (1200 Sec) [59] (Figure 0.1 en annexe) en parcourant une distance d'environ 11 km. Ce qui augmente le temps de simulation du système de traction complet. Afin de remédier à ce problème. Dans ce mémoire, nous avons choisi un cycle de vitesse relativement court qui représente fidèlement les conditions de route rencontrées en milieu urbain, et conditions de route rencontrées sur voie rapide. Selon un schéma bien défini sur une durée de 40 s.

La Figure 4.3 représente le profil de vitesse du cycle proposé qui a été utilisé pour faire l'analyse. Cette trajectoire est définie par neuf phases successives. Dans la première, le véhicule roule sur une route droite avec une vitesse de 50km/h, dans la deuxième phase un virage vers la droite est imposé au véhicule par une consigne de l'angle de braquage ($\delta = 25^\circ$) comme elle est illustrée dans la Figure 4.4, dans la troisième phase, le VE2WD se déplace sur une route droite, à la même vitesse, pour la quatrième phase un virage vers la gauche est imposé au véhicule avec un angle de braquage ($\delta = -15^\circ$). La cinquième phase, le véhicule roule sur une route droite avec une vitesse de 30Km/h. Dans la sixième phase, le VE2WD monte une route inclinée d'un angle de 10° (pente) avec une vitesse de 80Km/h (phase d'accélération) et dans la septième phase le véhicule roule sur une route droite avec une vitesse constante de 80Km/h. Pour la huitième phase, le véhicule est conduit sur une route en descente de -10° (route avec une pente négative). Enfin la dernière (09) présente la phase de décélération où la vitesse du véhicule décroît linéairement jusqu'à atteindre une vitesse de 5Km/h. Les contraintes de la route sont présentées dans le Tableau 4.1. Et les consignes de vitesses sont représentées selon la loi de la Figure 4.5, et développent des accélérations en conséquence.

TABLE 4.1 – Spécifications de cycle de vitesse proposé.

phase	Temps [Sec]	Evènement	Vitesse du véhicule [Km/h]
01	$0 \leq t \leq 5$	Démarrage	50
02	$5 \leq t \leq 10$	Route courbé à droite	30
03	$10 \leq t \leq 15$	Route plate	30
04	$15 \leq t \leq 17$	Route courbé à gauche	30
05	$17 \leq t \leq 22,5$	Route plate	30
06	$22,5 \leq t \leq 28$	Accélération+ Route en pente de 10%	80
07	$28 \leq t \leq 31$	Accélération+ Route plate	80
08	$31 \leq t \leq 35$	Accélération+ Route en pente de -10%	80
09	$35 \leq t \leq 40$	Décélération sur route plate	5

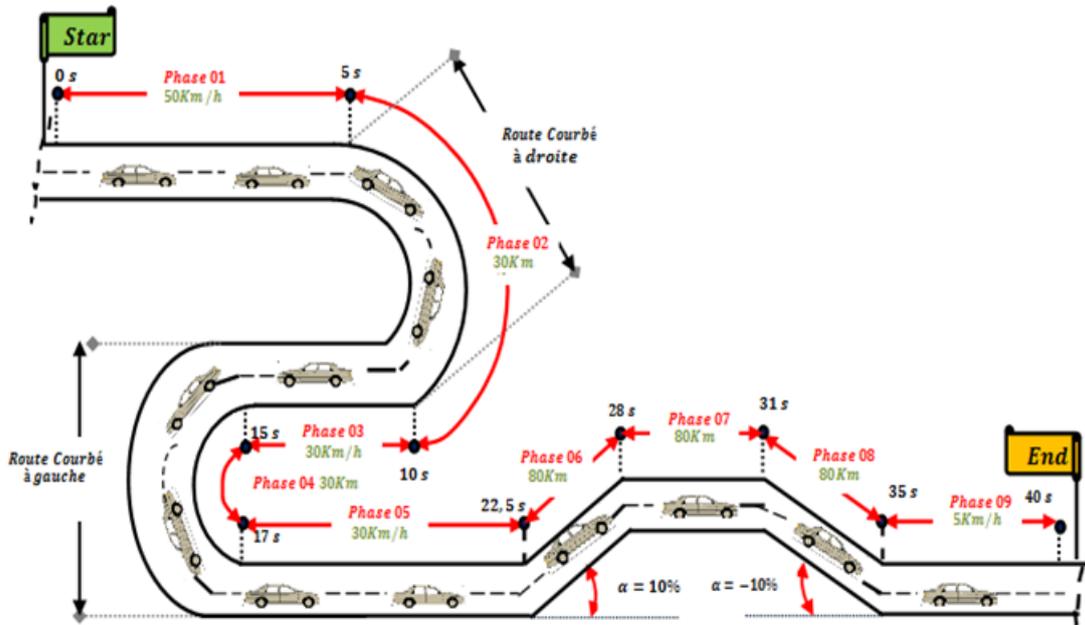


FIGURE 4.3 – Cycle de conduite proposé pour l'EV2WD.

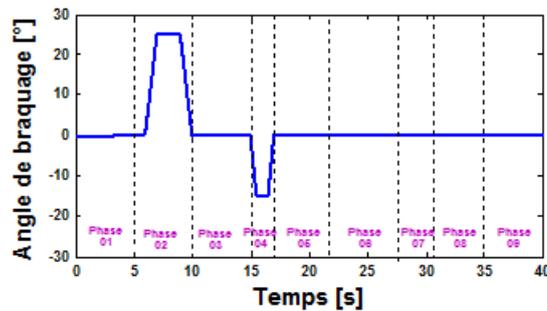


FIGURE 4.4 – Angle de braquage imposé.

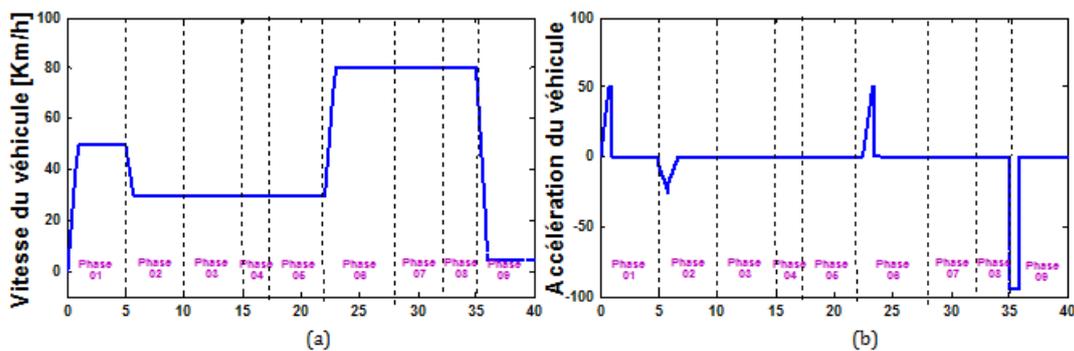


FIGURE 4.5 – Courbe de la vitesse de consigne en fonction du temps (a), et accélération subie (b).

4.4 Résultats de simulations

Dans cette section, plusieurs simulations sont effectuées sur le modèle du véhicule électrique à deux roues motrices EV2WD présenté par la Figure 4.1 sous différentes contraintes de la route. L'objectif de ces simulations est l'évaluation des performances de la stratégie de contrôle directe du couple de la MAS proposée. Les résultats de simulations sont divisés en deux phases : les résultats de la partie propulsion, et simulation de la partie source d'alimentation.

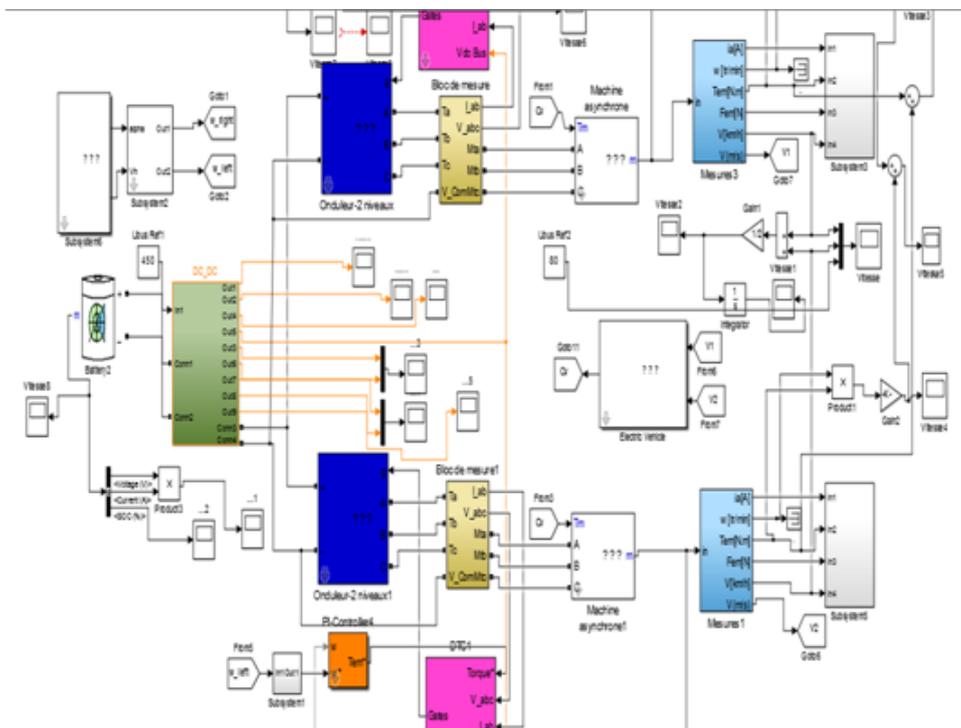


figure : bloc de simulation global EV2WD .

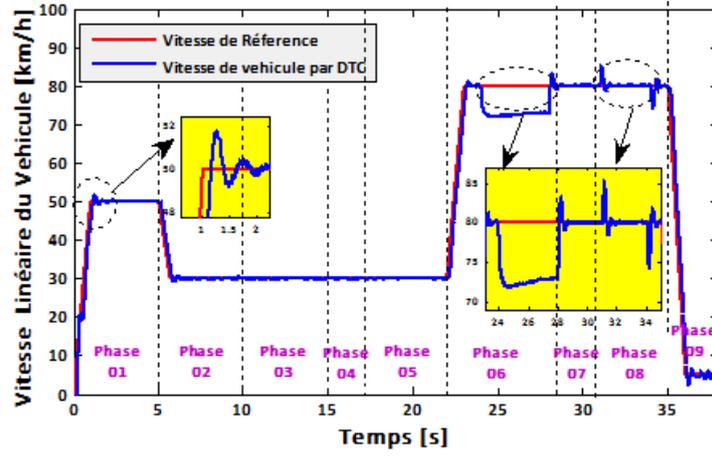
4.4.1 Résultats de la partie propulsion

Dynamique du véhicule électrique 2WD et commande des moteurs de propulsion

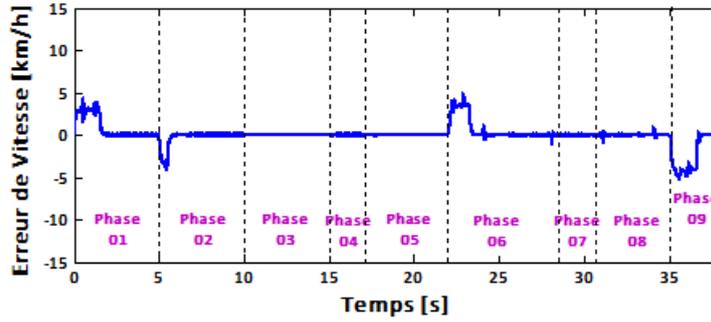
La Figure 4.6 présente les résultats de simulation de la vitesse linéaire du véhicule électrique par l'utilisation de structure de commande proposée pour la propulsion électrique (DTC classique). On remarque que la vitesse réelle du véhicule (V_{veh}) suit bien la vitesse de référence (V_{veh*}) donnée par le conducteur avec un temps de convergence assez rapide en moins de seconde (0.102s) et dépassement de 2Km/h (2%) et une erreur statique nulle. Le Tableau 4.2 résume les performances dynamique et statique .on peut observer sur la même figure que la vitesse du véhicule est diminuée d'environ de 10Km/h de sa valeur de référence lorsque le véhicule monte sur une route en pente de 10% (phase 06). L'erreur de vitesse est au voisinage de zéro, elle est égale à 9,2Km/h. On peut remarquer aussi, une légère fluctuation au niveau de la réponse de vitesse lorsque le véhicule se trouve dans la phase de décélération (faible vitesse phase 09).

TABLE 4.2 – Performances de la réponse de vitesse par DTC .

Stratégie de contrôle	Dépassement [%]	Erreur statique [Km/s]	Temps de monté [sec]
DTC	2	0	0,102



(a)



(b)

FIGURE 4.6 – Vitesse linéaire du véhicule électrique 2WD (a), Erreur de vitesse (b).

Ainsi, la vitesse linéaire de propulsion du véhicule V_{veh} est exprimé par :

$$V_{veh} = \frac{1}{2} (\omega_{r_lr} + \omega_{r_rr}) \times \frac{R_w}{N_{red}} \quad (4.7)$$

La Figure 4.7 montre les vitesses linéaires des roues motrices du véhicule 2WD par l'utilisation de stratégie de contrôle DTC. Un bon suivi de la vitesse linéaire des roues motrices du véhicule peut être observé. La vitesse des roues motrice du véhicule commence à zéro jusqu'à la vitesse de référence de 50Km/h (correspond à une vitesse de 16m/s figure 4.6 phase 01) imposé par le conducteur, à l'instant $t = 5\text{s}$ la vitesse du véhicule est réduite à 30Km/h ($9,6\text{m/s}$), elle est toujours maintenue à cette valeur environ $17,5\text{s}$. A ce point de fonctionnement, deux virages, l'un à droite (phase 02) et l'autre à gauche (phase 04), sont imposées au châssis du véhicule par l'angle de braquage. On suppose que les virages soient effectués à une vitesse constante, le conducteur donne un angle de braquage qui commence à être un angle de braquage des roues directrices (roues avant). Le différentiel électronique agit immédiatement sur les deux moteurs simultanément, en diminuant la vitesse de la roue située à l'intérieur du virage, au contraire de celle située à l'extérieur du virage. A ce moment-là, les vitesses des roues motrices changent de valeur. Lors de la première manœuvre de direction (virage à droite), la roue arrière gauche (lr) située à l'extérieur de virage tourne avec vitesse supérieur à celle de la roue motrice arrière droite (rr) située à l'intérieur de virage. Le Tableau 4.3 présente les valeurs de vitesse de chaque roue motrice lorsque le véhicule est situé dans la courbure de virage.

D'autre part, nous pouvons remarquer que la roue motrice arrière droite (rr) tourne avec une vitesse supérieure à celle de la roue motrice arrière gauche (lr) lors de la deuxième direction (virage à gauche phase 04) (Figure 4.7). Après cela, en appuyant d'avantage sur l'accélérateur, le conducteur augmente la vitesse du véhicule à l'instant $t = 22,5\text{s}$ jusqu'à atteindre une vitesse de référence de 80Km/h est maintenue constant, pendant une période de $13,5\text{s}$. Dans cet essai, nous avons subi notre système de propulsion électrique à différents type de pente $\alpha_p = 10\%$ (phase 06) et $\alpha_p = -10\%$ (phase 08). Nous pouvons constater une diminution de vitesse de l'ordre de 10Km/h ($3,2\text{m/s}$) de la vitesse de référence des roues motrices avant et arrière lorsque le véhicule monte sur une route en pente (phase 06). On remarque aussi des pics importants au niveau des réponses lorsqu' on monte sur route en pente inversé de -10% (phase 06). A $t = 35\text{sec}$, on impose une faible vitesse de 5km/h (phase de décélération du véhicule). On observe un dépassement et des oscillations autour de la vitesse de référence. Le passage de la première consigne de vitesse (80Km/h) à la deuxième consigne (5km/h) se fait en 1.2sec , ce qui permet au véhicule de mieux s'intégrer dans la circulation sans difficultés. Les deux roues motrices gardent le même comportement dynamique et ils tournent avec des vitesses presque identiques comme illustrées par les Figures 4.7.

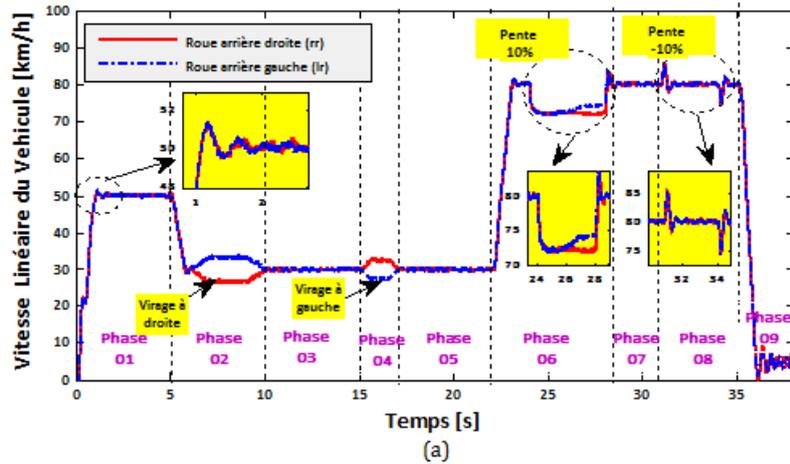


FIGURE 4.7 – Vitesse linéaire des roues du véhicule électrique 2WD en utilisant la DTC.

TABLE 4.3 – Valeur de vitesse des roues motrices pour la phase 02 et 04.

Vitesse des roues (Km/h)	Phase 02	Phase 04
Roue arrière droite (rr)	26,84	32,64
Roue arrière gauche (lr)	33,83	27,54

L'évolution du couple électromagnétique développé par les deux moteurs (MAS) de propulsion du véhicule électrique 2WD est donnée en Figure 4.8, en tenant compte des changements de la position de la pédale d'accélération et du volant, selon le profil de la route proposée dans le paragraphe 4.3, à partir des résultats de simulation, on peut observer un couple élevé au démarrage, les moteurs doivent développer un couple électromagnétique élevé depuis le démarrage jusqu'au moment où la vitesse des roues se stabilise et atteint sa référence. On peut aussi remarquer une variation sur les réponses du couple suite à la trajectoire entamée par le conducteur (suite au changement de vitesse du véhicule). Quand le véhicule passe par une route courbé à droite (phase 02) les couples électromagnétiques développée par le moteur arrière gauche (lr) est plus élevée que ce de moteur arrière droite (rr), mais lors du deuxième virage (virage à gauche phase 04), l'inverse est vérifié comme le montre clairement la Figure 4.8. Le couple de moteur extérieurs est supérieur à celle de moteur interne. Suite à une montée d'une pente de 10% à l'instant $t = 28sec$ (phase 06) et sous l'effet du poids du véhicule, un couple additionnel constant apparaît. Les résultats obtenus illustrent clairement les ondulations du couple. Le Tableau 4.4 de couple électromagnétique de chaque moteur durant tout le cycle de conduite.

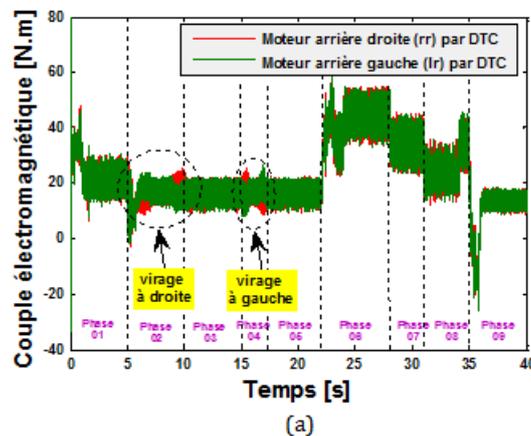


FIGURE 4.8 – Réponse de couple électromagnétique développée par les moteurs de VE en utilisant la commande DTC.

TABLE 4.4 – Valeur de couple électromagnétique de chaque moteur durant tout le cycle de conduite.

Couple électromagnétique des moteurs	Phase 01	Phase 02	Phase 03	Phase 04	Phase 05	Phase 06	Phase 07	Phase 08	Phase 09
Moteur <i>lr</i>	29,42	32,5	22,04	12,24	22,04	53,15	44,64	14,82	18,52
Moteur <i>rr</i>	29,42	8.05	22,04	25,14	22,04	53,15	44,64	14,82	18,52

La variation du courant de phase appelé par chaque moteur (MAS) est représentée en Figure 4.9. Suivant la trajectoire appliquée au véhicule (changement de consigne de vitesse), chaque moteur sollicite un fort appel de courant pour atteindre la vitesse de référence imposée par le conducteur. A l’instant $t = 28sec$, où le véhicule se situés dans une route en pente de 10% (phase 06). Dans cet intervalle, chaque moteur doit développer un courant supplémentaire afin de vaincre cette variation de topologie routière. En outre, on peut voir qu’avec l’utilisation de stratégie de contrôle DTC, l’allure des courants statorique décrit une trajectoire sinusoïdale ondulée.

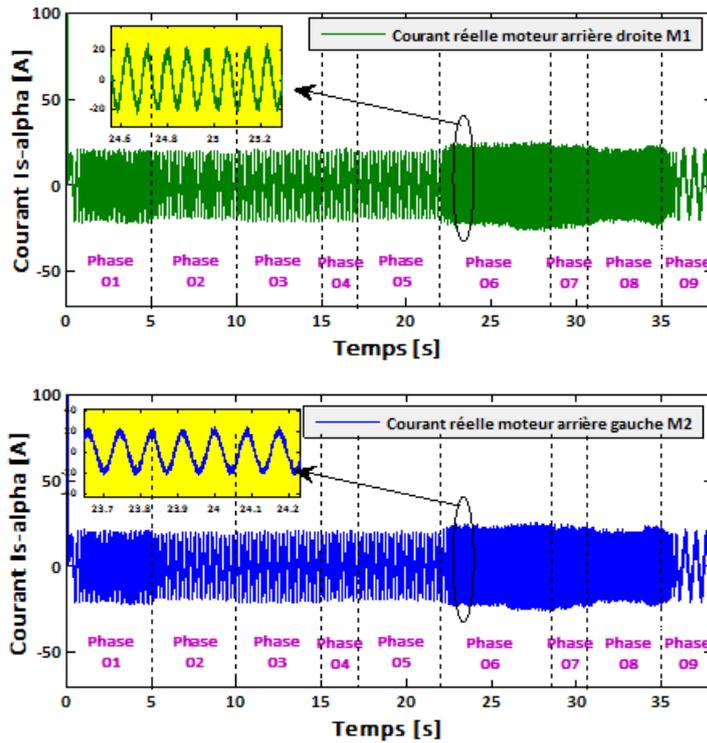


FIGURE 4.9 – Allure de courant statorique appelé par les moteurs en utilisant la DTC.

La Figure 4.10 donne la trajectoire du vecteur flux statorique dans le plan $(\alpha - \beta)$ lié au stator pour le moteur arrière droite (*rr*). On peut voir que la trajectoire de l’extrémité du flux statorique prend une forme circulaire d’un rayon égale à $1.1Wb$ centré à l’origine mais présente une petite déformation de la trajectoire d’extrémité du flux liée à l’utilisation des régulateurs hystérésis et la table de commutation.

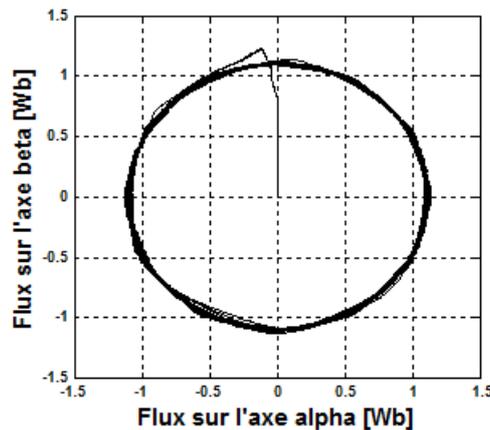


FIGURE 4.10 – Trajectoire de flux statorique dans le plan $(\alpha - \beta)$ de moteur arrière droite (*rr*) .

On présente sur la Figure 4.11 les forces de traction générées par les roues motrices arrière. Premièrement, on remarque que des forces de traction élevées sont fournies par les moteurs pour déplacer le véhicule de démarrage vers l'arrêt. Ce phénomène semble logique puisque ces forces doivent vaincre les forces résistance globale au mouvement du véhicule. De plus, nous pouvons également signaler un écart entre les forces de traction pendant le mouvement dans le virage (phase 02 et 04). En effet, les moteurs situés dans la courbure du virage produisent des forces de traction plus faibles que celles des moteurs situés en dehors de la courbure du virage. On observe aussi des fortes oscillations dans les courbes des forces de traction.

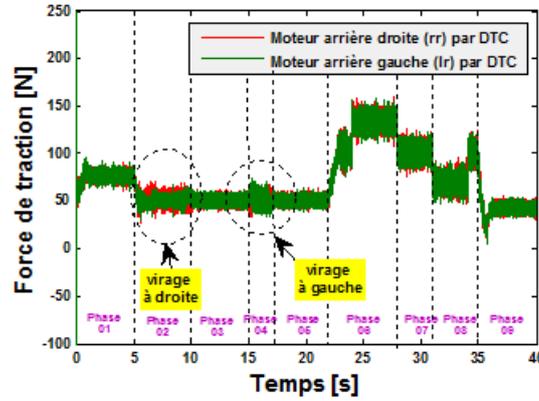


FIGURE 4.11 – Force de traction développée par les moteurs du véhicule.

Les couples résistants à l'avancement du véhicule sont illustrés dans la Figure 4.12. La valeur du couple aérodynamique par l'utilisation de la commande DTC est importante (elle est de l'ordre de $29 Nm$ pour la phase 01). De plus, on peut noter que la valeur du couple aérodynamique est de $60 Nm$ à l'instant de du passage du véhicule par la pente de 10% (phase 06). Ceci est dû principalement par l'éloignement de vitesse de sa référence.

La Figure 4.13 présente l'allure du couple résistant total du véhicule. On peut remarquer que la valeur de du couple résistant T_R varie en fonction de la topologie routière. Cependant, une petite augmentation de du couple résistance est observée dans la phase 06. Le Tableau 4.5 montre la quantité de la variation des couples résistants au roulement du véhicule.

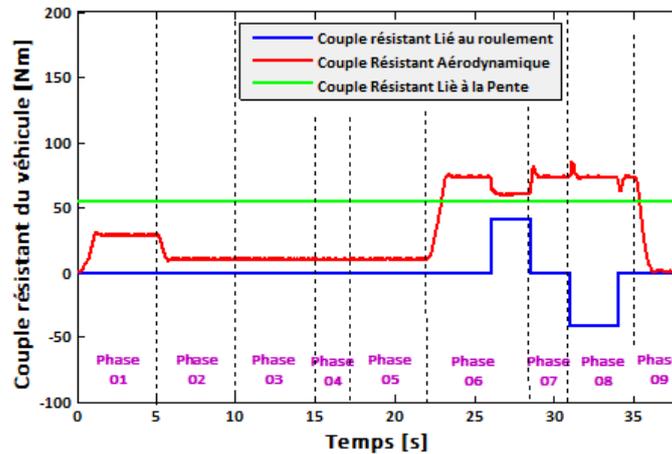


FIGURE 4.12 – Evolution des couples résistants du véhicule en utilisant la DTC.

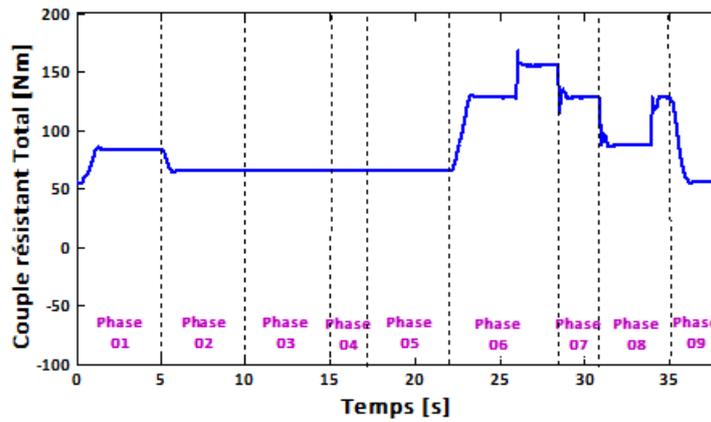


FIGURE 4.13 – Evolution de couple résistance au roulement total du véhicule en utilisant la DTC.

TABLE 4.5 – Variation des couples résistants au roulement du VE2WD durant le cycle de conduite.

Phase	Couple aérodynamique (Nm)	Couple résistant total (Nm)	Couple lié à la pente	Couple lié au roulement (Nm)
			DTC	DTC
01	28,82	83,12	00	égale à 54,27 durant le cycle de conduite pour les deux structures de contrôle
02	10,45	64,68	00	
03	10,45	64,68	00	
04	10,45	64,68	00	
05	10,45	64,68	00	
06	72,51	156,42	40,81	
07	61,72	127,72	00	
08	73,54	87,24	-40,81	
09	0,4	54,73	00	

4.4.2 Résultats de la partie source d'énergie (Batterie Li-ion)

Afin d'évaluer l'efficacité de la stratégie de contrôle DTC pour le moteur (MAS) sur les performances du système de stockage d'énergie par batterie Li-ion utilisé comme source d'énergie principale pour la propulsion du véhicule électrique 2WD, des tests de simulations ont été effectués à l'aide de Matlab/Simulink. On soumet le même cycle de conduite décrit dans la section 4.3 avec un état de charge initial de la batterie égale à 75%. Afin d'observer les différentes caractéristiques de la batterie (SoC, variation de puissance, tension et courant...).

La Figure 4.14 présente la variation de la distance traversée par le véhicule électrique pour cette stratégie de contrôle. On peut voir que la distance parcourue par le véhicule sur tout le cycle de conduite est de 1819m le Tableau 4.6, montre la distance traversé par le véhicule pour chaque phase.

TABLE 4.6 – Variation de la distance parcourue par le véhicule durant le cycle de conduite.

Distance parcourue par le véhicule (m)	Phase 01	Phase 02	Phase 03	Phase 04	Phase 05	Phase 06	Phase 07	Phase 08	Phase 09
DTC	221,5	158,5	150	60	170	431	240	320	68

La Figure 4.15 montre la variation de l'état de charge de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite. On observe que le SoC diminue rapidement dans la phase d'accélération et la phase où le véhicule aborde une pente de 10%. A la fin du temps d'arrêt de 40 secondes, le SoC de la batterie est de l'ordre de 73.6% (avec une diminution de 1.39% par rapport à l'état initial de 75%). Le Tableau 4.7 récapitule le SoC de la batterie de chaque phase de cycle de conduite.

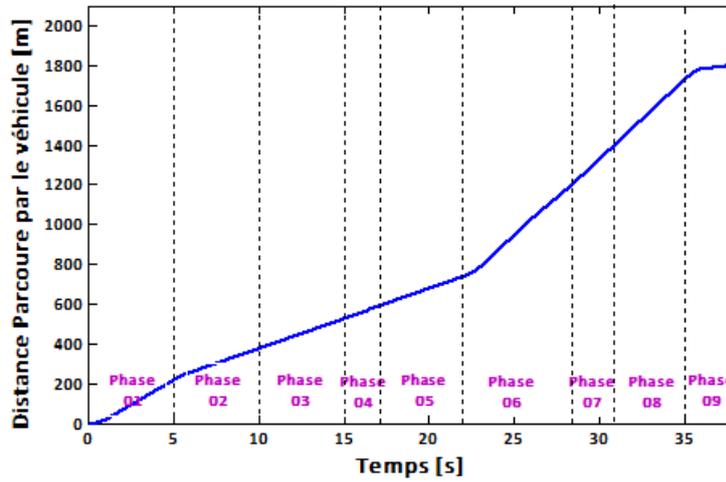


FIGURE 4.14 – Variation de la distance parcourue par le véhicule électrique 2WD durant le cycle de conduite.

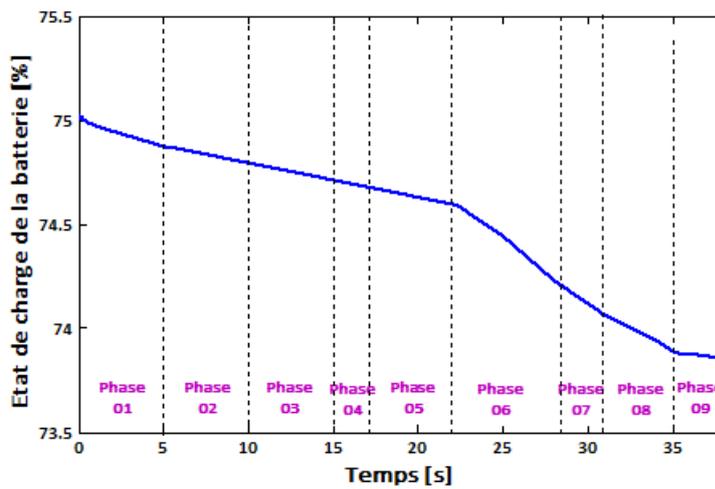


FIGURE 4.15 – Variation de l'état de charge (SoC) de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.

TABLE 4.7 – Variation de l'état de charge (SoC) de la Batterie durant le cycle de conduite.

Phase	Début de phase [s]	Fin de phase [s]	DTC		Différence SoC [%]
			SoC [%] Début de phase	SoC [%] Fin de phase	
01	0	5	75	74,85	0,15
02	5	10	74,85	74,76	0,09
03	10	15	74,76	74,67	0,09
04	15	17	74,67	74,64	0,03
05	17	22,5	74,64	74,53	0,11
06	22,5	28	74,53	74,02	0,51
07	28	31	74,02	73,82	0,2
08	31	35	73,82	73,68	0,14
09	35	40	73,68	73,61	0,07
SoC =					1,39%

La Figure 4.16 montre les résultats de simulations de stratégie de contrôle d'un point de vue de puissance de batterie Li-ion consommée par la chaîne de traction durant le cycle de conduite. D'après la Figure 4.16 on peut voir que le véhicule fait appel à des séquences de puissance de la batterie durant son parcours (telle que les phases d'accélération, de décélération et lorsque le véhicule se situe sur une route en monte ou descente). La batterie fournit environ $1,5Kw$ pour que le véhicule atteigne la vitesse de référence de $50Km/h(16m/s)$ donnée par le conducteur. De $t = 5s$ à $t = 17s$ la vitesse du véhicule passe de $50Km/h(16m/s)$ à $30Km/h(9,6m/s)$, de ce fait, une demande moindre de puissance de la batterie par le véhicule est constatée pour atteindre cette variation, elle est de l'ordre de $0,95Kw$ et reste constant durant la période de $12s$ (phase 02, 03, 04 et 05) sauf une petite augmentation qui ne dépasse pas $50w$ est constatée lorsque le véhicule se situe dans un virage à droite/gauche (phase 02 et 04). Par conséquent, le courant et la tension

de la batterie restent constants (Figure 5.18 et 5.19). A l'instant $t = 17s$, le conducteur accélère la vitesse du véhicule jusqu'à atteindre les $80Km/h(25,6m/s)$ afin de vaincre le couple résistant exercé sur le véhicule durant la phase de montée (phase 06) sur une pente de 10%. Durant cette phase, la puissance demandée par la charge est maximale et égale à $4,81Kw$ et présente 15.52% de la totalité de la puissance stockée dans la batterie ($31Kw$). Ce qui explique un appel de courant très fort (Cf. Figure 4.17) et une diminution de tension de la batterie (Cf. Figure 4.18) ainsi que leur état de charge (Cf. Figure 4.15). On peut voir aussi que la puissance fournit par la batterie durant la phase de descente est de l'ordre de $1,21Kw$ par. De $t = 35s$ à $t = 40s$, la puissance demandée par la charge est faible et ne dépasse pas les $0,58Kw$ par, ce qui correspond à une phase de décélération du véhicule.

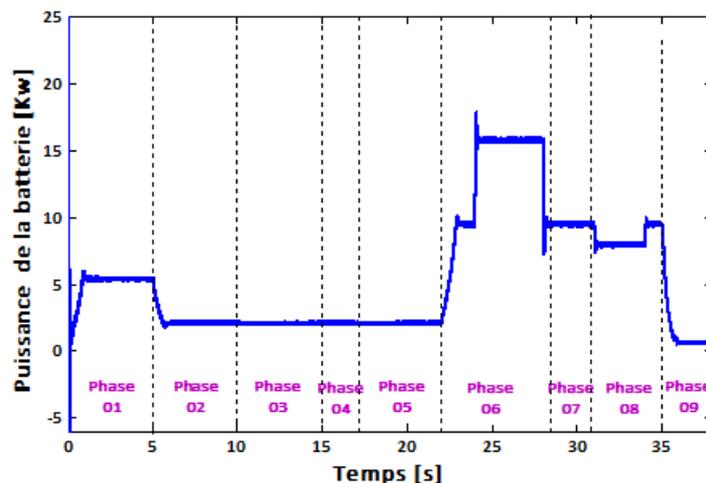


FIGURE 4.16 – Variation de puissance de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.

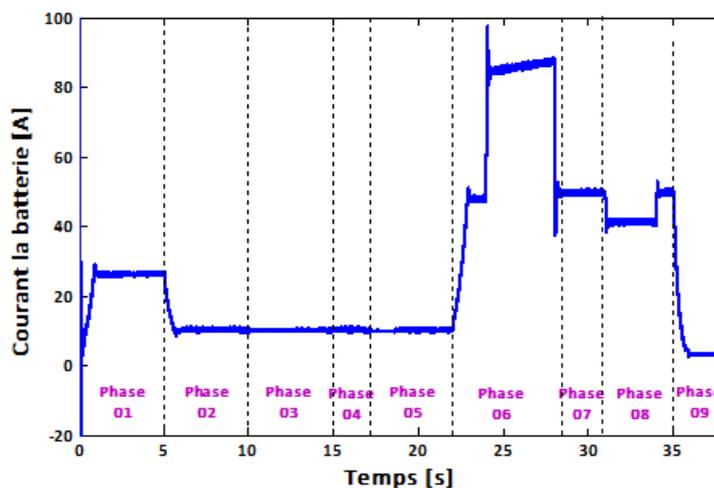


FIGURE 4.17 – Variation de courant de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.

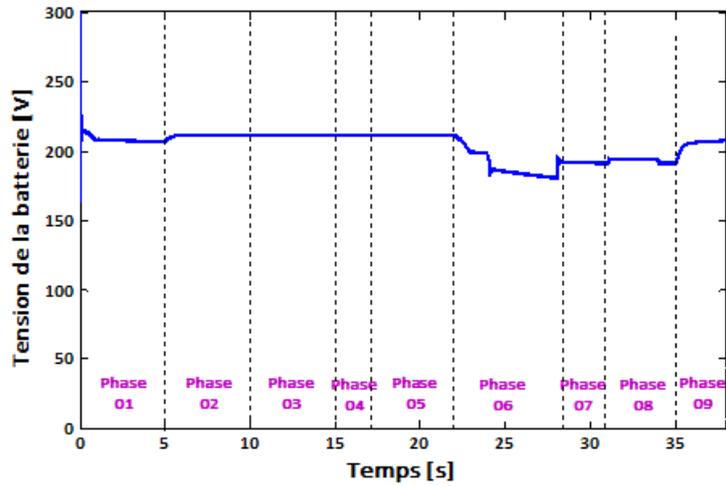


FIGURE 4.18 – Variation de tension de la batterie Li-ion durant le cycle de conduite.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la structure de contrôle proposée a été étudiée suivant un cycle de conduite pour la propulsion d'un véhicule électrique (VE) à deux roues motrices EV2WD.

Les résultats obtenus par simulation numérique ont permis de faire une meilleure validation de structure de contrôle par la DTC, essentiellement quand le VE est conduit pour assurer une trajectoire particulière avec des manœuvres spécifiées.

On peut dire que l'utilisation de structure de contrôle proposées est une solution très appropriée pour le contrôle du véhicule électrique car elle assure des bonnes performances (précision, rapidité), en outre, elle présente certains inconvénients à savoir : les ondulations du couple électromagnétique et du flux statorique générées par la machine asynchrone, de plus elle permet de garantir une bonne autonomie du véhicule et préserver la consommation d'énergie.

Conclusion Général

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine de commande des systèmes d'entraînements électriques à vitesse variable où l'accent est mis sur les systèmes multi machines appliquées aux véhicules électriques. Donc, l'objectif tracé est de présenter la modélisation, la commande et la simulation numérique du comportement du véhicule électrique propulsé par deux moteurs-roues du type asynchrone (MAS) qui, après une étude bibliographique, nous a paru comme étant un bon compromis entre la performance et le coût. Chaque moteur est alimenté par des batteries d'accumulateurs à travers des onduleurs de tension triphasés de deux niveaux. Dans le contexte des problèmes de l'environnement et, plus particulièrement, ceux posés par la pollution dans les zones urbaines, un bref historique sur l'évolution des véhicules électriques et ses différentes caractéristiques en terme d'architecture, de leur mode de fonctionnement et les tâches à accomplir par chaque sous-ensemble. Nous avons également présenté les différents types de motorisation électrique utilisée dans le domaine de traction. Cela nous a guidés dans la définition de notre véhicule en termes d'architecture, moteur et source d'énergie. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle dynamique du véhicule électrique, ensuite nous avons étudié la modélisation des différents composants constituant la chaîne de traction du véhicule, en commençant par la modélisation de la machine asynchrone (MAS) alimentée par un onduleur de tension. Aussi nous avons présenté le bilan des efforts appliqués au véhicule électrique. Puis, nous avons présenté la modélisation de système de couplage entre les deux parties électrique et mécanique du véhicule. Enfin, le modèle de système de différentiel électronique de vitesse est présenté.

Dans le but de commander le système de traction, notre intérêt s'est porté sur la stratégie de commande directe du couple DTC appliquée à la machine asynchrone. Cette technique offre une réponse dynamique très rapide du couple électromagnétique et du flux statorique, ainsi il apporte une solution concrète aux problèmes de robustesse rencontrée dans les autres structures de contrôles telle que la commande vectorielle à orientation du flux rotorique FOC. Le chapitre trois constitue l'étape de modélisation ainsi le principe de cette commande. Les résultats de simulation de la commande DTC pour la machine asynchrone montrent que cette méthode de contrôle est sensible à la variation de la résistance statorique, puisque l'estimation de flux ne dépend que de la résistance du stator, de plus, les ondulations de couple et du flux sont assez forte du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis ce point constitue l'un des inconvénients majeurs de la DTC.

Pour finir, les performances de structure de commande DTC à été étudié par une simulation de modèle globale du véhicule électrique à deux roues motrices. On retient que la stratégie de commande DTC a donné des meilleurs performances en termes de suivi de trajectoire, robustesse, de plus l'autonomie du véhicule et la consommation d'énergie.

Perspectives

A la lumière des résultats obtenus au cours de nos travaux, un certain nombre de perspectives peut être envisagé. Les axes de recherche suivants sont recommandés pour continuer cet effort :

- Il est proposé une continuation de la recherche dans le domaine d'amélioration de la commande DTC par l'utilisation de commandes non-linéaires et intelligentes (Mode glissant, Backstepping, Linéarisation entré-sortie, Logique floue, Réseaux de neurone...).
- L'intégration des sources d'alimentation hybrides et l'optimisation de la gestion d'énergie dans un VE.

Bibliographie

- [1] B. Multon, "Motorisation des véhicules électriques", Techniques de l'ingénieur, N° E3996, 2001.
- [2] A. Nouh, "Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers", Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort- Montbéliard et université de Franche-Comté, 26 Mars 2008.
- [3] K. Messaoudene, "Dispositif Innovant de Frein Automobile par le Volant, Intégré à un Système de Direction Type Steer-by-Wire. Dédié aux Personnes Paraplégiques", Thèse de Doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne, 01 Juillet 2011.
- [4] F. Badin, J. Scordia, R. Trigui, E. Vinot, et B. Jeanneret, "Hybrid electric vehicles energy consumption decrease according to drive train architecture, energy management and vehicle use", Hybrid Vehicle Conference, IET the Institution of Engineering and Technology, pp. 213-224, 2006.
- [5] V. Mester, "Conception optimale systématique des composants des chaînes de traction électrique", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France, 22 Mai 2007.
- [6] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay et A. Emadi, "Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : fundamentals, theory, and design", CRC Press LLC, 2005.
- [7] M. Kant, "La voiture électrique", Technique de l'ingénieur, D5 560.
- [8] B. Multon, L. Hirsinger, "Problème De La Motorisation D'un Véhicule Electrique", Ecole normale supérieure de Cachan, d1375 Revue 3E.I, N°5, pp.55-64, mars 1996.
- [9] T. X. Mei, R. M. Goodall et A. H. Wickens, "Dynamics and control assessment of rail vehicles using permanent magnet wheel motors", Vehicle System Dynamics Supplement, Vol 37, pp. 326-337, 2000.
- [10] A. Haddoun, F. Khoucha, M. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, and K. Srairi, "Modeling, analysis, and Neural Network Control of an EV electrical differential Gears", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 55, N°. 6, pp. 2286-2294, 2007.
- [11] R. Vos, "Influence of in-wheel motors on the ride comfort of electric vehicles", Eindhoven University of Technology, July 2010.
- [12] AVERE, "Outil et solution de mobilité urbaine individuelle et électrique", association véhicule électrique router européen, www.averre.org.
- [13] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical machines and drives for electric, hybrid and fuel cell vehicles", Proceeding of the IEEE, Vol. 95, N°4, pp. 746-763, April 2007.
- [14] A. Arif, "Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque", thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, 07-11-2013.
- [15] J. Beretta, "Le génie électrique automobile, la traction électrique", H. Science, éd Lavoisier.
- [16] I. Husain, "Electric and Hybrid Vehicles : Design Fundamental", CRC Press LLC, 2003.
- [17] F. Ju, Q. Zhang, W. Deng et J. Li, "Review of structures and control of battery supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles", Chez International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), New Taipei, Taiwan, 2014.
- [18] H. Gharbi, "Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride", Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2014.
- [19] D. Feroldi, "Control and design of PEM fuel cell-based systems", PhD Thesis, Université Polytechnique de Catalogne, 2009

- [20] E. Faggioli, P. Rena, V. Danel, X. Andrieu, R. Mallant et H. Kahlen, "Supercapacitor for the energy management of electric vehicles", *Journal of Power Source*, Vol 84, pp. 261-269, 1999.
- [21] G. Genta, "Motor vehicle Dynamics : modeling and simulation", series on advances in mathematics for applied sciences. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Vol. 43, 1997.
- [22] R. Pusca, "Contribution au pilotage d'une plate-forme mobile d'essais de constituants d'une chaîne de traction électrique : conception d'un simulateur et temps réel", thèse de doctorat, université de Franche-Comté, décembre 2008.
- [23] E. Esmailzadeh, G. R. Vossoghi et A. Goodazi, "dynamic modeling and analysis of four motorized wheels vehicle", *Vehicle system Dynamics*, Vol. 35, pp. 163-194, 2001.
- [24] M. Khaled .Itani, "Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique", Thèse De Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, université de Paris-Saclay, 03 Juillet 2017.
- [25] E. H. Hirschel, "Basics of aerothermodynamics", Springer, Vol. 206, 2005.
- [26] R. Zaimeddine, "Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone Alimenté par des Onduleurs Multi-Niveaux", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2007.
- [27] R. Toufouti, "Contribution a la Commande Directe du Couple de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2008.
- [28] M. T. Lamchich, "Torque Control", Edition In Tech, 2011.
- [29] A. Mezouar, "Décomposition et réduction de modèles des procédés électromécaniques : application à la commande des machines asynchrone", Thèse de doctorat, Université Djilali Liabès, Sidi-Bel-Abbès, 2006.
- [30] J. C. de Barros, "Application de la Logique Floue a la Commande Optimale du Moteur Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université AIX-Marseille III, France, 2003.
- [31] J. P. Caron et J. P. Hautier, "Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone", Edition TECHNIP, Paris 1995.
- [32] C. Carlos, "Commande des Moteurs Asynchrones : Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC", Edition Hermes Science Europe, Vol 1, 2000.
- [33] C. Carlos, "Commande des Moteurs Asynchrones Optimisation, Discrétisation et Observateurs", Edition Hermes Science Europe, Vol. 2, 2000.
- [34] G. Guy and C. Guy, "Actionneurs Electriques, Principes Modèles Commande", Edition Eyrolles, 2000.
- [35] R. Absessemmed et M. Kadjoudj, "Modélisation des Machines Electriques", Presses de l'Université de Batna, 1997.
- [36] A. Khlaief, "Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)", Thèse de Doctorat, Aix-Marseille Université, France, 10 Juillet 2012.
- [37] G. Sturtzer, E. Smigiel, "Modélisation et commande des moteurs triphasés", Edition ellipses.
- [38] M. Bendaikha, "Commande par MLI vectorielle d'un onduleur alimentant un moteur à cage", article, 5 septembre 2000.
- [39] A. Meroufel, "Contrôle de la machine asynchrone : commande scalaire, commande vectorielle et commande directe du couple", Université Djillali Liabès -Sidi Bel-Abbès, 2008-2009.
- [40] W. Lhomme, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 16 Novembre 2007.

- [41] A. Boucheraït, "Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi sources", Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 11 Décembre 2011.
- [42] B. Gasbaoui, A. Chaker, A. Laoufi, B. Allaoua, A. Nasri, "The efficiency of direct torque control for electric vehicle behavior improvement", *Surbian Journal of Electrical Engineering*, pp. 227-246, 2011.
- [43] I. Zulkiflie, M. Y. Nurazlin, S. Marizan, M. L. Jurifa, A. H. Ahmad Shukri, A. P. Fizatul, "Electric differentiel with SPVWM direct torque control using five-leg inverter for electric vehicles ", *Journal of Theoretical and applied Information Technology*, pp. 599-609.
- [44] A. Ghezouani, B. Gasbaoui, N. Nair, O. Abdelkhalek, J. Gouili, "Comparative Study of PI and Fuzzy Logic Based Speed Controllers of an EV with Four In-Wheel Induction Motors Drive", *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, Vol 12, N° 03, pp. 43-54, 15 November 2018.
- [45] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick Response and High Efficiency Control Strategy of Induction Motor", *IEEE Trans. Ind. Electron*, IE-22, Sept /Oct 1986.
- [46] I. Takahashi and S. Asakawa, "Ultra-Wide Speed Control of Induction Motor Covered 10A6 range", *IEEE Trans Ind Applicat*, IA-25, pp. 227-232, 1987.
- [47] A. Dissa, "Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée a un observateur non linéaire", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [48] H. Bensaadi, "Commande DTC-SVM d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2012.
- [49] B. Fornel, "Techniques de l'ingénieur", D3 623.
- [50] A. Amour, "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissants", thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2005.
- [51] A. Chikhi, "Commande direct du moteur asynchrone-Apport de la Logique floue", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [52] A. Benaiad, "Comparaison des performances d'un régulateur PI classique et PI floue pour la commande direct du couple", Mémoire de master, Université de Béchar, 2013.
- [53] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, A. Tani, "FOC and DTC : Two viable schemes for induction Motors torque control", *Power Electronics*, *IEEE Transactions*, Vol. 17, sept 2002.
- [54] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, A. Tani, "Effects of flux and torque hysteresis band in direct torque of induction machines", *Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, *IECON apos*, Vol. 1, sept 1994.
- [55] J. Belhadj, "Commande Directe en Couple d'une Machine Asynchrone- Structures d'observation - Application aux systèmes multi machines multiconvertisseurs" Thèse de Doctorat Université de Tunis El-Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2001.
- [56] A. M. A. Hissel, "Contrôle directe du couple électromagnétique des machines asynchrones de grande puissance", Thèse de Doctorat ENSEEIHT Toulouse, France, 1999.
- [57] K. Nabti, "Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue", thèse de magister L'Université Mentouri de Constantine, Juin 2006.
- [58] B. Mokhtari, "Implantation de la DTCF par des techniques de l'intelligence artificielle neuronale et neuro-floue : application à la machine asynchrone alimenté par des onduleurs de tension a deux et a trois niveaux", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [59] www.guillaumedarding.fr

Annexe

1 Caractéristiques et paramètres nominaux de la machine asynchrone

Tableau 0.1 : Paramètres nominaux de la machine asynchrone utilisé.

Description	Symboles	Valeurs	Unités
Tension Nominale	V_n	400	volts
Puissance nominale	P_n	15	Kw
Fréquence nominale	f_n	50	Hz
Nombre de paires de poles	p	2	/
Vitesse nominale	ω_n	1450	tr/min
Courant nominale	I_n	37.5	A
Couple nominale	C_n	99.5	N.m
Résistance statorique	R_s	0.2147	Ω
Résistance rotorique	R_r	0.2205	Ω
Inductance statorique	L_s	0.000991	H
Inductance rotorique	L_r	0.000991	H
Inductance Mutuelle	L_m	0.06419	H
Coefficient de frottement	f_c	0.009541	N.m.s
Moment d'inertie	J	0.102	Kg.m ²

2 Caractéristiques du véhicule électrique

Tableau 0.2 : Paramètres du véhicule électrique utilisé.

Description	Symboles	Valeurs	Unités
Masse du véhicule	M_v	1300	Kg
Rayon des roues	R_w	0.32	m
Rapport de réduction entre le moteur MAS et la roue	N_{red}	1.7992	/
Section frontale du véhicule	S_f	2.61	m ²
Coefficient de résistance au roulement	C_{rr}	0.0133	/
Accélération Gravitationnelle	g	9.81	m/s ²
Coefficient de pénétration dans l'aire	C_{px}	0.32	/
Masse volumique de l'aire	ρ_{air}	1.109	kg/m ³

3 Vitesse du cycle de conduit normalisé NEDC

La Figure 0.1 représente le profil de vitesse du cycle NEDC(New European Driving Cycle)

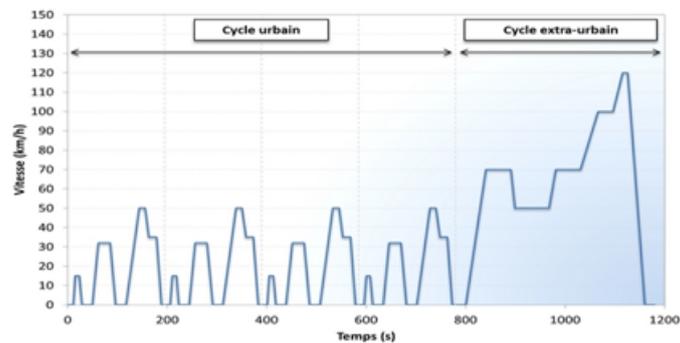


Figure 0.1 : Consigne de vitesse dans le temps du cycle NEDC[59].