

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

*Simulation Numérique D'une Chaîne De
Traction D'un Véhicule Electrique*

Proposé et dirigé par :

M. T.ROUBACHE

Présenté par :

- MILOUDI saleh

- DERRADJ azeddine

- BOUHLAL aissa

Année Universitaire : 2011 / 2012

Remerciements

Remerciements à Dieu –le tout puissant– qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur M^{er} T. Roubache d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont aidé à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail

A tous les membres de ma famille grand et petit .

A ma mère avec toute m' affection .

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un ingénieur d'état en électromécanique.

A mes collègues aissa, azeddine, qui m'a accompagné pendant le long de cette période pour réaliser ce modeste travail.

A tous les étudiants de la faculté en génie électrotechnique surtout les étudiants de la 5^{ème} année promotion 2012.

A tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

A tous ceux qui connaissent

Miloudi Saleh.

DEDICACES

A qui puis je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers Parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, L'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également:

A toute la famille Derradj.

A mes amis.

A tous ceux dont les noms m'ont échappé.

Azeddine Derradj

Je dédie ce modeste travail

A tous les membres de ma famille grand et petit .

A ma mère avec toute m' affection .

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un ingénieur d'état en électromécanique.

A mes collègues salah, azeddine, qui m'a accompagné pendant le long de cette période pour réaliser ce modeste travail.

A tous les étudiants de la faculté en génie électrotechnique surtout les étudiants de la 5^{ème} année promotion 2012.

A tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

A tous ceux qui connaissent

Bouhlal Aissa .

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA TRACTION ELECTRIQUE

INTRODUCTION.....	4
I.1.GENERALITE SUR LES VEHICULES ELECTRIQUES.....	5
I.1.1.Historique.....	5
I.1.2.Etat actuel de développement.....	5
I.1.3.Performances des véhicules électriques	6
I.2. DESCRIPTION GENERALE DU SYSTEME DE PROPULSION.....	6
I.2.1 Le Bloc Moteur Electrique.....	7
I.2.2 Le Bloc de Commande et de Contrôle	8
I.2.3 Le Bloc de Puissance.....	8
I.3. DESCRIPTION GENERALE DE LA CHAINE DE TRACTION	8
I.3.1.Motorisations pour la chaîne de traction.....	8
I.3.1.1.Moteur à courant continu à excitation séparée.....	9
I.3.1.2.Moteurs à courant continu à aimant permanent.....	9
I.3.1.3.Moteurs asynchrones.....	9
I.3.1.4.Moteurs synchrones à aimants permanents.....	10
I.3.1.5.Moteur synchrone à inducteur bobiné.....	10
I.3.1.6.Moteur à réluctance variable.....	10
I.3.2.Convertisseur statique	12
I.3.2.1. Les redresseurs (AC/DC)	12
I.3.2.2. Les hacheurs (DC/DC)	12
I.3.2.3. Les onduleurs (DC/AC).....	12
I.3.3.Contrôle électronique.....	13
I.3.4.Transmission mécanique.....	13
I.3.5.Source d'énergie.....	14
I.3.5.1.Batteries.....	14
I.3.5.2. Pile á combustible.....	15

I.4.DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE VEHICULES	
ELECTRIQUES.....	16
I.4.1.Véhicule électrique mono-moteur.....	17
I.4.2.Véhicule électrique multi-moteurs.....	18
I.5.CRITERES D’OPTIMISATION GLOBALE DE LA CHAÎNE DE	
TRACTION.....	19
I.5.1. Optimisation du moteur.....	19
I.5.2. Optimisation du convertisseur électronique et de la batterie.....	19
I.5.3. Optimisation du réducteur.....	19
CONCLUSION	20

CHAPITRE II

MODELISATION D'UNE CHAINE DE TRACTION DU VEHICULE ELECTRIQUE

INTRODUCTION.....	22
II.1.MODELISATION DYNAMIQUE DU VEHICULE.....	22
II.1.1. Structure du VE à deux roues motrices indépendantes en avant...23	
II.1.2. Contraintes dynamiques sur le véhicule	24
a) Contraintes d’accélération : accélération et freinage.....	24
b) Contrainte de vitesse maximale.....	24
c) Contrainte de non-glissement.....	25
d) Force d’entraînement.....	25
II.1.3.Efforts et couples résistant au déplacement.....	25
II.1.4. Conditions de déplacement du véhicule.....	27
II.1.5. Equations de mouvement	27
II.1.6.Comportement longitudinal du pneumatique.....	31
II.1.6.1. Glissement longitudinal.....	31
II.1.6.2. Angle de glissement	32
II.1.6.3. Comportement d’une roue vis-à-vis du sol	32
II.1.7. Dynamique de la roue motrice.....	36
II.1.8. Modélisation du pneumatique.....	37
II.1.8.1.Définition de l’angle de dérive (δ)	39

II.1.8.2.Coefficient de frottement.....	39
II.1.8.3.Présentation du modèle de Pacejka (formule magique)....	40
a. Forme du modèle de base.....	40
b. Identification de la force longitudinale.....	41
c. Identification de la force latérale.....	41
CONCLUSION	42

CHAPITRE III

INTRODUCTION.....	44
III.1. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	44
III.1.1.Hypothèses simplificatrices.....	44
III.1.2.Equations générales.....	45
III.1.2.1.Equations électriques.....	45
III.1.2.2.Équations magnétiques.....	45
III.1.2.3.Équations mécaniques.....	46
III.1.3.Modélisation dans le repère de Park	
.....	46
III.1.3.1.Équations électriques...	
.....	47
III.1.3.2.Equations	
magnétiques.....	48
III.1.3.3.Équations	
mécaniques.....	48
III.1.4. Différents repères.....	48
III.1.4.1. Référentiel lié au stator (α, β).....	48
III.2.COMMANDE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE	
ASYNCHRONE.....	49
III.2.1 Principes généraux de la commande directe du couple.....	49
III.2.2 Modélisation vectorielle de l'onduleur de tension.....	49
III.2.3 Contrôle du flux et du couple électromagnétique.....	52
III.2.3.1 Contrôle du flux statorique.....	53

III.2.3.2	Contrôle du couple électromagnétique.....	54
III.2.4	Présentation de la structure de contrôle	55
III.2.4.1	Sélection du vecteur tension.....	55
III.2.4.2	Estimateurs.....	57
III.2.4.2.1	Estimation du flux statorique.....	57
III.2.4.2.2	Estimation du couple électromagnétique.....	58
III.2.5	Elaboration du vecteur de commande.....	58
III.2.5.1	Elaboration du correcteur de flux.....	58
III.2.5.2	Elaboration du correcteur du couple.....	59
III.2.6	Elaboration de la table de commande	60
III.2.6.1	Tables de commande pour les vecteurs tensions nuls.....	60
III.2.6.2	Tables de commande pour les vecteurs tensions non nuls..	60
III.2.7	Structure générale du contrôle direct de couple.....	61
III.3.	GENERATION DE LA TRAJECTOIRE.....	62
III.4.	COMMANDE DES MOUVEMENTS.....	63
III.5.	RESULTATS DE SIMULATION.....	64
	CONCLUSION.....	66
	CONCLUSION GENERALE	68

ANNEX

_ Paramètres de la machine asynchrone

_ Paramètres du véhicule électrique

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

TABLEAU DE FIGURES

Figure	Titre	PAGE
I.1	Synoptique d'un Système de Propulsion	7
I.2	Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique	8
I.3	Schéma d'une PAC	16
I.4	Chaîne de traction mono-moteur	17
I.5	Exemples schématiques de motorisations mono-moteur	17
I.6	Véhicule multi-moteurs	18
I.7	Exemples schématiques de motorisations multi-moteurs	18
II.1	Structure du véhicule électrique à deux roues motrices	24
II.2	Les forces sur le véhicule	26
II.3	Mouvement du véhicule dans le système d'axes (X, Y)	28
II.4	Forces au niveau des roues du véhicule, dans le plan (x, y)	30
II.5	Déférence entre les vitesses centrales et radiales de la roue	31
II.6	Efforts sur une roue sous l'action d'un couple moteur	33
II.7	Glissement latéral de la roue	34
II.8	Profil du coefficient d'adhérence longitudinal en fonction du glissement d'une roue	35
II.9	Courbes de l'adhérence pour différents revêtements de la route	36
II.10	Constitution d'un pneumatique à architecture radiale	38
II.11	Angle de dérive	39
II.12	Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka	40
III.1	Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.	44
III.2	Représentation du passage d'un système triphasé à celui biphasé	47
III.3	Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux	50
III.4	Représentation vectorielle de l'onduleur de tension à deux	

	niveaux	51
III.5	Orientation de l'axe du repère tournant selon la direction du flux statorique	53
III.6	Choix du vecteur tension	56
III.7	(a) : Sélection des vecteurs tensions correspondant	59
	(b): Correcteur de flux à hystérésis à deux niveaux	59
III.8	Correcteur de couple à deux niveaux.	60
III.9	Schéma de la structure générale du contrôle directe du couple.	62
III.10	Profile de consigne de vitesse et accélération subie.	63
III.11	Commande du véhicule par un régulateur PI	64
III.12	Résultats de simulation de la structure directe pour un déplacement ligne droite-rotation à droite- ligne droite	64
III.13	Résultats de simulation sans glissement	65
III.14	Résultats de simulation avec glissement	65

LISTE DES TABLEAUS

Tableau	Titre	PAGE
(I.1)	Avantages et Inconvénients des différents moteurs électrique de motorisation de la chaîne de traction	8
(I.2)	Technologies des batteries	12
(II.1)	Facteur de glissement : lois et valeurs	34
(III.1)	Vecteurs tension d'état de l'onduleur	52
(III.2)	Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à deux niveaux (avec les vecteurs tensions nuls).	60
(III.3)	Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à deux niveaux (avec les vecteurs tensions non nuls).	61

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

1. Machine asynchrone

MAS	Machine Asynchrone.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
DTC	Direct Torque Control ou (Contrôle direct du couple).
$\hat{}$	Symbole pour une grandeur estimée.
a, b, c	Axes liés aux enroulements triphasés.
d, q	Axes de référentiel de Park.
$[P]$	Matrice de Park.
$\alpha(rad)$	Angle entre le stator et le rotor.

Grandeurs électriques et magnétiques au stator	
$V_s(V)$	Tension statorique.
$V_{sabc}(V)$	Tension statorique phase a, b ou c.
$V_{sdq}(V)$	Tension statorique sur l'axe d ou q.
$I_s(A)$	Courant statorique.
$i_{sabc}(A)$	Courant statorique phase a, b ou c.
$i_{sdq}(A)$	Courant statorique sur l'axe d ou q.
$R_s(\Omega)$	Résistance statorique par phase.
$l_s(H)$	Inductance propre statorique par phase.
$M_s(H)$	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
$L_s(H) = l_s - M_s$	Inductance statorique par phase.

$\varphi_{sabc}(Wb)$	Flux statorique phase a, b ou c.
$\varphi_{sdq}(Wb)$	Flux statorique sur l'axe d ou q.

Grandeurs électriques et magnétiques au rotor	
$V_r(V)$	Tension rotorique.
$V_{rabc}(V)$	Tension rotorique phase a, b ou c.
$V_{rdq}(V)$	Tension rotorique sur l'axe d ou q.
$I_r(A)$	Courant rotorique.
$i_{rabc}(A)$	Courant rotorique phase a, b ou c.
$i_{rdq}(A)$	Courant rotorique sur l'axe d ou q.
$R_r(\Omega)$	Résistance rotorique par phase.
$l_r(H)$	Inductance propre rotorique par phase.
$M_r(H)$	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
$L_r(H) = l_r - M_r$	Inductance rotorique par phase.
$\varphi_{rdq}(Wb)$	Flux rotorique sur l'axe d ou q.
$M = (3/2).M_{sr}(H)$	Inductance mutuelle entre le stator et le rotor.
$M_{sr}(H)$	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor, il est obtenu lorsque les axes sont aligné.
P	Nombre de pôles.

$\omega_r (rad / s)$	Pulsation électrique rotorique.
$\Omega_r (rad / s)$	Vitesse mécanique rotorique.
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie des parties tournantes.
$f(Nm.s.rad^{-1})$	Coefficient de frottements visqueux.
$C_e(N.m)$	Couple électromagnétique.
$C_r(N.m)$	Couple résistant.

2. Véhicule électrique

M_v	Masse du véhicule.
Γ	Accélération tangentielle du véhicule.
g	Accélération de pesanteur.
C_{rr}	Le coefficient de résistance au roulement.
C_{px}	Coefficient de résistance aérodynamique.
F_{roul}	La force de résistance au roulement
F_{aero}	La force de résistance aérodynamique.
F_{pente}	La force de résistance dûe à la pente à gravir.
α_p	L'angle de la pente.
F_{acc}	La force d'accélération.
Cr	Le couple résistant à la roue.
F_{tot}	L'effort total nécessaire au déplacement du véhicule.
R_r	Le rayon de la roue.
C_m	Le couple de moteur.
l_f	Distance perpendiculaire entre le train avant et le centre de gravité.

L_r	Distance perpendiculaire entre le train arrière et le centre de gravité.
δ_i	Angle de braquage des roues avant.
β_i	Angle de direction de la roue.
Ω_{roue}	La vitesse de rotation de la roue.
F_z	Charges verticales.
δ	Angle de dérive.
C	Facteur de forme (permet d'ajuster l'allure de la courbe).
D	Valeur du pic (maximum de la courbe d'adhérence).
B	Facteur d'amortissement ment (pente à l'origine).
M_{ai}	Sont les couples d'auto-alignement.
E	Facteur de courbure.
SV	Pour un décalage vertical.
μ	Le coefficient de glissement.
m_{av}	Les masses portées par les roues avant.
m_{ar}	Les masses portées par les roues arrière.
ρ	Densité volumique de l'aire.
S_f	Surface frontale (m ²).
V_{vent}	La vitesse de vent.
V_{veh}	La vitesse de véhicule.
CG	Le centre du gravité du véhicule.
E_c	L'énergie cinétique du véhicule.
I_v	L'inertie de véhicule.

ψ	L'angle de lacet.
α_{pt}	La pente transversale.
S_x	Le glissement longitudinale.
$M_{\alpha i}$	Les couples d'auto-alignement.
Sh	utilisé pour introduire un décalage horizontal de la courbure par Rapport à l'origine.

INTRODUCTION GENERALE

Le développement récent du véhicule électrique répond essentiellement à un souci de protection de l'environnement et à un impératif d'économie d'énergie

A côté de ces deux principales qualités, le véhicule électrique est d'un entretien plus simple et est plus fiable que le véhicule classique à moteur à combustion interne. En effet, il ne nécessite ni vidange, ni bougies, ni filtre à air, ni embrayage...etc. Il ne pose pas de problèmes particuliers au démarrage, même en hiver. De plus, la durée de vie d'un moteur électrique est généralement de loin supérieure à celle de son équivalent à combustion interne (environ un million de kilomètres, soit six fois plus !).

Par ailleurs, l'avantage le plus marquant du moteur électrique est sa capacité de développer très rapidement et avec précision le couple nécessaire dans toutes les conditions de conduite. Cette aptitude de contrôle précis du couple moteur est très intéressante dans les véhicules à roues où le contact pneumatique-sol affecte considérablement la force de traction du véhicule. Nous verrons par la suite que la maniabilité et la stabilité du véhicule n'en peuvent être qu'améliorées.

Un véhicule électrique peut être motorisé de différentes façons selon le degré de simplification mécanique souhaité de la chaîne de traction. Cette dernière peut être constituée, dans la version la plus archaïque, d'un moteur unique associé à un embrayage et une boîte de Vitesses et dans la version la plus minimaliste, de deux ou de quatre moteurs entraînant les roues soit directement ou à travers un réducteur à rapport fixe. Les moteurs peuvent aussi être entièrement intégrés dans les roues

Dans ce mémoire, nous étudions la simulation de toute la chaîne de traction des deux actionneurs entraînant les roues avant, qui sont constitués par des moteurs asynchrones associés chacun à un système de commande directe du couple (DTC : Direct Torque Control).

Pour présenter ce travail, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre est une introduction générale sur les véhicules électriques. Nous avons jugé utile d'introduire certaines notions sur les véhicules électriques en particulier les configurations de motorisation les plus employées actuellement. Des orientations générales, concernant leur optimisation et leurs critères de choix, y sont également présentées.

Ensuite, nous présentons la configuration de base sur laquelle nous avons travaillé.

Nous développons dans ce chapitre un modèle cinématique puis dynamique du véhicule électrique à deux roues motrices indépendantes à l'avant. Le modèle dynamique permet d'étudier et d'optimiser les efforts de traction nécessaires en tenant compte de la nature du contact roues-sol et des différentes résistances à l'avancement du véhicule.

Nous présentons par la suite une loi de contrôle des deux actionneurs électriques permettant la conduite du véhicule .

Enfin, nous terminons par une conclusion générale rassemblant un certain nombre de remarques générales sur notre travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR

LA TRACTION ELECTRIQUE

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la traction électrique devient un thème de recherche d'actualité. Ce concept englobe un large domaine à caractère pluridisciplinaire. Il fait appel à des connaissances en électrotechnique, électronique, mécanique, automatique, chimie, et informatique [1]. La configuration classique d'une chaîne de traction électrique repose sur la commande d'une machine à courant continu ou à courant alternatif. En ce qui concerne la traction, une consigne de couple est appliquée. La chaîne doit comporter une source d'énergie, un ou des convertisseurs d'énergie, et une ou des machines électriques, associées à une électronique de calcul et d'instrumentation.

Dans un souci d'optimisation globale, une approche système s'impose. Les différentes parties liées à une technologie particulière seront, d'une part, optimisées et, d'autre part, prendront en compte les autres sous-systèmes. Ceci conduira à une synthèse générale de l'optimisation où des critères précis seront établis dans le but de satisfaire à certains compromis technologiques.

Dans le cadre du véhicule électrique, de nombreux travaux de recherche ont été et sont encore conduits sur les différentes parties de la chaîne de traction. Depuis l'apparition significative du véhicule électrique, la machine à courant continu est la plus utilisée. De part sa facilité de commande, elle présente des avantages certains dans une conception de chaîne de traction. Hélas, ses rapports poids/puissance et poids/volume ne sont pas très intéressants ; sa plage de vitesse n'est pas très étendue et l'usure introduite par les balais ont conduit les différents constructeurs automobiles à se diriger vers des motorisations basées sur des machines alternatives [1], [2].

Dans ces conditions, le moteur électrique travaille avec un rendement optimal et une pollution minimale, en outre le réglage électrique de vitesse est beaucoup plus souple, il permet, entre autres, une grande plage de réglage de vitesse sans embrayage ni boîte de vitesses ainsi qu'un anti-patinage efficace [3]. Ces exemples montrent assez bien ce que la traction électrique peut apporter comme avantages.

Dans ce chapitre, nous présentons un bref rappel sur les véhicules électriques en général et une description sommaire des différentes technologies qui y sont employées. Nous aborderons également le problème de la motorisation dite "tout électrique" et nous mettons en évidence les avantages et inconvénients des solutions mono et multi-moteurs ainsi que les exigences fonctionnelles de la chaîne de traction électrique. Enfin, en guise de conclusion, nous abordons le problème de l'optimisation de la chaîne de traction.

I.1.GENERALITE SUR LES VEHICULES ELECTRIQUES

I.1.1.Historique

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour mouvoir les véhicules n'est pas nouvelle, elle est née dès que les premiers moteurs électriques ont commencé à fonctionner. Ainsi, à la fin du 19ème siècle, on compte une centaine de prototypes électriques plus ou moins rudimentaires [4].

Les performances atteintes étaient déjà importantes : la « Jamais contente » avait roulé à 105 km/h en 1899 et l'électromobile, munie d'une remorque de batteries, disposait en 1903 d'une autonomie de 375 km. Actuellement (début 1995), le record de vitesse de la voiture électrique est de 304 km/h, tandis que la distance maximale parcourue à 60 km/h de moyenne est de 540 km pour un « concept car » muni d'une remorque spécifique de 175 kg [4], [1].

Toutefois, malgré la simplicité et la fiabilité de sa motorisation, le véhicule électrique devait céder rapidement le pas à la voiture à moteur thermique. En effet, la densité d'énergie contenue dans le pétrole (environ 10000 Wh/kg) était 300 fois plus élevée que la densité d'énergie des meilleures batteries de l'époque. Par ailleurs, le temps de recharge s'avérait très grand devant le temps de remplissage d'un réservoir d'essence. Depuis, les quelques progrès techniques des batteries et de la recharge n'ont pu résoudre pleinement ces problèmes et de gros écarts subsistent toujours au niveau de l'autonomie et du temps de recharge [3], [1].

I.1.2.Etat actuel de développement

A l'heure actuelle, l'ensemble des véhicules électriques proposés par les constructeurs disposent d'une autonomie comprise entre 70 km et 200 km, tous ces véhicules étant équipés de batteries [1]. De nouvelles perspectives apparaissent toutefois avec l'utilisation de la *pile à combustible*. Cette dernière 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 [2].

La gamme de puissance s'étale d'environ 15 kW jusqu'à environ 100 kW. Cependant, les choix sont guidés par l'utilisation de ces véhicules; généralement, 20 à 30 kW suffisent pour un véhicule urbain alors que 40 à 50 kW sont préférables pour une voiture routière [1].

En ce qui concerne la motorisation, les moteurs à courant continu sont toujours aussi répandus, à cause de la simplicité de leur commande en vitesse variable. Cependant, on entrevoit de plus en plus une utilisation massive des moteurs alternatifs en raison de leur plus faible coût. En effet, jusqu'à il y a quelques années, la commande en vitesse variable des machines alternatives était difficile à mettre en œuvre. Celle-ci demandait une puissance de calcul que les processeurs de l'époque ne pouvaient fournir ou seulement à des coûts

prohibitifs. Avec les progrès de la technologie, les coûts ont diminué et la puissance de calcul n'a cessé d'augmenter, favorisant ainsi l'émergence de ces machines jusque là réservées à des applications de plus fortes puissances [3], [4].

Pour ce qui est du prix de ces véhicules, il est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. On peut cependant estimer que si les technologies d'alimentation employées (batteries, pile à combustible) sont fabriquées à grande échelle, alors les prix seraient comparables à ceux des véhicules thermiques. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique [1].

I.1.3. Performances des véhicules électriques

Le moteur électrique, contrairement au moteur thermique à explosion, peut délivrer, s'il est convenablement refroidi, son couple maximal dès l'arrêt [9]. Si, de plus, il peut délivrer sa puissance maximale dans une plage de vitesse suffisamment étendue, on peut éliminer, de la chaîne de traction, la boîte de vitesses et les pièces d'usure comme l'embrayage, et leurs organes de commande [3], [6].

De plus, le moteur électrique transforme la puissance électrique en couple avec un rendement à peu près trois fois supérieur au taux de conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique dans un moteur thermique, et ce avec un bruit de fonctionnement quasi nul [1].

Néanmoins, pour les véhicules électriques, se pose le problème du temps de recharge des batteries. Le temps standard de recharge des batteries d'un véhicule électrique branché sur une prise secteur classique (courant de recharge typique = 16 A) varie de 6 à 10 heures. Ce facteur, limite l'autonomie des véhicules électriques [1].

Il est donc nécessaire d'augmenter notablement les performances des véhicules électriques à plus ou moins court terme. Cela peut s'effectuer en suivant notamment les filières suivantes [3], [6].

- Utilisation de nouveaux types de batteries : Ni-MH, Li-Ion, pile à combustible...etc;
- Utilisation des moteurs électriques modernes, tels par exemple les moteurs à courant alternatif de dimensions réduites et à haut rendement ;
- Diminution des résistances au roulement par réduction du poids du véhicule et d'autres améliorations.

I.2. DESCRIPTION GENERALE DU SYSTEME DE PROPULSION

Un véhicule électrique "VE" est un véhicule dont la propulsion 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 scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie, etc. beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, le stockage et l'utilisation de l'électricité.

Le système de propulsion électrique (figure I.1) est l'organe principal du véhicule électrique, ce dernier est propulsé électriquement par des moteurs et comporte un système de transmission formé par un ou plusieurs moteurs électriques entraînant deux roues motrices.[1]

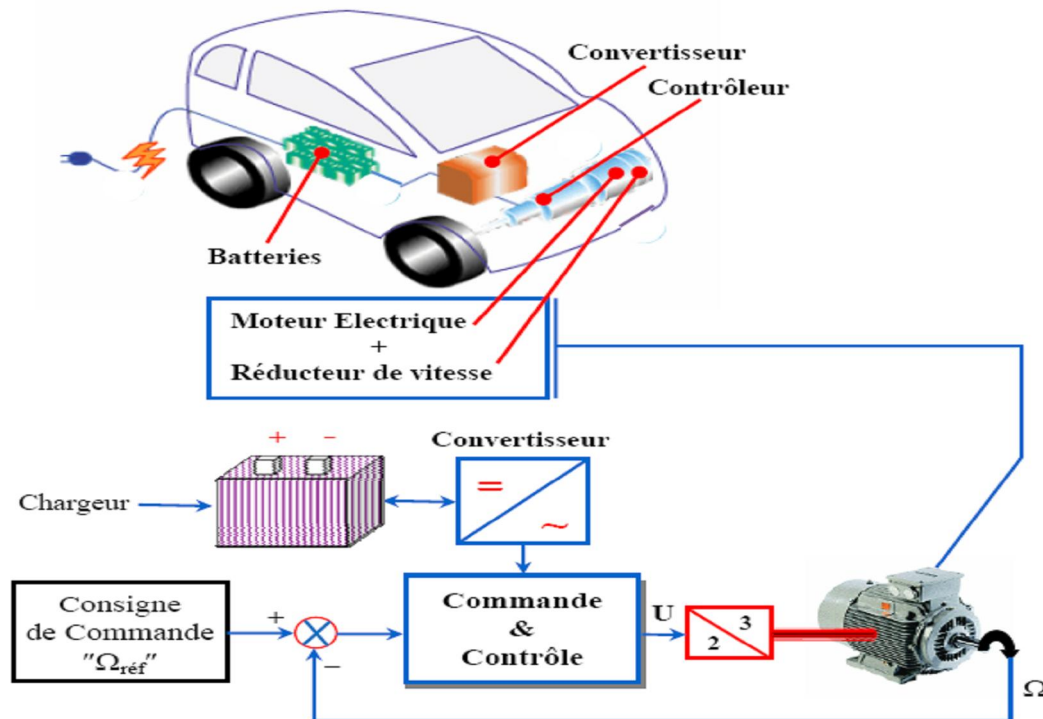


Fig. I.1. Synoptique d'un Système de Propulsion

Comme illustré sur la (figure I.1), ce système est constitué de trois principaux blocs :

I.2.1 Le Bloc Moteur Electrique

Le moteur électrique est l'élément indispensable du véhicule électrique, il doit être robuste, fiable et pratiquement sans entretien, ce qui est plus indiqué pour le moteur à induction. Selon le type de propulsion, il peut y avoir un ou plusieurs moteurs. Par ailleurs, différents types de moteurs peuvent être utilisés pour la propulsion, et cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes du type de propulsion (véhicule lourd ou léger, faible ou grande puissance, etc.).

I.2.2 Le Bloc de Commande et de Contrôle

Le bloc de commande et de contrôle "Contrôleur" est le cerveau du système de propulsion, son rôle est de capter les informations d'état du système (vitesse de rotation, courants, etc.) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie. [2]

I.2.3 Le Bloc de Puissance

Une autre vision sur les systèmes électroniques a émergé, cela est dû à l'évolution des semi-conducteurs. En effet, les convertisseurs de puissance permettent maintenant d'élargir le champ d'application des machines électriques. Un convertisseur de puissance est un dispositif de puissances qui assure la liaison entre la source "batteries" et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin.

I.3. DESCRIPTION GENERALE DE LA CHAÎNE DE TRACTION

La chaîne de traction électrique est l'organe principal du véhicule électrique.

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.

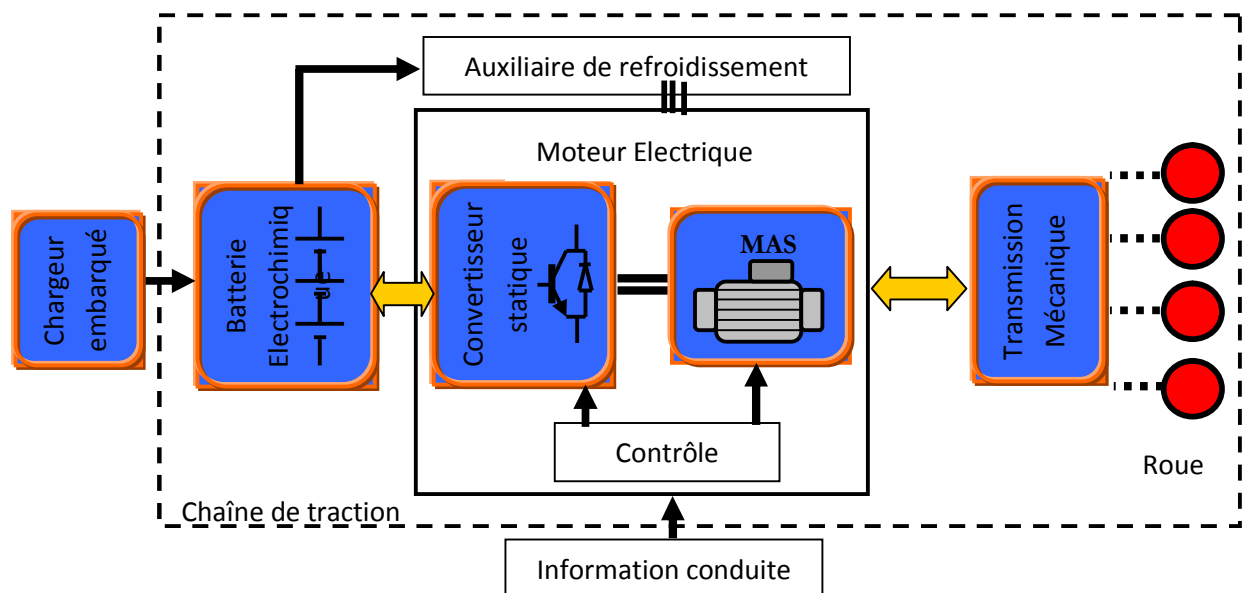


Fig. I.2. Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique

I.3.1. Motorisations pour la chaîne de traction

Depuis le début du siècle, le principe même des moteurs électriques n'a guère évolué. En revanche, les progrès de l'électronique de puissance ont permis de faciliter la commande

de ces moteurs et ont rendu possible l'apparition de nouveaux types à rendement plus élevé. Ainsi, les hacheurs de courant sont devenus indispensables pour la commande des moteurs à courant continu. Quant aux moteurs à courants alternatifs, synchrones ou asynchrones, se sont les convertisseurs de courant continu/alternatif, appelés onduleurs, qui ont permis d'apporter les plus grosses améliorations.

En simplifiant, on peut classer les différentes chaînes de traction électrique selon six catégories à partir de solutions comportant plus de mécanique vers des solutions plus élaborées sur le plan électrique et électronique.

I.3.1.1.Moteur à courant continu à excitation séparée

Les moteurs à courant continu à excitation séparée, sont commandés par un hacheur de puissance agissant sur l'induit du moteur et un hacheur de plus faible puissance commandant l'excitation ou inducteur. Dans la traction électrique automobile, c'est le système le plus employé. En effet, le moteur de LEROY Sommer qui entraîne la plupart des véhicules électriques en circulation est un moteur à courant continu conçu à partir des modèles destinés à la traction industrielle. L'électronique permet d'optimiser la valeur de consigne du courant d'induit et d'excitation, en fonction de la caractéristique couple/vitesse désirée, grâce à un système de thyristors relativement simple et peu coûteux.

I.3.1.2.Moteurs à courant continu à aimant permanent

Les moteurs à courant continu à aimant permanent sont actuellement en pleine expansion dans l'industrie. Cette technologie permet d'obtenir des moteurs encore plus légers avec un meilleur rendement que les précédents. Malheureusement, ces aimants font appel pour leur composition, à des terres rares, dont le coût est très élevé. Ils sont également très sensibles aux montées en température.

I.3.1.3.Moteurs asynchrones

Deux types de machine asynchrone peuvent être distingués : la machine asynchrone à rotor à bagues et la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette dernière est la plus répandue. Son niveau de robustesse et de fiabilité allié à un faible coût en a fait une machine de référence.

Leur commande nécessite l'emploi d'un onduleur électronique. Sa fonction est de convertir le courant continu des batteries en courant alternatif triphasé, et de contrôler avec précision le fonctionnement du moteur pendant les phases d'accélération et en régime de croisière. De plus, l'onduleur transforme le courant alternatif généré par le moteur durant les décélérations et le freinage en courant continu pour recharger la batterie et améliorer le frein moteur. Pour assurer la régulation, l'onduleur augmente ou diminue la fréquence du courant

alternatif fourni au moteur en fonction de la demande du conducteur, donc de la position de la pédale d'accélérateur. Cette fonction de régulation sera réalisée dans un futur proche par un système de contrôle vectoriel. L'arrivée de l'électronique a surtout permis d'augmenter considérablement la vitesse de rotation et de passer de 3000 tr/mn à 15000 tr/mn.

I.3.1.4.Moteurs synchrones à aimants permanents

Les moteurs synchrones à aimants permanents ont une puissance massique et un rendement élevés. Leurs coûts élevés restent le plus gros handicap. Des ferrites peuvent être utilisées mais elles ne présentent pas des performances excellentes. Par contre, les aimants à terres rares, Samarium-Cobalt ou Fer-Néodyme-bore sont plus intéressants. Un des inconvénients de cette machine est l'impossibilité du réglage de l'excitation.

Le champ de l'aimant varie avec le temps et la température mais de manière non significative. Pour atteindre des vitesses élevées, il sera nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes joule statorique.

I.3.1.5.Moteur synchrone à inducteur bobiné

Ce moteur peut présenter une alternative très intéressante. En comparaison avec le moteur synchrone à aimants permanents, elle dispose d'un degré de liberté supplémentaire : le réglage du flux d'excitation. En effet, cela ouvre une large palette d'algorithmes de commande : compensateur synchrone, facteur de puissance unitaire, couple maximal, minimisation des pertes.

I.3.1.6.Moteur à réluctance variable

Ce moteur présente un faible coût. Néanmoins, la principale difficulté reste la commande. En effet, ce moteur produit un couple très pulsatoire à haute vitesse engendrant des problèmes de vibrations mécaniques et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents. Ceci est une des conséquences de son principe de fonctionnement.

D'autres technologies comme les *moteurs-roues* encore en phase de mise au point [7], pourraient présenter des avantages spécifiques indéniables qui devraient jouer un rôle décisif dans le développement du véhicule électrique.

Le tableau (I.1) récapitule les avantages et les inconvénients des différents moteurs électriques de motorisation de la chaîne de traction d'un véhicule [8], [2].

	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Moteur à courant continu à excitation série	<ul style="list-style-type: none"> - Commande par un seul hacheur ; - Défluxage automatique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Freinage dynamique difficile à mettre en place ; - Prix du moteur élevé ; - Le procédé de fabrication est difficile à automatiser ; - Puissance massique relativement faible.
Moteur à courant continu à excitation séparée	<ul style="list-style-type: none"> - Commande par un seul hacheur de puissance sur l'induit et un hacheur de faible puissance pour la commande du courant d'excitation; - Défluxage facile. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix du moteur élevé ; - Le procédé de fabrication est difficile à automatiser ; - Puissance massique relativement faible.
Moteur à courant continu à aimants permanents	<ul style="list-style-type: none"> - Commande avec un seul hacheur; - freinage relativement simple à mettre en oeuvre ; - excellent rendement (surtout avec aimants terres rares). 	<ul style="list-style-type: none"> - Défluxage difficile ; - prix élevé (voire prohibitif avec des terres rares).
Moteurs asynchrones	<ul style="list-style-type: none"> - Facilement industrialisables, donc de faible prix de revient ; - puissance massique élevée ; - rendement acceptable - moteur robuste ; - défluxage automatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Electronique relativement chère ; - tension d'alimentation élevée pour faciliter la fabrication du moteur.
Moteurs synchrones à rotor bobine	<ul style="list-style-type: none"> - Défluxage facile ; - alimentation simple et moins chère. 	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie peu courante; - fragilité du système bagues-balais.
Moteurs synchrones à aimants permanents	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance massique élevée (avec aimants terres rares) ; - rendement élevé (avec aimants terres rares) ; - freinage dynamique relativement facile. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix élevé (surtout avec aimants terre rares) ; - défluxage difficile ; - électronique de prix élevé.
Moteur à réluctance variable	<ul style="list-style-type: none"> - Couple massique élevé (en théorie). 	<ul style="list-style-type: none"> -Mauvais rendement dû aux fréquences élevées au mauvais facteur de puissance ; - Prix élevé de l'électronique de puissance ; - Les moteurs très performants en puissance massique ont un entrefer faible et sont relativement fragiles.

Tableau (I.1): Avantages et Inconvénients des différents moteurs électriques de motorisation de la chaîne de traction

I.3.2. Convertisseur statique

Suivant l'utilisation de machines à courant continu ou à courant alternatif, les convertisseurs d'énergie devront être différents à savoir :

I.3.2.1. Les redresseurs (AC/DC)

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

I.3.2.2. Les hacheurs (DC/DC)

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

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

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

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

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

I.3.2.3. Les onduleurs (DC/AC)

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

le réglage de la vitesse du véhicule. La conversion DC-AC peut être réalisée de multiples manières. Mais l'usage, les particularités des véhicules routiers et la rationalisation des solutions industrielles ont conduit à privilégier une structure d'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montés en antiparallèle et commandés selon une loi du type MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsion, en anglais (PMW). Ce type de montage permet d'associer une source de tension (de type batterie) et un récepteur de type source de courant (moteur asynchrone, moteur synchrone bobiné, à aimant permanent ou à réluctance variable). La méthode de commande par MLI présente deux avantages importants:

- Elle repousse vers les fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie ce qui facilite le filtrage de cette tension ;
- Elle permet de faire varier le fondamental de la tension de sortie. [16]

I.3.3. Contrôle électronique

Le contrôle électronique permet d'effectuer une optimisation au niveau de la batterie et du moteur et de faire en permanence un auto-diagnostic. Il gère tous les ordres du conducteur en fonction de la capacité du véhicule électrique. C'est la raison pour laquelle, il reçoit une quantité d'informations telles que la vitesse de rotation, et les couples électromagnétiques. Cela lui permet, d'une part, d'effectuer un bilan sur l'état du véhicule, et d'autre part, d'ajuster les différentes commandes appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie.

Ainsi, l'une des priorités de la commande est d'optimiser le rendement de la chaîne de traction quels que soient les points de fonctionnement. Les paramètres d'alimentation du moteur électrique devront ainsi être constamment optimisés, non seulement en fonction du couple et de la vitesse, mais aussi en fonction de la tension batterie fortement fluctuante en fonction de l'état de charge, de l'intensité consommée et de son signe [1]. Ceci est parfaitement possible avec des processeurs numériques maintenant couramment utilisés pour le pilotage des moteurs électriques.

I.3.4. Transmission mécanique

L'objet de la transmission mécanique est de relier la source d'énergie, le(s) moteur(s) électrique(s), aux roues motrices du véhicule ; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule.

Un moteur électrique a un volume et une masse fonctions de son couple, aussi pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le

moteur à un réducteur mécanique. Ceci permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation [8]. Ainsi, a priori, on a tout intérêt à maximiser la vitesse du moteur électrique sachant qu'il existe des limites de faisabilité et que la masse du réducteur reste généralement faible devant celle du moteur. Cependant, des problèmes technologiques difficiles se posent comme la réalisation des pignons à très grande vitesse et l'obtention de bons rendements avec de grands rapports de réduction [9].

Habituellement, un bon réducteur de rapport m permet d'obtenir un rendement d'environ 98%. Les valeurs de m , couramment rencontrées dans la transmission des véhicules électriques, sont comprises entre 5 et 12 environ pour les réducteurs, et 8 à 25 pour les boîtes de vitesse [9].

Les avantages de la transmission mécanique sont nombreux:

- Elle évite un surdimensionnement du moteur et permet donc de limiter les coûts du convertisseur statique et les batteries. En effet, le réducteur permet de réduire le couple que doit fournir le moteur et donc la masse et le coût de celui-ci.
- Elle autorise également des puissances massiques plus élevées.

I.3.5.Source d'énergie

Le stockage de l'énergie électrique est le problème majeur du véhicule électrique. Dans cette partie, nous présenterons de manière succincte deux voies technologiques possibles : les batteries et les piles à combustible. Ces éléments permettant de stocker de l'énergie doivent remplir les conditions suivantes [10].

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

I.3.5.1.Batteries

Les technologies qui apparaissent comme les plus fiables, sont la batterie au plomb et la batterie Nickel-Cadmium. La batterie au plomb est peu onéreuse et demande peu d'entretien. Néanmoins, ses performances ne sont pas très élevées et elle possède une durée de vie trois fois moindre que celle des batteries Nickel-Cadmium. Cette dernière possède une énergie massique plus importante et est entièrement recyclable. A titre d'exemple, le tableau ci-

dessous présente quelques chiffres permettant de situer les différentes technologies de batteries :

	Plomb Acide Pb- PbO ₂	Nickel Cadmium NiCd	Nickel Métal Hydruce NiMH	Sodium Soufre NaS	Lithium Sulfure de Fer LiFeS ₂
Energie massique (Wh/kg)	40	60	80	100	150
Puissance massique (W/kg)	90	200	200	100	250
Durée de vie Nombre de cycles	100	2000	1500	800	1000
Energie volumique (Wh/l)	90	120	130	150	180
Poids pour 20 kwh (kg)	600	300	250	200	150

Tableau (I.2) : Technologies des batteries

I.3.5.2. Pile à combustible

Une pile à combustible 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 principe de fonctionnement d'une pile à combustible se résume dans une combustion électrochimique, contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur à évacuer selon une réaction chimique globale universellement connue.

Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments [11] :

- deux électrodes,
- un électrolyte.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène).

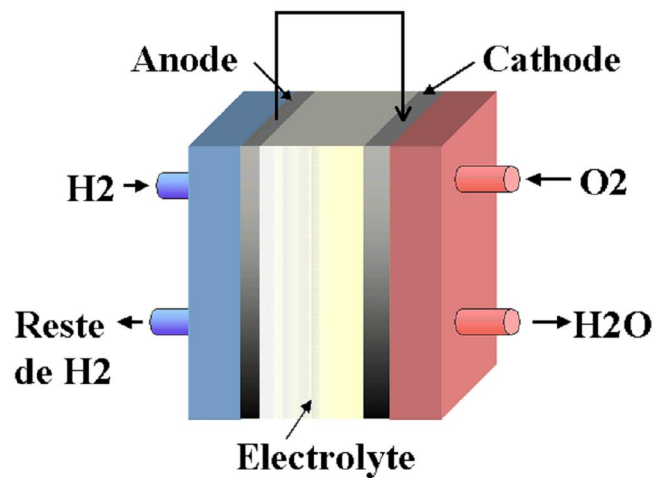


Fig. I.3. Schéma d'une PAC

La pile à combustible, constitue une autre source d'énergie pour le véhicule électrique. Cela permettrait de passer à une autonomie supérieure à 400 km. [13]

I.4. DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

On envisage actuellement deux types de véhicules électriques :

- les véhicules à motorisation purement électrique : véhicules électriques ;
- les véhicules à motorisation mixte électrique et thermique : véhicules hybrides.

Le présent chapitre ne concerne que les véhicules électriques, qui se trouvent actuellement au stade de la présérie industrielle. Notons, de plus, que la motorisation hybride actuelle, outre son coût élevé, présente un rendement global faible, car l'énergie primaire subit de très nombreuses conversions (thermodynamique, mécanique, électrodynamique, électrochimique).

Notre objectif, n'est pas de faire un état de la technologie des véhicules électriques, mais d'établir une liste non exhaustive de quelques ébauches de solutions aux problèmes de la motorisation d'un véhicule électrique. Cette dernière, est proposée sous une forme soit monomoteur, soit multi-moteurs

I.4.1. Véhicule électrique mono-moteur

Le véhicule électrique mono-moteur présente une seule chaîne de traction, figure (I.4).

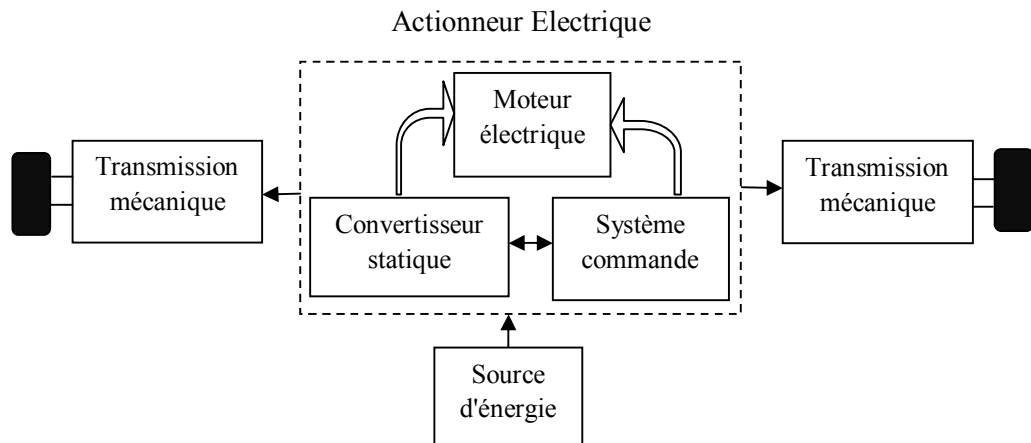


Fig. I.4. Chaîne de traction mono-moteur

La figure (I.5) montre trois exemples schématiques de motorisations mono-moteur [2]:

- Un seul moteur électrique + réducteur fixe + différentiel, figure (I.5.a);
- Un seul moteur électrique + embrayage + BV + différentiel, figure (I.5.b);
- Un seul moteur électrique + boîte de transfert + BV + deux différentiels, figure (I.5.c);

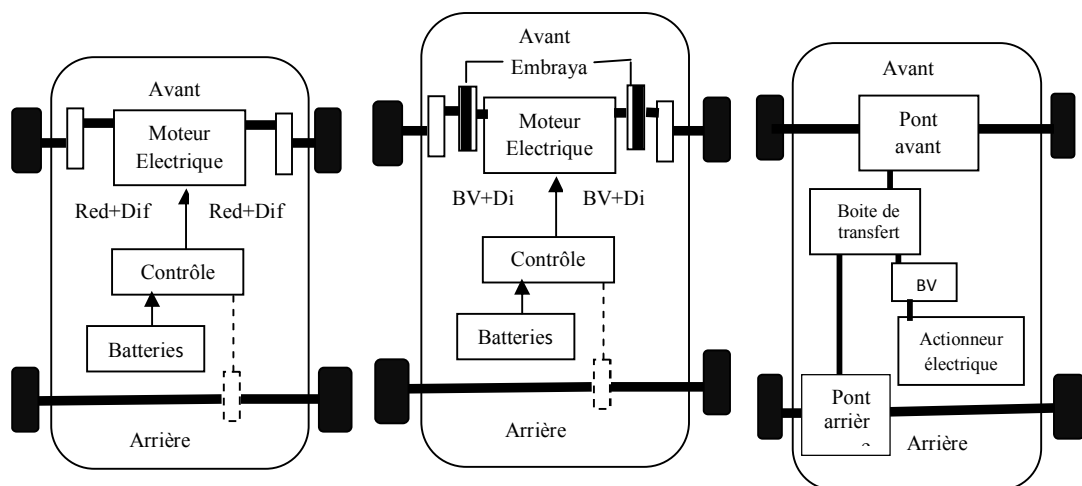


Fig. I.5.a

Fig. I.5.b

Fig. I.5.c

Fig. I.5. Exemples schématiques de motorisations mono-moteur

I.4.2. Véhicule électrique multi-moteurs

Le véhicule électrique multi-moteurs présente plusieurs chaînes de traction indépendantes, (Fig. I.6). Il peut sembler a priori intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme la boîte de vitesse, l'embrayage et le différentiel mécanique.

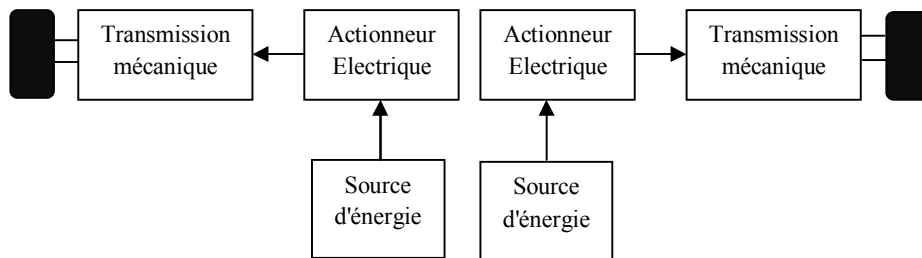


Fig. I.6. Véhicule multi-moteurs

Un véhicule électrique à batterie utilise exclusivement l'énergie emmagasinée dans un bloc-batterie du véhicule, rechargé à partir d'un réseau électrique local, qui la fournit, ensuite aux moteurs électriques servant à propulser le véhicule. L'autonomie des véhicules électriques à batterie dépend du type de batterie qui y est installé.

On peut donc réaliser des véhicules à deux roues motrices, soit à l'arrière figure (I.7.a) soit à l'avant figure (I.7.b), ou encore à quatre roues motrices figure (I.7.c) [2].

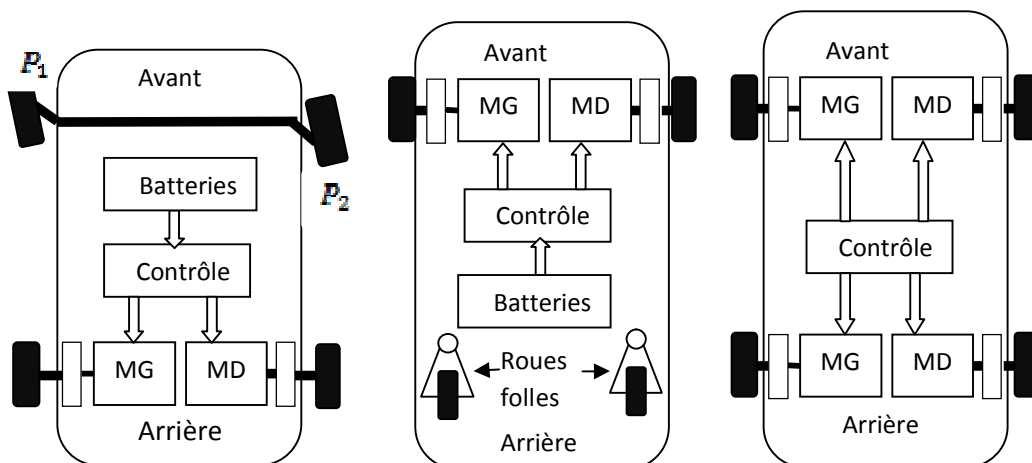


Fig. I.7.a

Fig. I.7.b

Fig. I.7.c

Fig. I.7. Exemples schématiques de motorisations multi-moteurs

I.5. CRITERES D'OPTIMISATION GLOBALE DE LA CHAÎNE DE TRACTION

La chaîne complète de traction d'un véhicule électrique actuel comprend la batterie électrochimique ou la pile à combustible, le ou les convertisseur(s) électronique(s) d'alimentation du ou des moteur(s) de traction et la ou les transmission(s) mécanique(s) aux roues. L'optimisation de cet ensemble complexe est un problème difficile car la contrainte principale est économique.

I.5.1. Optimisation du moteur

On se propose d'analyser l'influence de la masse active du moteur sur son rendement et de montrer qualitativement qu'il existe un optimum de masse pour maximiser l'autonomie de la batterie. Il est en effet connu que la réduction des dimensions, à couple donné, conduit à une augmentation des pertes Joules donc à une détérioration du rendement, en revanche pour atteindre des rendements très élevés, il faut faire croître fortement le volume et la masse [2]. Ainsi, si la masse est trop faible, la dégradation du rendement augmente la consommation. A l'opposé, si l'on souhaite avoir un très bon rendement, la masse du moteur devient trop élevée et augmente à nouveau la consommation [3]. Il existe donc une valeur optimale de la masse du moteur.

L'optimum est particulièrement difficile à déterminer car le rendement du moteur n'est pas constant dans le plan couple-vitesse et il faut raisonner sur un cycle bien défini.

I.5.2. Optimisation du convertisseur électronique et de la batterie

Il faut considérer que le rendement du convertisseur électronique et de la batterie sont indirectement liés à celui du moteur. En effet, si le rendement moteur diminue, la puissance qu'il absorbe augmente ce qui fait décroître le rendement du convertisseur et de la batterie. En fait, il faut éviter de trop minimiser la masse du moteur.

I.5.3. Optimisation du réducteur

Pour vérifier l'engrenage le plus performant qui permet au véhicule une force suffisante pour monter une pente et de parcourir une distance maximale, différents engrenages sont testés entre l'arbre du moteur et celui des roues. Celui-ci doit se trouver entre les limites basses et hautes, définies par les valeurs extrêmes de couple et de vitesse du moteur et de la charge, respectivement indicées m_{max} et l_{max} telles que [8]:

$$\eta = \frac{C_{lmax}}{C_{mmax}} = \frac{W_{lmax}}{W_{mmax}}$$

Compte tenu du fait que le réducteur n'est pas parfait mais possède un rendement, lié à son rapport de réduction, les contraintes de couple et de puissance sur l'actionneur doivent en tenir compte, pour tout moteur possible. En fait, il est préférable de choisir l'ensemble

moteur-réducteur capable d'entraîner la charge qui impose un profil cinématique cyclique défini par une vitesse, une accélération et un couple de charge variable en fonction du temps sur la durée de travail du cycle.

CONCLUSION

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

Nous avons abordé par la suite, la problématique de la systémique dans le véhicule électrique. Nous avons mis en évidence la présence de couplages entre les éléments qui le composent. Ceci nous oriente vers des démarches de modélisation et de commande considérant la globalité de l'application, plutôt qu'une approche locale, retenue dans ce travail.

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

CHAPITRE II

MODELISATION D'UNE CHAINE DE TRACTION DU VEHICULE ELECTRIQUE

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.

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

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

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

II.1. MODELISATION DYNAMIQUE DU VEHICULE

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, 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.

II.1.1. Structure du VE à deux roues motrices indépendantes en avant

Il est possible de réaliser une motorisation électrique sur de nombreux véhicules. Si des accélérations importants sont souhaitées, il faut bien entendu accroître la puissance impulsionnelle, sachant que la puissance maximale est une contrainte de conception à la fois pour les batteries et pour les moteurs et leurs alimentations électriques. L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le ou les moteurs électriques, aux roues motrices du véhicule, il s'agit d'adapter la vitesse de rotation Ω et le couple C_{em} du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule, c'est-à-dire le couple résistant aux roues. Nous avons donc retenu comme système d'étude un véhicule électrique pur à entraînement direct constitué :

- d'un châssis.
- de deux moteurs roues de type asynchrones.
- d'une batterie d'accumulateurs.
- d'un onduleur triphasé pour chaque moteur.

Nous nous intéressons au couplage entre les deux grandes parties de notre système : la partie mécanique qui traite les aspects dynamiques du véhicule et la partie électrique qui représente la motorisation électrique à bord.

Le véhicule sur lequel sera implémentée l'architecture de contrôle est schématisé par une plate-forme rectangulaire montée sur quatre roues. Le véhicule est constitué de deux roues motrices parallèles en avant. Chacune de ces deux roues est entraînée indépendamment l'une de l'autre par un actionneur asynchrone. L'équilibre de la plate-forme est garanti par deux roues libres à l'arrière.

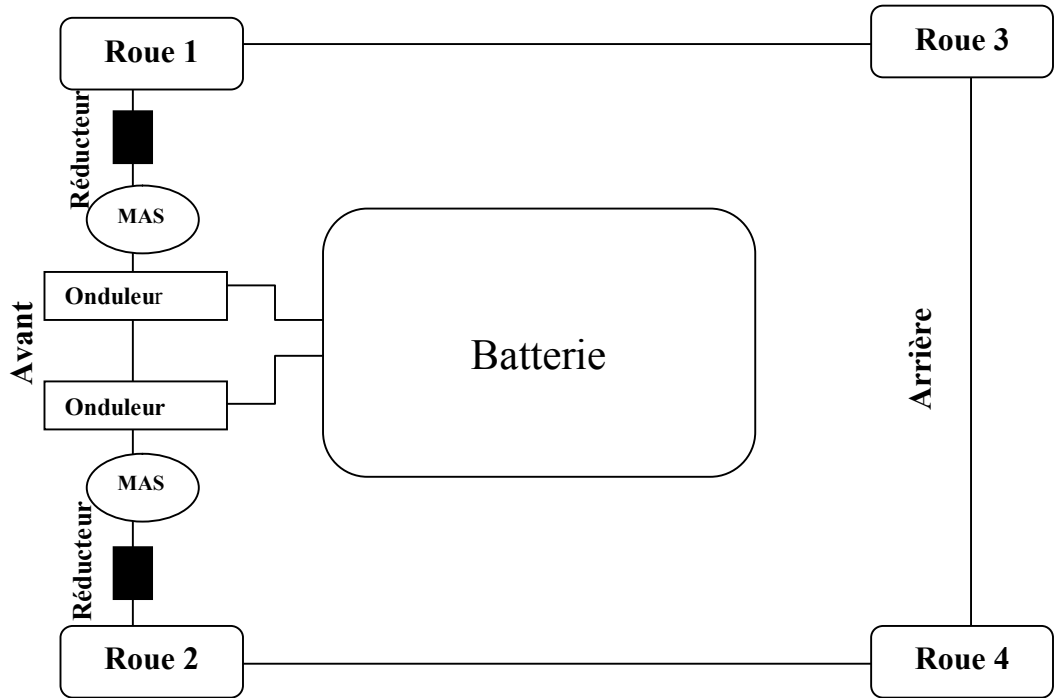


Fig. II.1. Structure du véhicule électrique à deux roues motrices

II.1.2. 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 γ qu'il peut fournir. Cela se traduit par :

$$\gamma \leq \gamma_{max} \tag{II.1}$$

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 :

$$\gamma_{min} \leq \gamma \leq \gamma_{max} \tag{II.2}$$

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 :

$$0 \leq V_x \leq V_{xmax} \tag{II.3}$$

$$-\omega_{max} \leq \omega \leq \omega_{max} \tag{II.4}$$

c) Contrainte de non-glissement

La contrainte de non-glissement réduit encore l'ensemble des accélérations admissibles. Il est nécessaire de prendre en compte les glissements en faisant référence au coefficient de glissement μ qui définit dans quelles circonstances un glissement aura lieu connaissant la force normale à la surface de contact.

Si $F_{\text{tangentielle}} \geq \mu F_{\text{normale}}$ alors il y aura glissement [10], [11]. Donc, on peut exprimer la relation précédente comme suit :

$$M\gamma \geq \mu Mg \quad (\text{II.5})$$

Ce qui implique :

$$\sqrt{V_x^2 + V_y^2} \geq \mu g \quad (\text{II.6})$$

Où :

M : Masse du véhicule ;

γ : Accélération tangentielle du véhicule ;

g : Accélération de pesanteur.

donc la contrainte de non-glissement se traduit par :

$$V_x^2 + V_y^2 \leq \mu^2 g^2 \quad (\text{II.7})$$

Quand cette expression n'est pas vérifiée, il s'ensuit que le véhicule ne peut suivre sa trajectoire. Cette contrainte de non-glissement est une forme extrêmement simplifiée. Cependant, les modèles d'adhérence aujourd'hui disponibles sont souvent compliqués et font appel à de nombreuses données empiriques. Pour donner une idée de la complexité du phénomène d'adhérence, on notera que la force d'adhérence est fonction de nombreux paramètres pas toujours bien maîtrisés,[11].

$F_{\text{adhérence}} = f(\text{Poids, Pression des pneus, Température, Etat de revêtement de la route})$.

d) Force d'entraînement

Quand le véhicule se déplace, les couples des moteurs appliqués aux roues motrices produisent une force F_r qui est parallèle à l'axe X_v . Cette force est contrainte par l'expression suivante :

$$0 \leq F \leq F_{\text{max}} \quad (\text{II.8})$$

II.1.3. Efforts et couples résistant au déplacement

L'effort total F_{tot} nécessaire au déplacement du véhicule est la somme des différentes composantes issues du bilan des forces mécaniques appliquées au véhicule.

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{roul}} + F_{\text{aero}} + F_{\text{pente}} + F_{\text{acc}} \quad (\text{II.9})$$

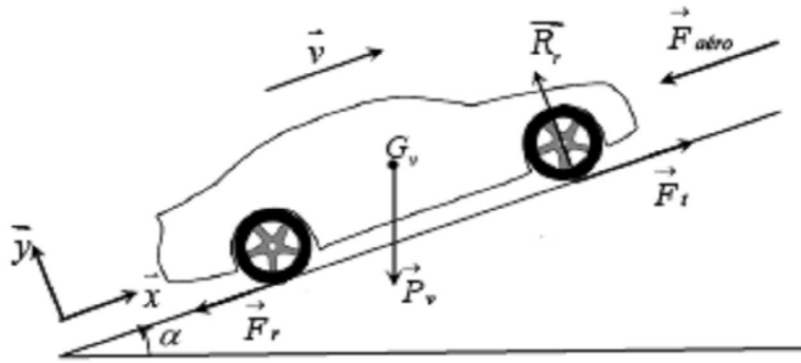


Fig. II.2. Les forces sur le véhicule

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

$$F_{roul} = [C_{rr_av} m_{av} + C_{rr_ar} m_{ar}] g \approx g M_v C_{rr_moy} \quad (II.10)$$

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

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

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho S_f C_{px} (V_{veh} \pm V_{vent})^2 \quad (II.11)$$

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

$$F_{pente} = g M_v \sin(\alpha_v) \quad (II.12)$$

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

$$F_{acc} = M_v \frac{dV_{veh}}{dt} = M_v \gamma \quad (II.13)$$

-Finalement, l'effort total de résistance au déplacement du véhicule vaut

$$F_{tot} = g M_v C_{rr_moy} + \frac{1}{2} \rho S_f C_{px} (V_{veh} - V_{vent})^2 + g M_v \sin(\alpha_p) + M_v \gamma \quad (II.14)$$

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

$$C_r = F_{tot} R_\omega \quad (II.15)$$

Où R_ω est le rayon de la roue.

II.1.4. Conditions de déplacement du véhicule

Pour faire avancer un véhicule il semble qu'il suffise de communiquer aux roues un effort susceptible de vaincre la résistance au roulement du véhicule. Ce n'est pas toujours le cas, car la roue peut tourner en s'accrochant sur le sol (adhérence) mais peut également glisser (perte d'adhérence).

Si on désigne par F_m la force appliquée aux roues, ou encore par C_m le couple de moteur, la condition de traction du véhicule est la suivante :

$$f_r M g < F_m < \mu M g \quad \text{Ou} \quad \text{encore} \quad f_r P < \frac{C_m}{r} < \mu P$$

(II.16)

r : étant le rayon de la roue.

Les trois autres cas suivants peuvent se présenter [7] :

$F_m < f_r M g < \mu M g$ Le couple est insuffisant, le véhicule reste immobile.

$f_r M g < \mu M g < F_m$ Le couple est trop grand, la rotation des roues fait avancer le véhicule mais il y a patinage.

$\mu M g < f_r M g < F_m$ L'adhérence est exceptionnellement plus faible que la résistance au Roulement : les roues patinent et le véhicule reste sur place.

II.1.5. Equations de mouvement

Dans ce paragraphe, nous décrivons la modélisation du véhicule en considérant un déplacement le long des axes x, y, ainsi qu'une rotation autour l'axe Z. Dans ce cas, l'automobile peut être assimilée à un corps solide et les contacts des pneus au sol à des points. Une symétrie par rapport au plan vertical (XoZ) et une équi-répartition des charges sont supposées. Pour décrire la cinématique du véhicule, nous employons un modèle à trois degrés de liberté. Le système d'axes cartésien (XoY) est utilisé pour étudier le déplacement du centre de gravité (CG) du véhicule auquel on associe un système d'axes (x,y). On définit aussi l'angle de lacet (ψ) entre les repères \overline{ox} et \overline{oX} (Fig. II.3).

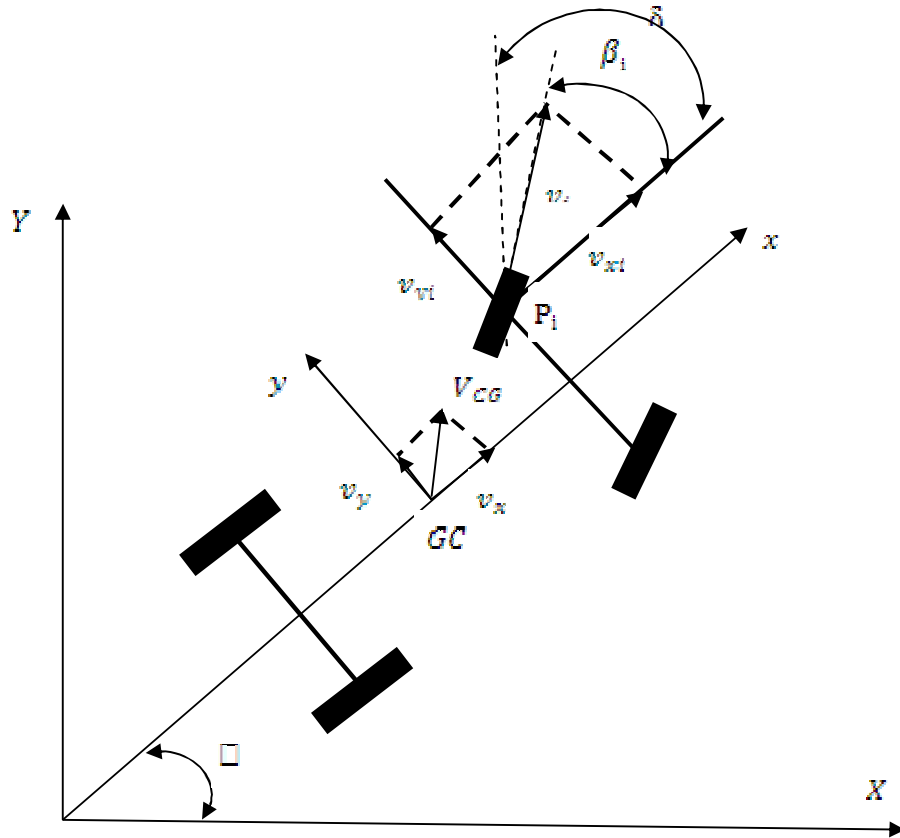


Fig. II.3. Mouvement du véhicule dans le système d'axes (X, Y)

Ainsi, l'énergie cinétique du véhicule, en négligeant celle des roues, s'exprime par :

$$E_c = 0.5 \times m_v \times (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + 0.5 \times I_v \times \dot{\psi}^2 \quad (\text{II.17})$$

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

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_c}{\partial q_i} = Q_i \quad (\text{II.18})$$

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

$$\begin{aligned} M_v \ddot{X} &= F_x \\ M_v \ddot{Y} &= F_y \\ I_v \ddot{\psi} &= M_z \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

A l'aide d'une simple rotation d'un angle ψ autour de l'axe \vec{oz} , on peut évaluer le vecteur de vitesse associé au CG du véhicule :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ r \end{pmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Où v_x, v_y sont les vitesses du véhicule dans le plan (x,y), et $r = \dot{\psi}$ est sa vitesse de lacet.

En dérivant (II.19) par rapport au temps, on obtient les accélérations :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\dot{X}) &= \dot{v}_x \cos(\psi) - v_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{v}_y \sin(\psi) - v_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d}{dt}(\dot{Y}) &= \dot{v}_x \sin(\psi) + v_x \dot{\psi} \cos(\psi) + \dot{v}_y \cos(\psi) - v_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \frac{d}{dt}(\dot{\psi}) &= \dot{r} \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

En tenant compte de (II.10), dans les équations (II.12), on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{F_X}{M_v} &= (\dot{v}_x - \dot{\psi} v_y) \cos(\psi) - (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) \sin(\psi) \\ \frac{F_Y}{M_v} &= (\dot{v}_x - \dot{\psi} v_y) \sin(\psi) + (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) \cos(\psi) \\ \frac{M_x}{J_v} &= \dot{r} \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

En substituant l'équation (II.19) dans (II.21), on obtient les expressions des accélérations au centre de gravité du véhicule comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{F_x}{M_v} &= (\dot{v}_x - r v_y) \\ \frac{F_y}{M_v} &= (\dot{v}_y + r v_x) \\ \frac{M_x}{J_v} &= \dot{r} \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

Pour établir les forces qui agissent sur le véhicule, on considère le repère (x, y) avec un braquage d'un angle δ des roues avant. Les forces qui agissent à l'interface roue-sol sont montrées sur la (Fig. II.5).

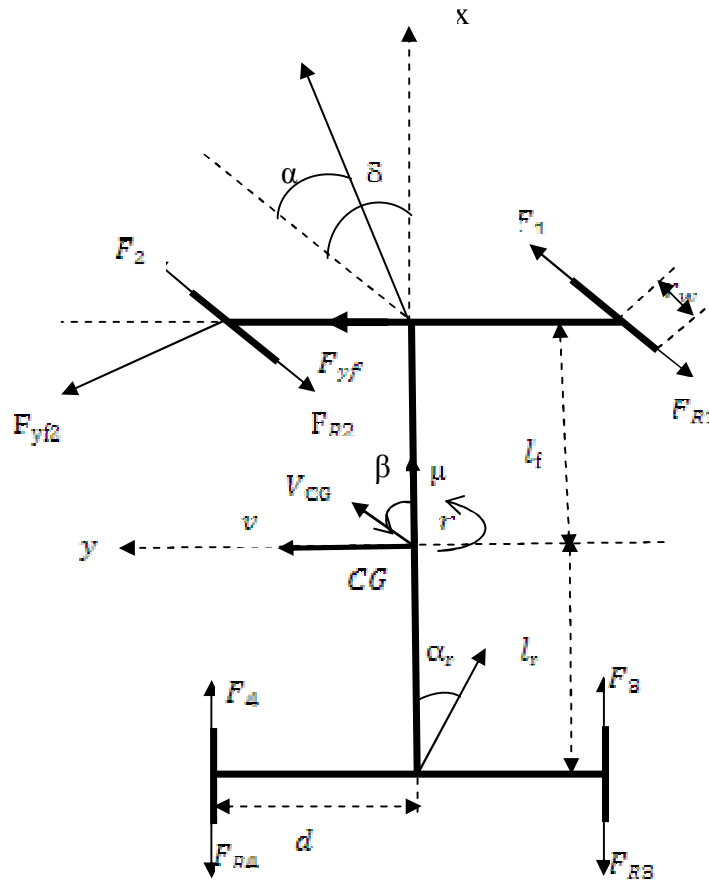


Fig. II.4. Forces au niveau des roues du véhicule, dans le plan (x, y)

La résultante des forces F_x dans la direction (x), incluant la force aérodynamique et la résistance due à la pente α_p à gravir, est [31] :

$$F_x = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cos(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \sin(\delta_i) - \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_{px} - M_v g \sin(\alpha_p) \quad (II.24)$$

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

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

$$F_y = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \sin(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cos(\delta_i) - \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_{py} - M_v g \sin(\alpha_p) \quad (II.25)$$

Où $M_v g \sin(\alpha_p)$ est la force due à la pente transversale α_p de la route.

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

$$M_z = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \sin(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cos(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cos(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \sin(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 M_{ai} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_{Mz} \quad (II.26)$$

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

En substituant (II.23), (II.24) et (II.25) dans (II.22), on obtient les expressions définitives des équations de mouvement :

$$\begin{aligned}
 M_v(\dot{v}_x - rv_y) &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cos(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \sin(\delta_i) - \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 SC_{px} - M_v g \sin(\alpha_{pt}) \\
 M_v(\dot{v}_y + rv_x) &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \sin(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cos(\delta_i) - \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 SC_{py} - \\
 &\quad M_v g \cos(\alpha_{pt}) \\
 J_v \dot{r} &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \sin(\delta_i) x_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cos(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cos(\delta_i) y_i \\
 &\quad + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \sin(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 M_{\alpha i} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 SC_{Mz}
 \end{aligned} \tag{II.27}$$

II.1.6. Comportement longitudinal du pneumatique

Lorsque le véhicule roule en ligne droite, la force latérale est nulle, seules les forces longitudinale F_x et verticale F_z sont considérées.

De manière schématique, le pneumatique étant élastique, il est nécessaire de mettre la bande de roulement en tension, et donc d'appliquer une force minimale avant de pouvoir déplacer le véhicule. Une fois la roue en mouvement, le principal phénomène qui intervient dans le calcul de la force longitudinale est le glissement longitudinal.

II.1.6.1. Glissement longitudinal

Le glissement longitudinal est dû à la différence entre la vitesse de translation du centre de la roue et de celle de son point de contact avec le sol, figure II.5.

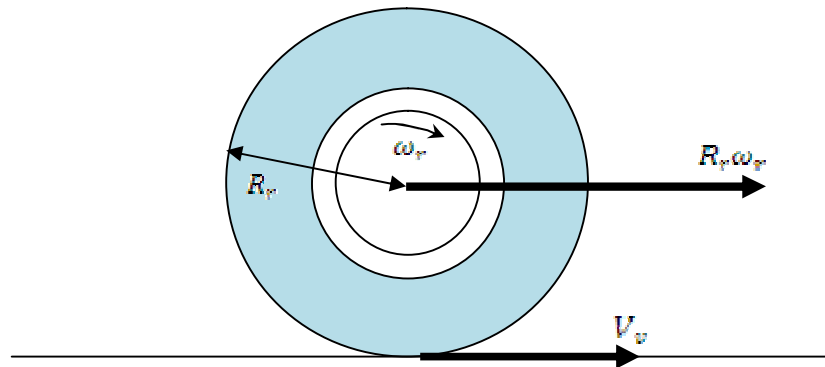


Fig. II.5. Différence entre les vitesses centrales et radiales de la roue

On note V_v la vitesse linéaire de translation du point de contact de la roue avec la route, ω_r , la vitesse angulaire de rotation de la roue et R_r le rayon de roulement.

Classiquement, l'expression du glissement longitudinal est défini pour les cas suivants :

- lors d'une décélération ($\omega_r \cdot R_r - V_v < 0$) :

$$S_x = \left(-1 + \frac{\omega_r \cdot R_r}{V_v} \right) * 100 \quad (\text{II.28})$$

- lors d'une accélération ($\omega_r \cdot R_r - V_v > 0$):

$$S_x = \left(1 - \frac{V_v}{\omega_r \cdot R_r} \right) * 100 \quad (\text{II.29})$$

- lorsque la roue est dite ((libre)) ($\omega_r \cdot R_r = V_v$):

$$S_x = 0 \quad (\text{II.30})$$

II.1.6.2. Angle de glissement

Afin d'apprécier les amplitudes des forces latérales s'exerçant sur la roue, on utilise l'angle de glissement. En faisant référence à la figure (Fig. II.1), cet angle (α_i) s'exprime, pour un angle de braquage δ_i , comme suit :

$$\alpha_i = \beta_i - \delta_i \quad (\text{II.31})$$

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

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{v_{yi}}{v_{xi}}\right) = \arctan\left(\frac{v_y + \dot{\psi} X_i}{v_x - \dot{\psi} Y_i}\right) \quad (\text{II.32})$$

II.1.6.3. Comportement d'une roue vis-à-vis du sol

La puissance mécanique de la chaîne de traction électrique est transmise au véhicule à travers les roues. Les efforts qui prennent naissance sur ces dernières, lors de l'application d'un effort de traction et/ou l'engagement du véhicule dans un virage, dépendent crucialement des états du pneumatique, du sol et de l'interaction entre eux. Soit une roue sollicitée par une force latérale F_y (cas d'un virage par exemple), sur laquelle on applique un effort de traction via le couple Γ_{m2} [32]. Sous l'action de Γ_{m2} , la roue voit naître une force F_{tx} telle qu'il est présenté sur la figure (II.4).

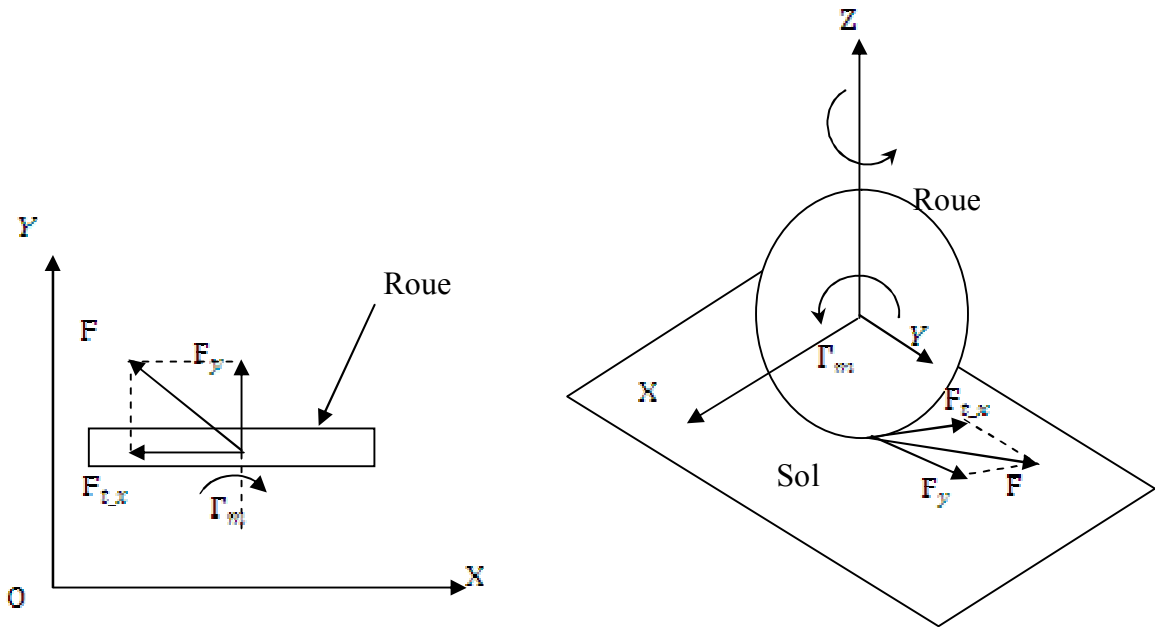


Fig. II.6. Efforts sur une roue sous l'action d'un couple moteur

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

$$F = \sqrt{F_y^2 + F_{Lx}^2} \tag{II.33}$$

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

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

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

rotation initiale. Un freinage trop important conduit généralement au blocage de la roue (roue bloquée) [33].

En résumé, on peut dire que les différents états de la roue dépendent des efforts qui lui sont appliqués et de la vitesse de rotation ω . Le tableau (II.1) définit le facteur de glissement longitudinal (par rapport au sens de rotation de la roue) :

Etat de la roue	Facteur de glissement s	Valeurs
roue tractée	$s = \frac{w - w_0}{w}$	$s = 0$
roue motrice	$s = \frac{w - w_0}{\max(w, w_0)}$	$0 < s < 1$
roue motrice emballée	$s = \frac{w - w_0}{\max(w, w_0)}$	$s = 1$
roue freinée	$s = \frac{w - w_0}{\max(w, w_0)}$	$-1 < s < 0$
roue bloquée	$s = \frac{w - w_0}{\max(w, w_0)}$	$s = -1$

Tableau (II.1) : Facteur de glissement : lois et valeurs

Où w_0 est la vitesse angulaire d'une roue fictive tractée qui roule sans glissement. Concernant le glissement latéral (par rapport au plan de rotation de la roue), il est évalué à travers l'angle de glissement (ou de dérive) α , explicité par la figure (II.7).

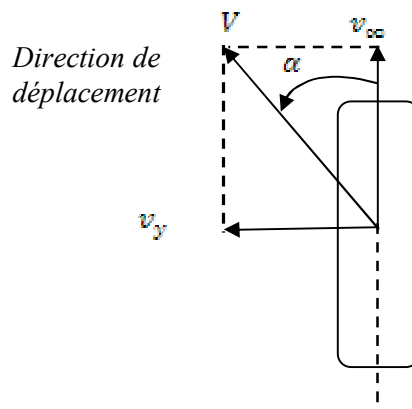


Fig. II.7. Glissement latéral de la roue

On a :

$$\alpha = \text{Arctan} \left(\frac{v_y}{v_x} \right) \quad (\text{II.34})$$

En se basant sur le vecteur vitesse du centre de gravité du véhicule $[v_x, v_y, \Gamma]^t$ et de ses

paramètres géométriques, on peut définir le glissement latéral pour les deux trains avant et arrière, respectivement α_f et α_r , comme suit :

$$\begin{pmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \end{pmatrix} = \frac{1}{v_x} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_f \\ 1 & -l_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_y \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \delta \quad (\text{II.35})$$

Où :

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

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

$$\mu_a = \frac{F_x}{N} \quad (\text{II.36})$$

Le paramètre μ_a varie de façon non linéaire en fonction du glissement s de la roue, qu'elle soit motrice ou freinée. La figure 2.5 montre le profil de cette fonction, on y distingue clairement les zones de fonctionnement stables et instables. La perte d'adhérence se manifeste alors soit par un glissement longitudinal lors du blocage de la roue, ou par un emballement de cette dernière lors d'une accélération [26].

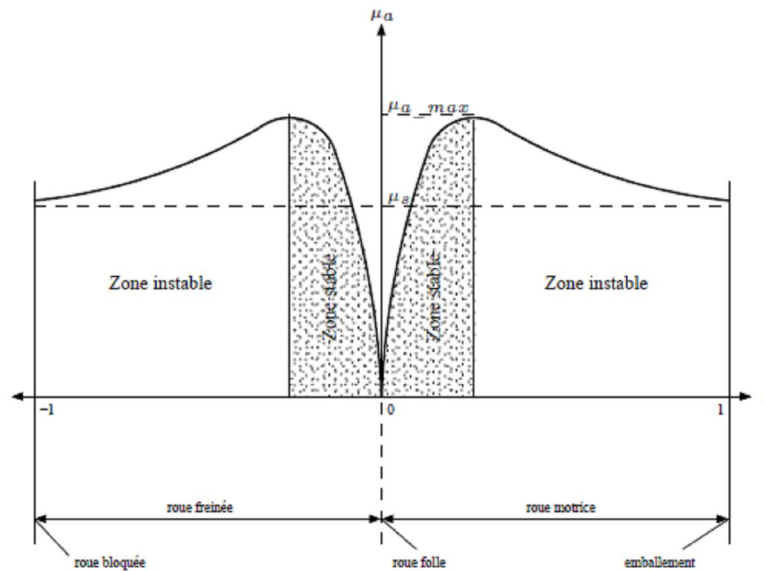


Fig. II.8. Profil du coefficient d'adhérence longitudinal en fonction du glissement d'une roue

Il est à noter qu'en plus des paramètres du véhicule tels que, sa vitesse V_{veh} et sa charge verticale N , la nature du revêtement du sol influence fortement le coefficient d'adhérence, figure (II.9).

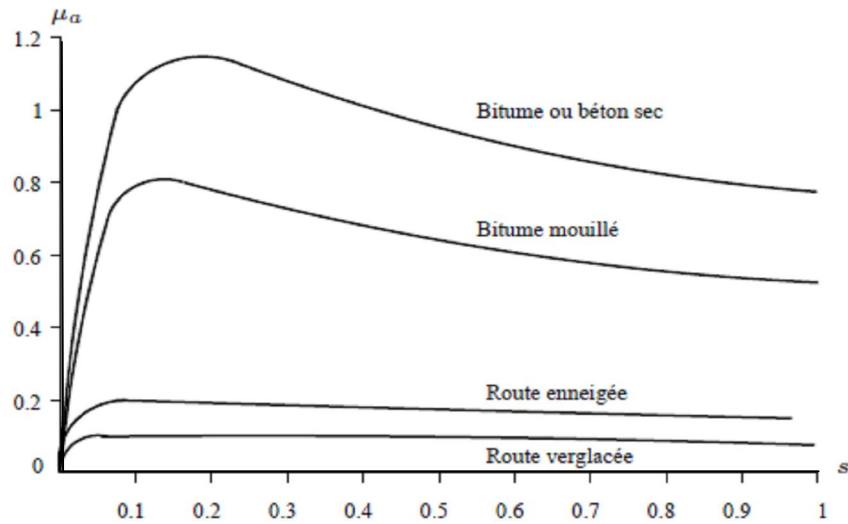


Fig. II.9. Courbes de l'adhérence pour différents revêtements de la route

II.1.7. Dynamique de la roue motrice

Les roues sont des convertisseurs d'efforts mécaniques. Les couples délivrés par le groupe motopropulseur (en rotation) sont « transformés » en forces appliquées à la caisse du véhicule (en translation).

Il existe de nombreux modèles décrivant l'interaction pneu/chaussée de manière détaillée mais ils reposent généralement sur la modélisation du glissement du pneumatique sur la chaussée, phénomène trop rapide pour être pris en compte dans un modèle énergétique. Le modèle considéré est donc un modèle simplifié ne prenant en compte que la résultante des efforts générés par les 4 pneumatiques. Une unique roue virtuelle est donc suffisante pour représenter le comportement moyen des 4 roues.

Cette roue virtuelle permet de générer, à partir du couple délivré par le groupe motopropulseur, une force motrice :

$$F_{mot(t)} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} \quad (II.37)$$

Avec R_{roue} le rayon de la roue.

L'interface entre le pneumatique et la chaussée est le siège de forces de frottement $F_{frot}(t)$ s'opposant à l'avancée du véhicule :

$$F_{frot}(t) = M_{veh} \cdot g \cdot C_r(V_{veh}(t)) \cdot \cos(\alpha(t)) \quad (II.38)$$

Avec M_{veh} la masse totale du véhicule (kg), g le constant de gravité (m/s^2), le coefficient de frottement des pneumatiques et α la pente de la chaussée (rad).

Le coefficient de frottement C_r dépend de la vitesse du véhicule V_{veh} . Pour des conditions d'usage (température, humidité,...) données et dans le cadre d'un modèle énergétique, une fonction quadratique est suffisante :

$$C_r(V_{veh}) = C_r^0 + k C_r (V_{veh})^2 \quad (II.39)$$

Avec C_r^0 et $k C_r$ des coefficients pouvant être déterminés expérimentalement. Finalement, la force $F_{traction}$ appliquée à la caisse s'écrit :

$$F_{traction}(t) = F_{mot}(t) - F_{frot}(t) \quad (II.40)$$

Le glissement entre la chaussée et le pneumatique étant supposé négligeable, la relation liant la vitesse linéaire du véhicule V_{veh} à la vitesse de rotation de la roue Ω_{roue} est donnée par :

$$\Omega_{roue}(t) = \frac{V_{veh}(t)}{R_{roue}} \quad (II.41)$$

Enfin, la masse équivalente M_{eq} des éléments en rotation (roues et arbre moteur) ramenée à la caisse est fonction de leurs inerties :

$$M_{eq} = \frac{1}{R_{roue}^2} (J_{CMP} + 4J_{roue}) \quad (II.42)$$

Avec J_{roue} l'inertie d'une roue (kg. m²) et J_{CMP} l'inertie du groupe-motopropulseur ramenée aux roues (kg .m²).

II.1.8. Modélisation du pneumatique

Le pneumatique est un organe de liaison au sol fixé sur une roue rigide assurant la rotation autour d'un élément porteur (pivot ou bras). Il constitue le seul organe permettant la liaison direct entre le véhicule et le sol, ce qui rend le comportement du véhicule fortement conditionné par les échanges dynamiques des efforts générés à la surface de contact. Sur la figure 1.1, on montre les différentes couches de matériaux entrant dans la fabrication du pneumatique à architecture radiale. En toute évidence le pneumatique est un organe composite issu d'un assemblage solidaire de fibres synthétiques ou métalliques et de caoutchouc. La nature, la disposition et la tension des fibres confèrent au pneu résultant des propriétés d'élasticité et d'adhérence particulières. Les différentes parties constitutives du pneumatique sont :

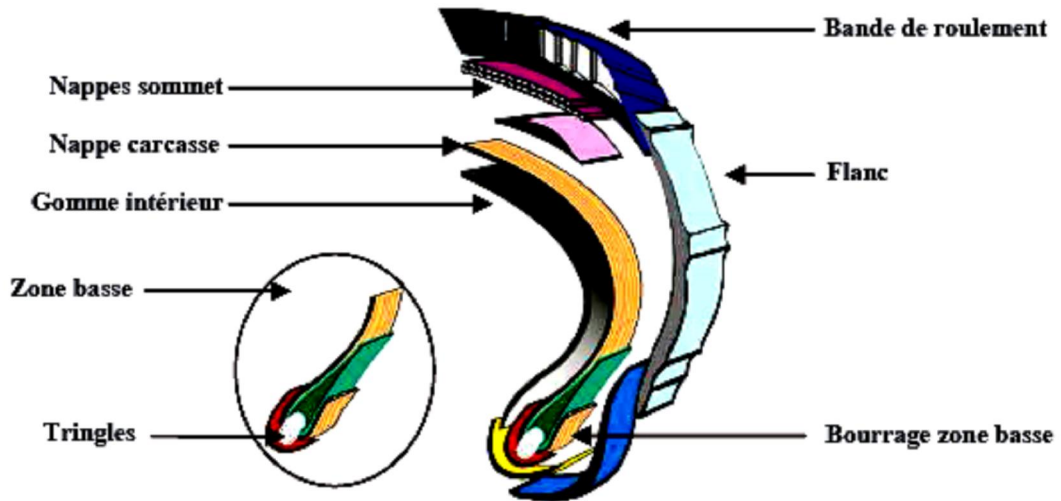


Fig. II.10. Constitution d'un pneumatique à architecture radiale

- **Zone basse** : ensemble qui permet la fixation de la carcasse sur la jante permettant de transmettre les forces directionnelles aux éléments de ceinture et bande de roulement.
- **Tringles** : permettant la fixation du pneu sur la jante tout en assurant l'étanchéité en plus de la gomme intérieure entre la zone basse et la jante.
- **Les flancs** : en gomme souple pour protéger la carcasse et assurer l'élasticité en compression.
- **Nappe carcasse** : De type radial, c'est la plus utilisée actuellement, composée de minces câbles en fibres textiles disposés en arceaux droits. Elle transmet les efforts entre la jante et la ceinture (traction, freinage, ordre de direction). Elle absorbe les flexions verticales et les poussées latérales.
- **Nappes sommet** : constituée de plusieurs nappes en acier fins et résistants, croisées obliquement et formant une triangulation indéformable. Elles procurent une grande rigidité de torsion à la bande de roulement. L'angle de triangulation des nappes contribue à la raideur en flexion, cisaillement, ..., etc. des nappes.
- **Bande de roulement** : En caoutchouc, elle assure le contact avec le sol. Elle permet de transmettre les efforts, d'obtenir l'adhérence avec un minimum de glissement et d'évacuer l'eau. Le contact pneumatique-sol se réduit à une petite surface appelée air de contact, c'est à ce niveau que se créent tous les efforts permettant au véhicule de se mouvoir, il serait donc judicieux d'analyser et de comprendre les phénomènes physiques apparaissant sur cette surface de contact afin d'obtenir une description complète du comportement du pneumatique.

II.1.8.1. Définition de l'angle de dérive δ

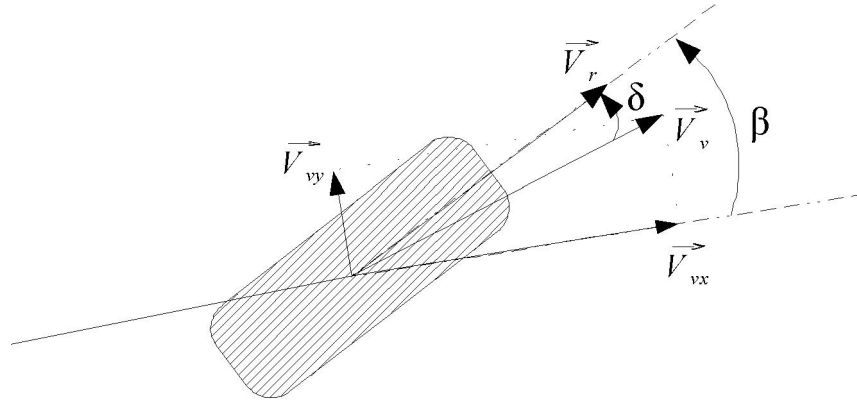


Fig. II.11.Angle de dérive

Un pneumatique est dit en dérive si la direction du vecteur vitesse V_r du centre de la roue n'est pas confondue avec celle du vecteur vitesse de son point de contact V_v .

L'angle de dérive d'un pneumatique, figure(II.10) est donc l'angle formé par ces deux vecteurs vitesses, son expression est :

$$\delta = \beta - \tan^{-1}\left(\frac{V_{vy}}{V_{vx}}\right) \quad (\text{II.43})$$

Où β fi est l'angle de braquage de la roue, V_{vx} et V_{vy} sont les projections de la vitesse V_v respectivement selon l'axe longitudinal et latéral du véhicule.

II.1.8.2.Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement C_r dépend de la vitesse du véhicule V_{veh} . Pour des conditions d'usage (température, humidité,...) données et dans le cadre d'un modèle énergétique, une fonction quadratique est suffisante :

$$C_r(V_{veh}) = C_r^0 + K_{C_r} \cdot (V_{veh})^2 \quad (\text{II.44})$$

Avec C_r^0 et K_{C_r} des coefficients pouvant être déterminés expérimentalement.

II.1.8.3. Présentation du modèle de Pacejka (formule magique)

a. Forme du modèle de base

Dans le cas d'angles de dérive trop important, la définition du comportement du pneu est souvent décrite par la formule empirique proposée par Bakker et Pacejka . Ce modèle qui tient compte de beaucoup de paramètres identifiés sur la base de mesures, permet d'approcher au mieux le comportement longitudinal et latérale du pneumatique dans le cas non linéaire. Cette formule est donnée par l'expression suivante:

$$Y(X) = y(x) + S_v \tag{II.45}$$

Avec :

$$\begin{cases} y(x) = D \cdot \sin[C \cdot \arctan(B \cdot x - E \cdot (B \cdot x - \arctan B \cdot x))] \\ x = X + S_h \end{cases}$$

Y et X correspondent respectivement soit à la force longitudinale et le glissement longitudinal respectivement soit à la force latérale et l'angle de dérive respectivement. Les différents paramètres et leurs significations intervenant dans cette formule sont:

- C : facteur de forme (permet d'ajuster l'allure de la courbe).
- D : valeur du pic (maximum de la courbe d'adhérence).
- B : facteur d'amortissement ment (pente à l'origine).
- E : facteur de courbure.
- S_h : est utilisé pour introduire un décalage horizontal de la courbure par rapport à l'origine.
- S_v: pour un décalage vertical.

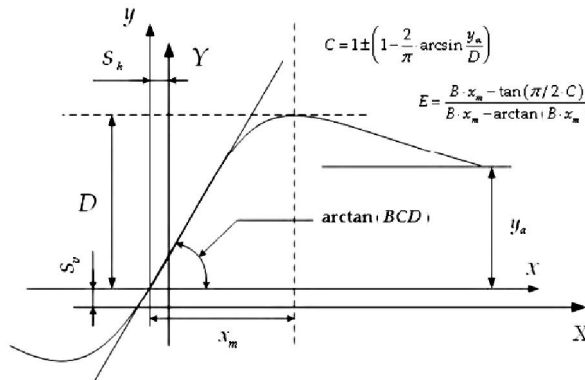


Fig. II.12. Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka

b. Identification de la force longitudinale

La force de réaction longitudinale est une fonction du glissement S_x et est définie à partir de (II.23) et (II.24) par l'expression suivante :

$$F_x^{ij} = D_x \cdot \sin \left[C_x \arctan(B_x \cdot (s_x^{ij} + S_{hx}) - E_x \cdot (B_x \cdot (s_x^{ij} + S_{hx}) - \arctan(B_x \cdot (s_x^{ij} + S_{hx})))) \right] + S_{vx} \quad (\text{II.46})$$

$$i = Av, Ar, j = G, D$$

Les expressions des paramètres en fonction de la charge normale de roue F_z sont données par :

$$\begin{cases} C_x = b_0 \\ D_x = F_z \cdot (b_1 \cdot F_z + b_2) \\ \quad = F_z \cdot \mu_x \\ B_x = \frac{1}{CD} \cdot (b_3 \cdot F_z + b_4 \cdot F_z) \cdot e^{-b_5 \cdot F_z} \\ E_x = (b_6 \cdot F_z^2 + b_7 \cdot F_z + b_8) \\ S_{hx} = (b_9 F_z + b_{10}) \\ S_{vx} = (b_{11} \cdot F_z + b_{12}) \end{cases}$$

Les différents coefficients, b_k , $k = 1, \dots, 12$, sont fixés pour des conditions expérimentales données, (type de pneumatique, pression de gonflage, conditions d'adhérence, ...).

c. Identification de la force latérale

La force de réaction latérale est une fonction de la dérive α . Elle est calculable à partir de l'expression suivante :

$$F_y^{ij} = D_y \cdot \sin \left[C_y \cdot \arctan(B_y \cdot (a^{ij} + S_{hy}) - E_y \cdot (B_y \cdot (a^{ij} + S_{hy}) - \arctan(B_y \cdot (a^{ij} + S_{hy})))) \right] + S_{vy} \quad (\text{II.47})$$

$$i = Av, Ar, j = G, D$$

Nous donnons les expressions des paramètres en fonction de la charge normale F_z et l'angle de carrossage γ .

$$\begin{cases} C_y = a_0 \\ D_y = F_z \cdot (a_1 \cdot F_z + a_2) \cdot (1 - a_3 \cdot \gamma^2) \\ \quad = F_z \cdot \mu_y \\ B_y = \frac{1}{C_y D_y} \cdot a_4 \cdot \sin \left(2 \arctan \left(\frac{F_z}{a_5} \right) \cdot (1 - a_6 \cdot |\gamma|) \right) \\ E_y = (a_7 \cdot F_z + a_8) \cdot (1 - (a_9 \cdot \gamma + a_{10} \cdot \text{sgn}(\alpha + S_{hx}))) \\ S_{hy} = a_{11} \cdot F_z + a_{12} + a_{13} \cdot \gamma \end{cases}$$

$$S_{vy} = a_{14} \cdot F_z + a_{15} + \gamma \cdot (a_{16} \cdot F_z^2 \cdot a_{17} \cdot F_z)$$

Les différents coefficients a_k , $k= 1, \dots, 17$, sont fixés pour des conditions expérimentales données, (type de pneumatique, pression de gonflage, conditions d'adhérence, ...).

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré la modélisation dynamique du véhicule pour les comportements latéral et longitudinal. Elle a permis d'élaborer un modèle du véhicule, meilleur que les modèles classiques existants (dans le cas latéral), ou comparable à ceux-ci (dans le cas longitudinal) et d'une remarquable compacité.

Ce modèle est un système intrinsèquement non-linéaire. Cette non-linéarité réside principalement dans l'adhérence sur la route et le comportement des pneus. Puis nous avons modélisé les efforts au niveau du contact roue-sol par la formule magique de Pacejka. Cette dernière est une référence dans le cadre de l'étude des efforts transversaux et latéraux du véhicule.

Le modèle de Pacejka est un modèle empirique. Nous avons identifié les coefficients de la formule magique. Les différents paramètres de ce modèle sont issus de mesures effectuées sur des pneumatiques. A Chaque coefficient correspond donc des conditions d'expérience complémentaire.

CHAPITRE III

CONTROLE DE LA CHAINE DE TRACTION DU VEHICULE ELECTRIQUE

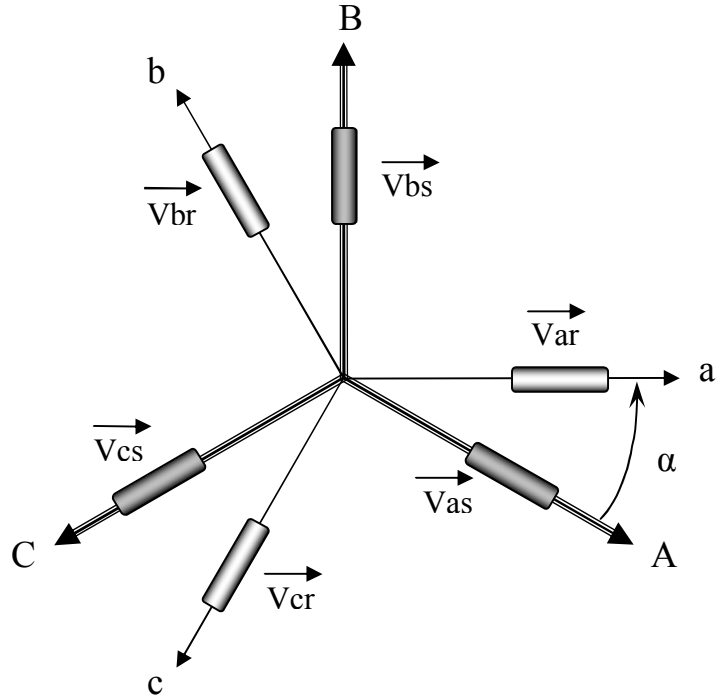
INTRODUCTION

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs employés le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. Ils permettent aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'ils occupent dans ce domaine ne cesse de croître.

III.1. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

III.1.1. Hypothèses simplificatrices

On suppose que la saturation du circuit magnétique n'est pas considérée, ni son hystérésis, ce qui entraîne un champ magnétique sinusoïdal. On suppose que la construction mécanique est parfaitement équilibrée, l'entrefer est lisse, et la dispersion du champ magnétique aux deux bouts de la machine est négligeable. Au niveau de la méthode de modélisation mathématique, nous considérerons une machine à une paire de pôles, le passage à plusieurs paires de pôles s'effectuant de manière simple en divisant alors les angles par ce nombre de paires de pôles, on parle alors d'angle électrique. Le stator sera composé de trois bobines identiques (A, B et C) régulièrement déphasées de $2\pi/3$ radians électriques, la phase A sera prise comme référence angulaire. Le rotor sera considéré comme équivalent à trois bobines identiques (a, b et c) court-circuitées sur elles-mêmes également régulièrement déphasées de $2\pi/3$ radians électriques [12] [35].



III.1.2. Equations générales Fig. III.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

Le comportement de la machine asynchrone est entièrement défini par trois types d'équations à savoir :

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- Les équations mécaniques.

III.1.2.1. Equations électriques

Nous pouvons à présent écrire le système matriciel électrique suivant dans le repère a, b, c :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \tag{III.1}$$

Ou de manière plus raccourcie :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)[\Phi_{sabc}] \tag{III.2}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)[\Phi_{rabc}] \quad (\text{III.3})$$

III.1.2.2. Équations magnétiques

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_3 & M_2 & l_r & M_r & M_r \\ M_2 & M_1 & M_3 & M_r & l_r & M_r \\ M_3 & M_2 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

On aura :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

On aura finalement :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)([L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]) \quad (\text{III.8})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)([L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]) \quad (\text{III.9})$$

III.1.2.3. Équations mécaniques

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (par exemple le démarrage, le freinage, la variation de la charge à l'arbre, etc...), il faut ajouter l'équation de mouvement au système d'équations différentielles [37].

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r \quad (\text{III.10})$$

Notons que la vitesse électrique du rotor est donnée par l'expression suivante :

$$\omega_r = p.\Omega_r \quad (\text{III.11})$$

III.1.3. Modélisation dans le repère de Park

A présent, nous devons effectuer une transformation de notre repère triphasé en un repère biphasé. Nous avons classiquement le choix entre trois repères. Le premier se situe sur le champ statorique et est communément appelé $\alpha\beta$, le second se place quant à lui sur le champ tournant et est appelé dq , et le dernier se place sur le champ électromagnétique est appelé XY . La modélisation en $\alpha\beta$ voit des grandeurs sinusoïdales alternatives tournant à la fréquence statorique. Celle en dq voit par contre des grandeurs continues car elle est située sur le champ tournant. Cette transformation des équations de phase en un système équivalent biphasé est effectuée grâce à la matrice de transformation de Park [37].

Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour les courants, tensions et flux.

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

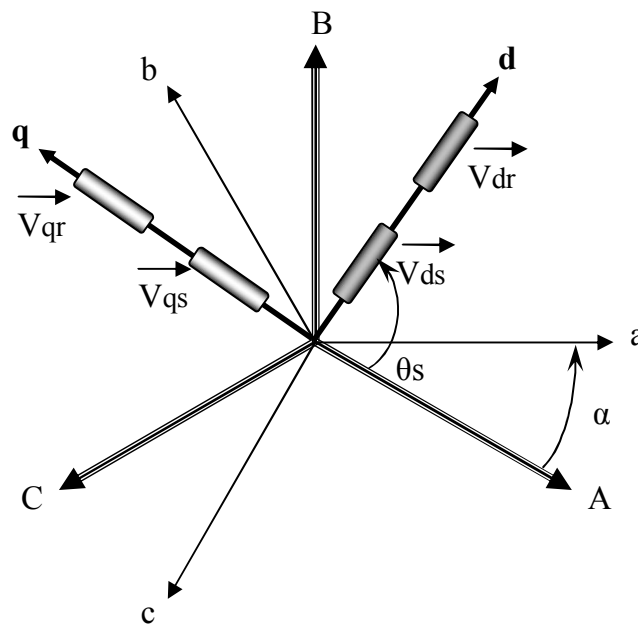


Fig.III .2.Représentation du passage d'un système triphasé à celui biphasé

III.1.3.1.Équations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (III.13)$$

$$\begin{cases} V_{\dot{\alpha}r} = R_r i_{\dot{\alpha}r} + \frac{d\Phi_{\dot{\alpha}r}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{\dot{\alpha}r} = 0 \end{cases} \quad (III.14)$$

III.1.3.2.Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{\dot{\alpha}r} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (III.15)$$

$$\begin{cases} \Phi_{\dot{\alpha}r} = L_r i_{\dot{\alpha}r} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (III.16)$$

III.1.3.3.Équations mécaniques

$$\begin{aligned} J \frac{d\Omega_r}{dt} &= C_e - C_r - f \Omega_r \\ C_e &= (3/2) \cdot p \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \\ \omega_r &= p \cdot \Omega_r \end{aligned} \quad (III.17)$$

III.1.4. Différents repères

L'isotropie du moteur asynchrone permet une grande souplesse dans la composition des équations de la machine selon deux axes à l'aide de transformation de Park, cela nécessite l'utilisation d'un repère qui permet de simplifier les expressions analytiques. Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes, se ramène pratiquement à trois référentiels (systèmes biphasés) orthogonal.

- Référentiel lié au stator: $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$, $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$
- Référentiel fixé par rapport au rotor: $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$, $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$
- Référentiel fixé par rapport au champs tournant: $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$, $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = \omega_r$

III.1.4.1. Référentiel lié au stator (α, β) :

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (α, β) lié au stator prennent la forme suivante:

$$\begin{cases} V_{S\alpha} = R_s I_{S\alpha} + \frac{d\Phi_{S\alpha}}{dt} \\ V_{S\beta} = R_s I_{S\beta} + \frac{d\Phi_{S\beta}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{R\alpha} + \frac{d\Phi_{R\alpha}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{R\beta} \\ 0 = R_r I_{R\beta} + \frac{d\Phi_{R\beta}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{R\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Ce référentiel possède des tensions et des courants réelles et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif

III.2.COMMANDE DIRECTE DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

III.2.1.Principes généraux de la commande directe du couple

La commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone est basée sur la détermination « directe » de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs du convertisseur statique d'alimentation en vue d'imposer les niveaux de couple et de flux désirés. La séquence de commande des interrupteurs est donc directement issue des régulateurs de flux et de couple qui sont généralement des régulateurs à hystérésis. Ce type de stratégie se classe donc dans la catégorie des commandes en amplitude, par opposition aux lois de commandes en durée qui sont basées sur un réglage de la valeur moyenne de la tension par modulation de largeur d'impulsion [21].

Le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux statorique, en utilisant les valeurs instantanées du vecteur tension. Un onduleur triphasé peut fournir huit vecteurs tensions de base instantanées, parmi les quels deux sont nuls. Ces vecteurs sont choisis à partir d'une table de commutation en fonction des erreurs du flux et du couple et de la

position du vecteur flux statorique. Dans cette technique, on a plus besoin de la position du rotor pour choisir le vecteur tension, Avant de présenter le principe de la DTC, on doit passer par la modélisation de l'onduleur.

III.2.2.Modélisation vectorielle de l'onduleur de tension

Le schéma représentatif d'une association; onduleur de tension et machine asynchrone est donné par la figure suivante :

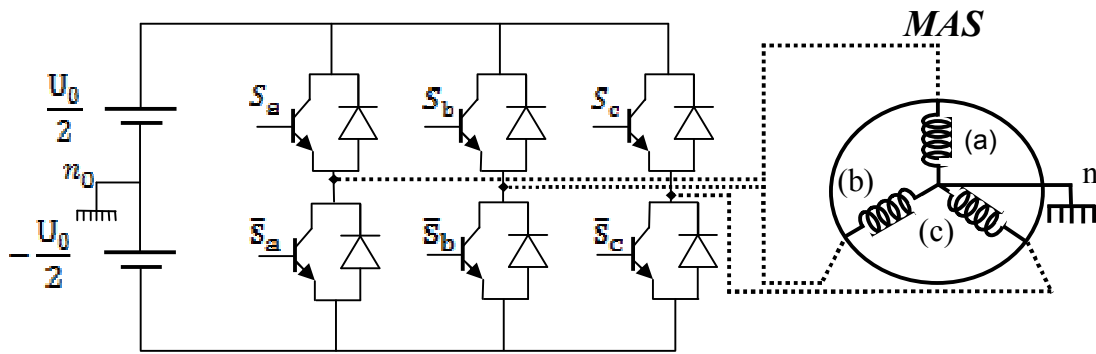


Fig. III.3.Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux

Les tensions de ligne appliquées à la machine se déduisent de la tension d'entrée de l'onduleur (U_0) et des signaux de commande logiques. L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j = a, b, c$) telles que :

$S_j = 1$ Interrupteur haut fermé et interrupteur bas ouvert.

$S_j = 0$ Interrupteur haut ouvert et interrupteur bas fermé.

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions de phases V_{jmo} en fonction des signaux de commande S_j tel que :

$$V_{jmo} = S_j U_0 - \frac{U_0}{2} \tag{III.20}$$

On peut considérer que l'onduleur délivre un vecteur tension V_{sm0} :

$$V_{sm0} = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_{am0} + V_{bm0} e^{-j\frac{2\pi}{3}} + V_{cm0} e^{-j\frac{4\pi}{3}}) \tag{III.21}$$

Où $V_{an0}, V_{bn0}, V_{cn0}$ sont les tensions simples à la sortie de l'onduleur (Fig. III.3).

D'après l'équation (III.21) le vecteur de tension peut être écrit en fonction des signaux de commande par la relation suivante :

$$V_{sn0} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 (S_a + S_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{-j\frac{4\pi}{3}}) \quad (\text{III.22})$$

On prend la constante $KT = \sqrt{\frac{2}{3}}$ pour avoir une transformation qui conserve la puissance.

La figure (III.4) montre la représentation dans le plan complexe des six vecteurs tensions non nuls générés par un onduleur de tension à deux niveaux. Comme on peut le voir, les combinaisons $V_7 \Leftrightarrow (S_a, S_b, S_c) = (111)$ et $V_0 \Leftrightarrow (S_a, S_b, S_c) = (000)$ donnent des vecteurs nuls.

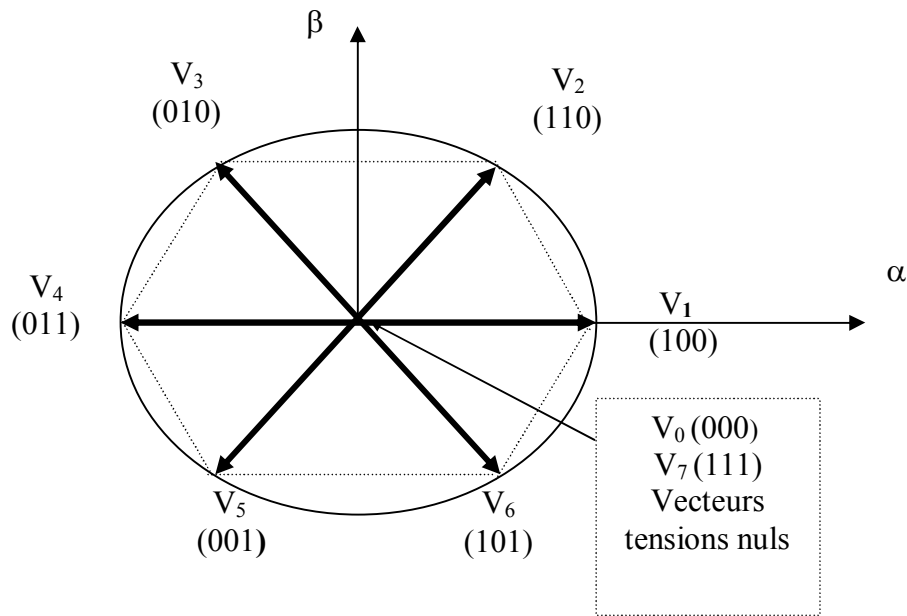


Fig. III.4. Représentation vectorielle de l'onduleur de tension à deux niveaux

Le tableau (III.1) montre les différents vecteurs tensions de l'onduleur qu'on peut avoir. D'après la figure (III.4) et le tableau (III.1), les six vecteurs tensions non nuls peuvent être exprimés par:

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} \quad i = 1 \dots 6 \quad (\text{III.23})$$

(S_a, S_b, S_c)	V_{an0}	V_{bn0}	V_{cn0}	V_j
0, 0, 0	$-\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$V_0 = 0$
1, 0, 0	$\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$U_0 V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}$
1, 1, 0	$\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$U_0 e^{j\frac{\pi}{3}} V_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}$
0, 1, 0	$-\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$U_0 e^{j2\frac{\pi}{3}} V_3 = \sqrt{\frac{2}{3}}$
0, 1, 1	$-\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$U_0 V_4 = -\sqrt{\frac{2}{3}}$
0, 0, 1	$-\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$= \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 e^{j4\frac{\pi}{3}} V_5$
1, 0, 1	$\frac{U_0}{2}$	$-\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$= \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 e^{j5\frac{\pi}{3}} V_6$
1, 1, 1	$\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$\frac{U_0}{2}$	$= 0 V_7$

Tableau (III.1) : Vecteurs tension d'état de l'onduleur

Dans le cas où la machine constitue une charge triphasée équilibrée, les tensions des phases appliquées par l'onduleur au stator du moteur sont soumises à la contrainte suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{III.24})$$

Les équations des tensions données en fonction des états des interrupteurs sont présentés par les expressions suivantes:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2s_a - s_b - s_c)U_0 \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(s_a - 2s_b - s_c)U_0 \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(s_a - s_b - 2s_c)U_0 \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

III.2.3. Contrôle du flux et du couple électromagnétique

Pour un contrôle efficace du couple de la machine asynchrone, il est tout d'abord impératif de régler correctement le flux. En contrôle de type DTC, on réalise le réglage du flux statorique, car il a une dynamique plus rapide que celle du flux rotorique (la constante de temps rotorique est plus grande que celle du stator, donc la variation de flux rotorique est négligeable vis-à-vis à celle du flux statorique) [24].

III.2.3.1. Contrôle du flux statorique

A partir de l'équation de la tension statorique dans un repère $\alpha\beta$ lié au stator, le flux statorique peut être obtenu par l'équation suivante :

$$\Phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s i_s) dt \quad (\text{III.26})$$

La représentation du module de flux statorique dans un repère tournant d'axes (d, q) ou l'axe d coïncide avec le flux statorique permet de mieux illustrer le comportement du module du flux statorique en fonction de la tension et des courants statoriques comme il est représenté en Figure (III.5).

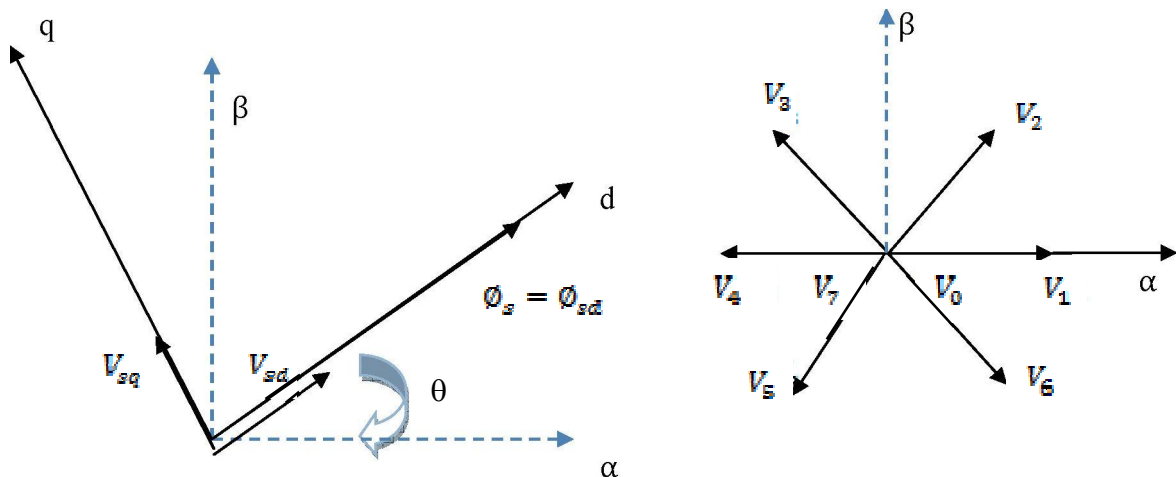


Fig. III.5. Orientation de l'axe du repère tournant selon la direction du flux statorique

On aura alors les composantes du flux statorique:

$$\|\Phi_s\| = \Phi_s = \Phi_{sd} \text{ et } \Phi_{sq} = 0 \quad (\text{III.27})$$

Nous obtenons ainsi :

$$(\text{III.28}) \quad \frac{d}{dt} \Phi_s = V_{sd} - R_s i_{sd}$$

Pour simplifier, on considère que le terme $R_s i_{sd}$ comme négligeable par rapport à la tension V_s . Donc on peut écrire:

$$\frac{d}{dt} \|\Phi_s\| = V_s \quad (\text{III.29})$$

L'approximation sur la chute de tension dans la résistance statorique est réalisée, exceptée aux faibles vitesses ou le terme $R_s i_{sd}$ doit être considéré.

À partir d'équation (III.5) nous constatons que la variation du module du flux statorique est proportionnelle à la composante radiale de la tension statorique (V_{sd}). C'est-à-dire que lorsqu'un vecteur de tension actif est appliqué, C'est la projection de cette tension sur l'axe du flux statorique qui permet de faire évoluer son module.

Si une séquence de tension nulle est appliquée ($V_{sd} = 0$), nous constatons que la variation du module du flux statorique est négative et proportionnelle au terme ($-R_s i_{sd}$) équation (II.11).

$$\frac{d}{dt} \|\Phi_s\| = 0 \quad (\text{III.30})$$

A partir de la figure (III.23), on constate que les vecteurs (V_1, V_2, V_6) possèdent une composante V_{sd} positive, cela signifie que ces vecteurs augmentent le module du flux statorique. En revanche, les vecteurs (V_3, V_4, V_5) possèdent une composante V_{sd} négative permettant la diminution du module du flux statorique.

III.2.3.2. Contrôle du couple électromagnétique

La recherche d'une règle d'évolution pour le couple électromagnétique s'avère plus délicate mais s'effectue de la même façon pour le flux. Une étude basée sur un modèle

de petite variation de la machine à induction permet d'exprimer la variation du couple en fonction de la tension et des grandeurs de contrôles (flux, couple), [17].

Considérons l'expression du couple électromagnétique d'une machine à induction exprimée en fonction du courant et du flux statorique dans un repère (α, β) .

$$C_{em} = (\Phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (III.31)$$

La dérivée du couple s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{dC_{em}}{dt} = P(\Phi_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt} - \Phi_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt}) + P(\Phi_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \Phi_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt}) \quad (III.32)$$

On a les équations magnétiques suivantes:

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \Phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{cases} \quad (III.33)$$

Si on remplace ces grandeurs dans $\frac{dC_{em}}{dt}$ on obtient :

$$\frac{dC_{em}}{dt} = \frac{P}{L_s + L_r} \left[(v_s - j\omega) \Phi_s \parallel \Phi_s \parallel - \frac{R_s R_r}{P} C_{em} \right] \quad (III.34)$$

Les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur flux Φ_s . Par exemple les vecteurs qui augmentent le couple électromagnétique dans le secteur N1 sont V_2 ou V_3 et les deux qui diminuent le couple électromagnétique dans le même secteur sont V_5 et V_6 .

A partir de l'équation (III.35), nous avons de façon approchée l'évolution du couple électromagnétique pour tout point de fonctionnement de la machine asynchrone et quelque soit la séquence de tension appliquée [17].

III.2.4. Présentation de la structure de contrôle

III.2.4.1. Sélection du vecteur tension

Le choix de V_s dépend alors de la variation souhaitée pour le module de flux statorique, et du sens de rotation, mais également de l'évolution souhaitée pour le couple

[21], [26]. En sélectionnant un vecteur tension $V_s (S_a S_b S_c)$ approprié, l'extrémité du flux Φ_s peut être contrôlée et déplacée de manière à maintenir l'amplitude du vecteur flux constante.

Ainsi, nous pouvons délimiter l'espace d'évolution de Φ_s décomposé en six zones $N = i$, avec $i=1, \dots, 6$, et déterminées à partir des composantes du flux dans le plan (α, β) [27].

Comme il est montré dans la Figure (II.4), lorsque le vecteur flux Φ_s se trouve dans une zone numérotée $N = i$, le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivants:

- S
i V_2 est sélectionné alors Φ_s croît et C_{em} croît.
- S
i V_6 est sélectionné alors Φ_s croît et C_{em} décroît.
- S
i V_3 est sélectionné alors Φ_s décroît et C_{em} croît.
- S
i V_5 est sélectionné alors Φ_s décroît et C_{em} décroît.
- S
i V_0 et V_7 est sélectionné alors la rotation du flux Φ_s est arrêtée, d'où une décroissance de couple alors que le module du vecteur Φ_s reste inchangé.

Quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans une zone de position $N = i$, les deux vecteurs tensions V_1, V_4 ne sont jamais utilisés. Ce qui signifie que lors du déplacement du flux Φ_s sur une zone $N = i$, un bras de l'onduleur ne commande jamais [25].

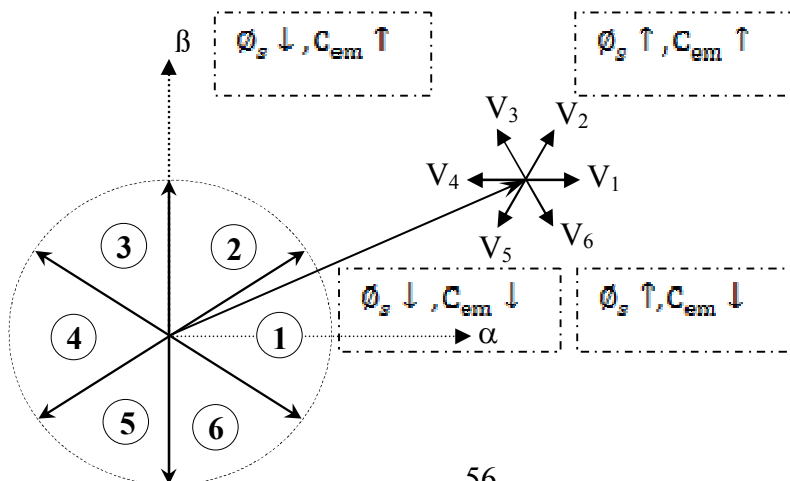


Fig. III.6. choix du vecteur tension

Cependant l'application des vecteurs tensions V_s dépend de la position du vecteur flux de la zone N, en début de la zone N=1, les vecteurs V_2 et V_3 sont perpendiculaires au vecteur flux Φ_s , ce qui signifie que le changement de couple est très rapide, mais l'amplitude du flux ne change pas considérablement. Pour les deux vecteurs V_2 et V_3 , correspond un composant du couple très petit et les variations des flux sont importantes. Le vecteur de tension V_s à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts de couple et de flux estimés par rapport à leur référence ce que nécessite un estimateur de module et de position du flux statorique et un estimateur de couple.

III.2.4.2. Estimateurs

III.2.4.2.1. Estimation du flux statorique

On définit tout d'abord avant l'étude du contrôleur de flux, les étapes de calcul nécessaires à l'estimation de l'amplitude du flux statorique. Ainsi, l'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques, les courants et les tensions de la MAS.

L'estimateur classique du "modèle tension" est couramment utilisé. Ainsi, l'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes suivant les axes (α, β) :

On obtient :

$$\Phi_s = \Phi_{s\alpha} + j\Phi_{s\beta} \quad (\text{III.35})$$

$$\begin{cases} \tilde{\Phi}_{s\alpha}(t) = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \tilde{\Phi}_{s\beta}(t) = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

On obtient $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$, à partir de la tension de mesure de l'onduleur U_0 et des états des commandes (S_a, S_b, S_c), Soit :

$$V_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \quad (\text{III.37})$$

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 [S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)] \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

De même les courants $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$ sont également obtenus par la transformation de CONCORDIA à partir des courants, i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} mesurés, soit :

$$i_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \quad (\text{III.39})$$

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

Le module du flux statorique est définie par :

$$\bar{\Phi}_s = \sqrt{\bar{\Phi}_{s\alpha}^2 + \bar{\Phi}_{s\beta}^2} \quad (\text{III.41})$$

L'angle $\bar{\Theta}_s$ entre le référentiel statorique et le vecteur flux $\bar{\Phi}_s$ est égal à:

$$\bar{\Theta}_s = \arctg \frac{\bar{\Phi}_{s\beta}}{\bar{\Phi}_{s\alpha}} \quad (\text{III.42})$$

III.2.4.2.2. Estimation du couple électromagnétique

L'estimation du couple électromagnétique de la machine est possible grâce aux composantes du flux estimées et aux mesures des courants de ligne, en utilisant l'équation suivante:

$$C_{em}^{\hat{}} = (\hat{\Phi}_{s\alpha} i_{s\beta} - \hat{\Phi}_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{III.43})$$

Cette relation montre que la précision de l'amplitude du couple estimé dépend de la précision de l'estimateur du flux statorique et de la mesure des courants.

III.2.5. Elaboration du vecteur de commande

III.2.5.1. Elaboration du correcteur de flux

Dans le but d'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 DTC [24].

Ce sont, en principe des dispositifs hybrides, car à l'entrée est appliqué un signal analogique sous forme d'erreur de flux continue, néanmoins que le signal de sortie est de type numérique cflx, indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée (cflx = 1) ou diminuée (cflx = 0) de façon à maintenir:

$$|\Phi_{sref} - \Phi_s| \leq \Delta\Phi_s \tag{III.44}$$

Son rôle est de maintenir l'extrémité du vecteur flux statorique Φ_s dans une couronne circulaire présentée dans les figures III.7.(a). et III.7.(b)

Avec :

Φ_{sref} : La consigne du flux.

$\Delta\Phi_s$: L'écart d'hystérésis du correcteur.

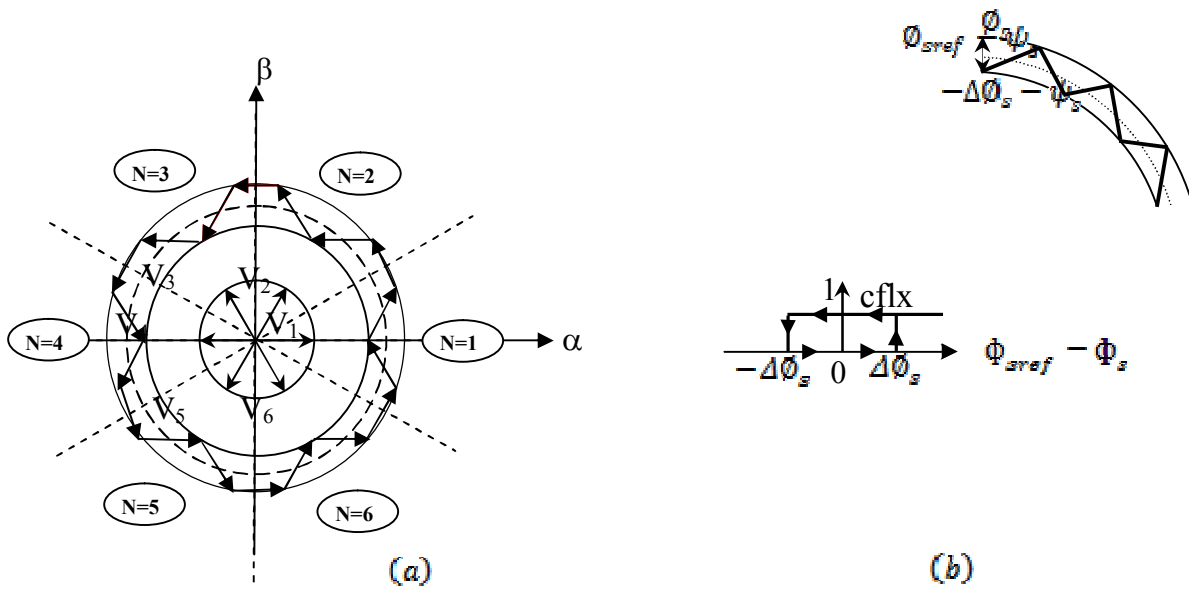


Fig. III.7. (a). Sélection des vecteurs tensions correspondant
(b). Correcteur de flux à hystérésis à deux niveaux

III.2.5.2. Elaboration du correcteur du couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites $|C_{ref} - C_{em}| \leq \Delta C_{em}$, avec C_{ref} la référence de couple et ΔC_{em} la bande d'hystérésis du correcteur.

Cependant une différence avec le contrôle du flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine.

La régulation du couple électromagnétique est possible grâce à un contrôleur à hystérésis à deux niveaux présenté en figure (III.8). Le contrôleur à deux niveaux présente l'avantage de la simplicité, il est identique à celui utilisé pour le contrôle du module de Φ_s . Il n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation. Ainsi seuls les vecteurs V_2 et V_3 , peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le flux Φ_s . Par conséquent, la diminution du couple est uniquement réalisée par la sélection des vecteurs nuls.

Cependant ce correcteur est plus simple à implanter, de plus en sélectionnant correctement les vecteurs nuls suivant les zones N_i , on s'aperçoit que pour chaque zone i , il y a un bras de l'onduleur qui ne commute jamais, et permet ainsi de diminuer la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs, diminuant ainsi les pertes par commutation au niveau de l'onduleur.

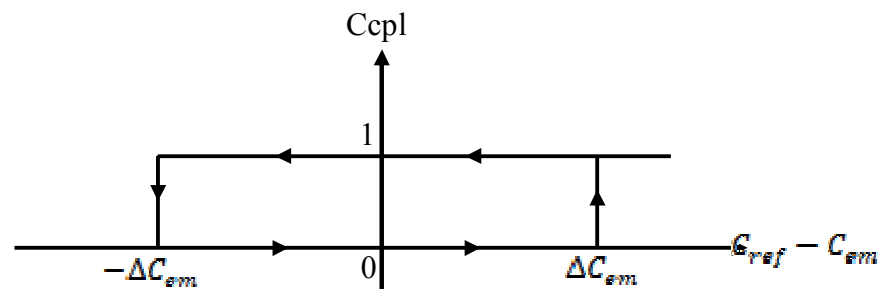


Fig. III.8. Correcteur de couple à deux niveaux.

III.2.6. Elaboration de la table de commande

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables $cflx$ et $ccpl$, et de la zone N_i de position de Φ_s . Elle se présente donc sous la forme suivante :

III.2.6.1. Tables de commande pour les vecteurs tensions nuls

La première stratégie est basée sur l'utilisation d'un correcteur à deux niveaux pour le contrôle du couple électromagnétique. Il se déduit du contrôle du couple sur un seul sens de rotation du moteur. Ainsi, seuls les vecteurs V_2 et V_3 peuvent donc être

sélectionnés pour faire évoluer le vecteur flux statorique. Par conséquent la diminution du couple est uniquement opérée par l'application des vecteurs tensions nuls V_0 et V_7 comme le montre la table suivante :

Couple	Flux	N =1	N =2	N =3	N =4	N =5	N =6
ccpl=1	cflx =1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	cflx =0	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
ccpl =0	cflx =1	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	cflx =0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7

Tableau (III.2) : Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à deux niveaux (avec les vecteurs tensions nuls).

III.2.6. 2.Tables de commande pour les vecteurs tensions non nuls

Dans la deuxième stratégie de commande, présentée par la table (III.3), on choisit des vecteurs tensions non nuls pour décroître plus rapidement le couple électromagnétique. On peut avoir besoin d'augmenter ou diminuer le couple électromagnétique de la machine mais aussi de le maintenir constant.

Couple	flux	N =1	N =2	N =3	N =4	N =5	N =6
ccpl =1	cflx =1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	cflx =0	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
ccpl =0	cflx =1	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
	cflx =0	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3

Tableau (III.3): Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à deux niveaux (avec les vecteurs tensions non nuls).

III.2.7.Structure générale du contrôle direct de couple

Les principes du contrôle direct du couple ont été décrits dans leur ensemble. Cependant, les consignes d'entrée du système de contrôle sont le couple et l'amplitude du flux statorique. Les performances du système de contrôle dépendent de la précision dans l'estimation de ces valeurs.

L'un des éléments essentiels de cette structure est la table de commutation permettant de définir le choix du vecteur V_s sans avoir recours à la position du rotor qui nécessite généralement un capteur de vitesse. Cette dernière en combinaison avec les comparateurs à hystérésis, représente la table de commutation qui remplace le générateur MLI des structures classiques du contrôle par onduleur de tension à MLI. En plus, avec l'utilisation de ce type de contrôle, les exigences de régulateur du courant, régulateur IP de flux et du couple sont éliminés ce qui améliore les performances dynamiques du système.

La figure (III.9) illustre la structure générale de la Commande Directe du Couple.

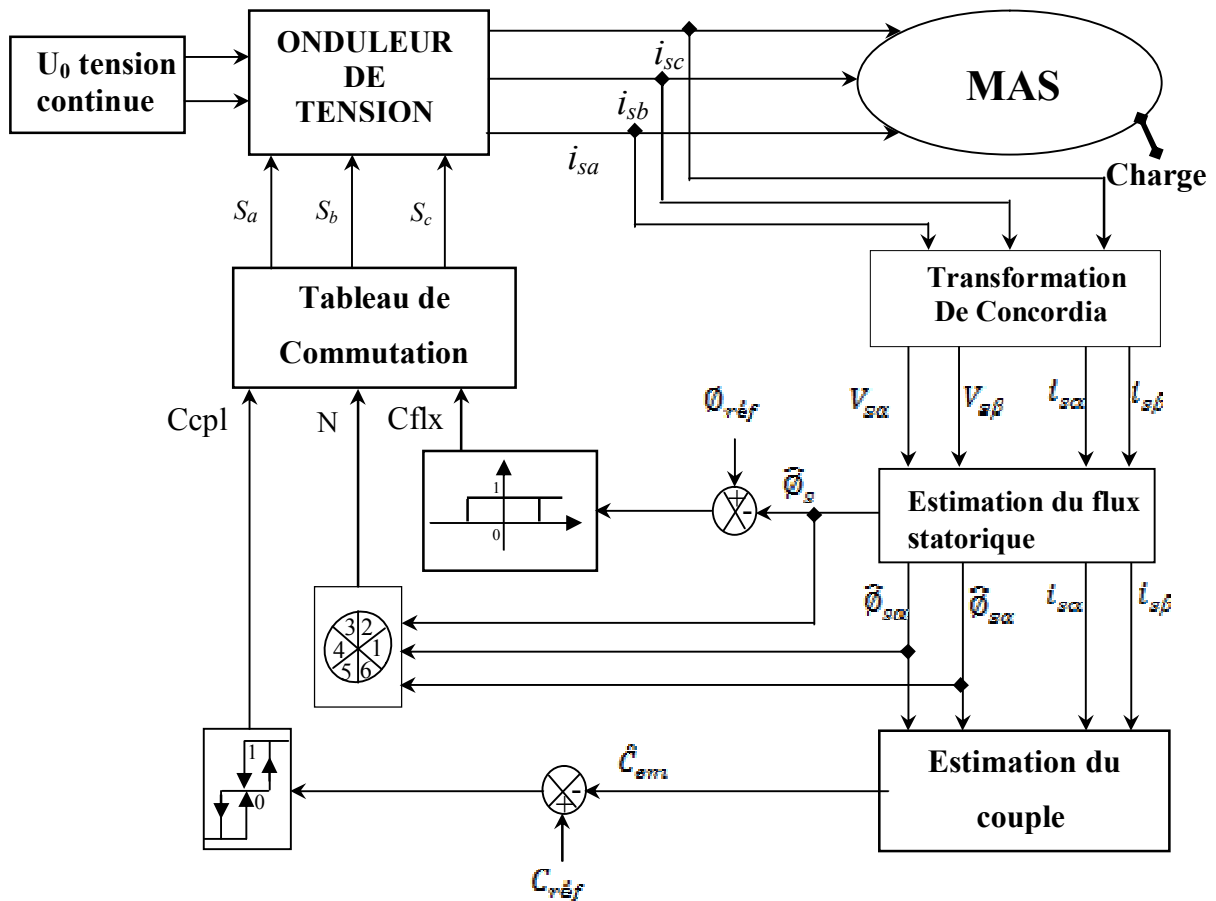


Fig. III.9.Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple.

III.3.GENERATION DE LA TRAJECTOIRE

La génération de trajectoire correspond à l'obtention d'une consigne de mouvement du véhicule. Elle consiste à définir la loi temporelle qui régit le mouvement, cette loi peut être définie en considérant les contraintes de temps et les conditions dynamiques imposées par le déplacement.

Avant de pouvoir calculer le couple que devra fournir l'actionneur, il est nécessaire de définir un profil de vitesse qui représente fidèlement les mouvements que le véhicule devra effectuer. Un profil de vitesse trapézoïdal permet des calculs simples et il permet également de représenter un profil réaliste. Ce dernier est utilisé pour les ordres de translation et de rotation.

Pour un véhicule, le parcours d'une certaine trajectoire dans l'espace doit se faire en contrôlant la vitesse (vitesse nulle au départ et à l'arrivée, vitesse constante durant le trajet) et donc l'accélération. C'est à ce prix que l'on peut efficacement contrôler la vitesse durant le mouvement. Les consignes de vitesses sont représentées selon la loi de la figure (III.10), et développent des accélérations en conséquence.

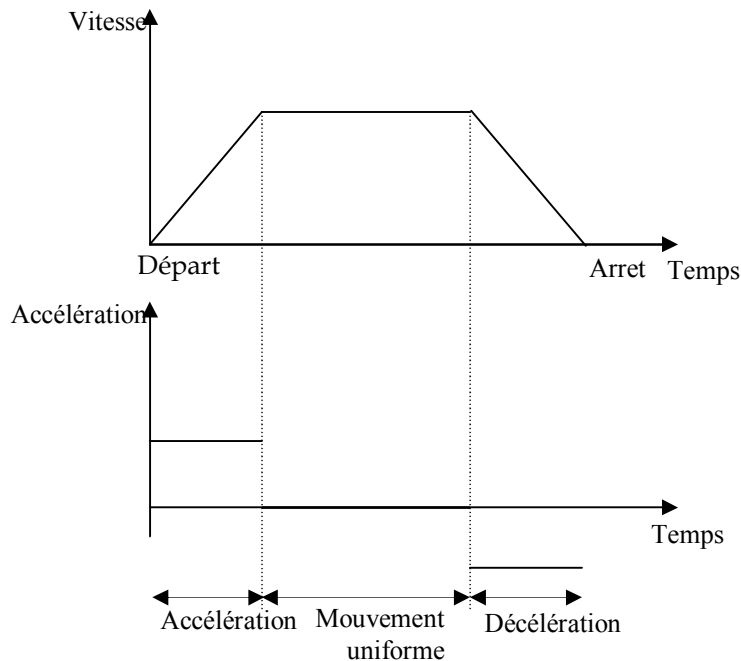


Fig. III.10.Profile de consigne de vitesse et accélération subie.

Cette trajectoire est définie par trois phases successives :

- **Accélération constante** ($\gamma = \gamma_{\max}$), la vitesse augmente linéairement ;
- **Accélération nulle** ($\gamma = 0$), la vitesse est constante et maximale ;
- **Décélération constante** ($\gamma = -\gamma_{\max}$), la vitesse diminue linéairement.

III.4.COMMANDE DES MOUVEMENTS

La synthèse d'une commande doit permettre le calcul des consignes à appliquer aux actionneurs pour que le véhicule puisse réaliser un mouvement spécifié. Si l'on veut que l'effet des perturbations extérieures soit réduit et si l'on veut que la commande soit robuste vis-à-vis des erreurs de modélisation, il est nécessaire de développer des commandes s'appuyant sur un retour d'information de la vitesse.

Dans cette section, on insistera sur la commande classique de type PI (Commande Proportionnelle, Intégrale), méthode qui est simple pour le contrôle de la plupart des plateformes actuelles qui prend en compte les forces d'interaction dynamique entre la roue et le sol. Les avantages de ce type de commande sont la facilité d'implantation et le faible coût en calcul.

Le rôle de cette commande est d'asservir l'actionneur droit et gauche du véhicule afin de permettre des mouvements simultanés de translation et de rotation. Une telle commande est réalisée selon le schéma de la figure (III.11).

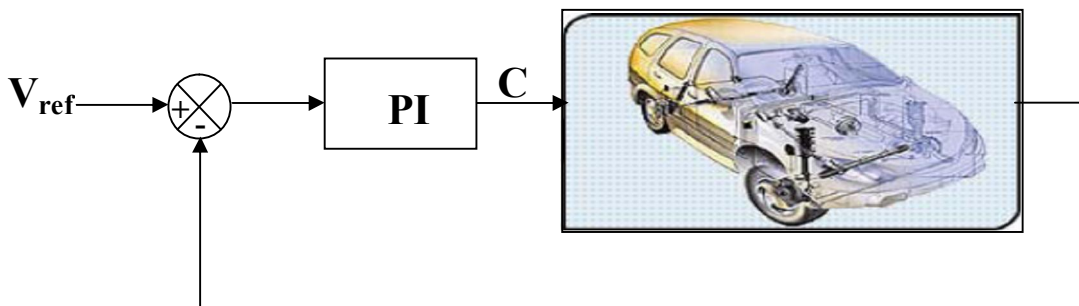


Fig. III.11. Commande du véhicule par un régulateur PI

La loi de commande est donnée par :

$$C = K_{pi}(V_{ref} - V) + K_{ii} \int_{t_0}^t (V_{ref} - V)$$

Où :

V_{ref} et V désignent respectivement la vitesse désirée et la vitesse mesurée.

K_{pi} et K_{ii} sont respectivement les gains proportionnels et intégraux.

III.5.RESULTATS DE SIMULATION

Les simulations ont été effectuées avec les vitesses de référence de la roue motrice définies comme suit :

0	$0 \leq t \leq 0.5 \text{ s}$
25 Km/ h	$0.5 \leq t \leq 1.5 \text{ s}$
12 Km/ h	$1.5 \leq t \leq 3 \text{ s}$
25 Km/ h	$3 \leq t \leq 4 \text{ s}$

La réponse de cette structure de commande est donnée dans la figure

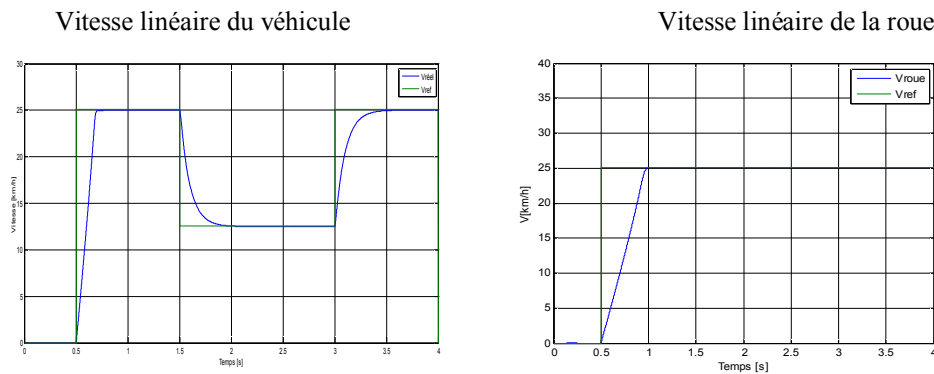


Fig. III.12.Résultats de simulation de la structure directe pour un déplacement ligne droite-rotation à droite- ligne droite

❖ Roue sans glissement

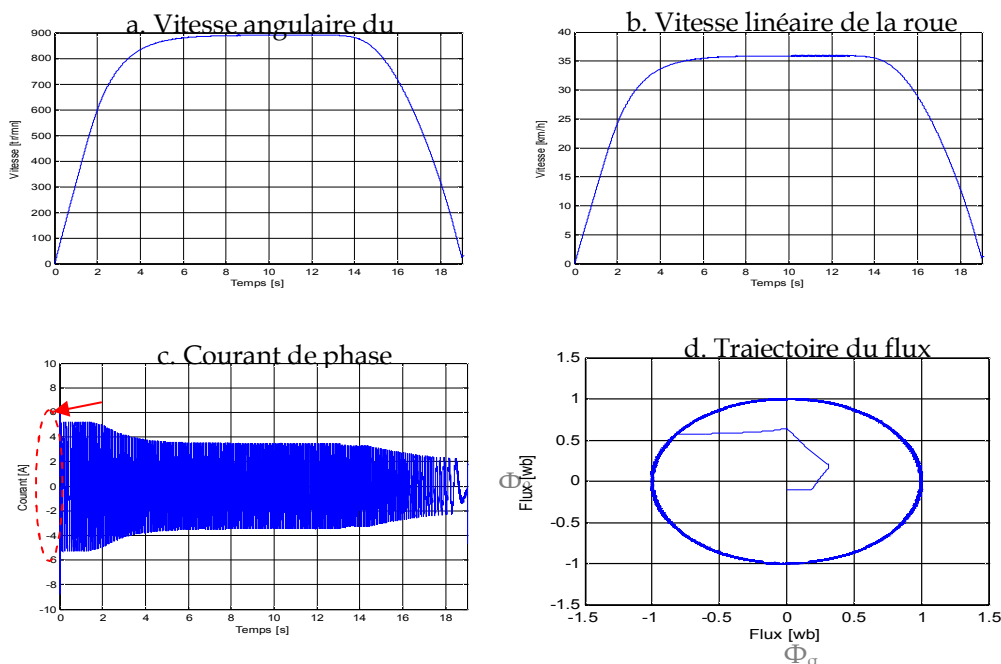


Fig.III.13.Résultats de simulation sans glissement

❖ Roue avec glissement

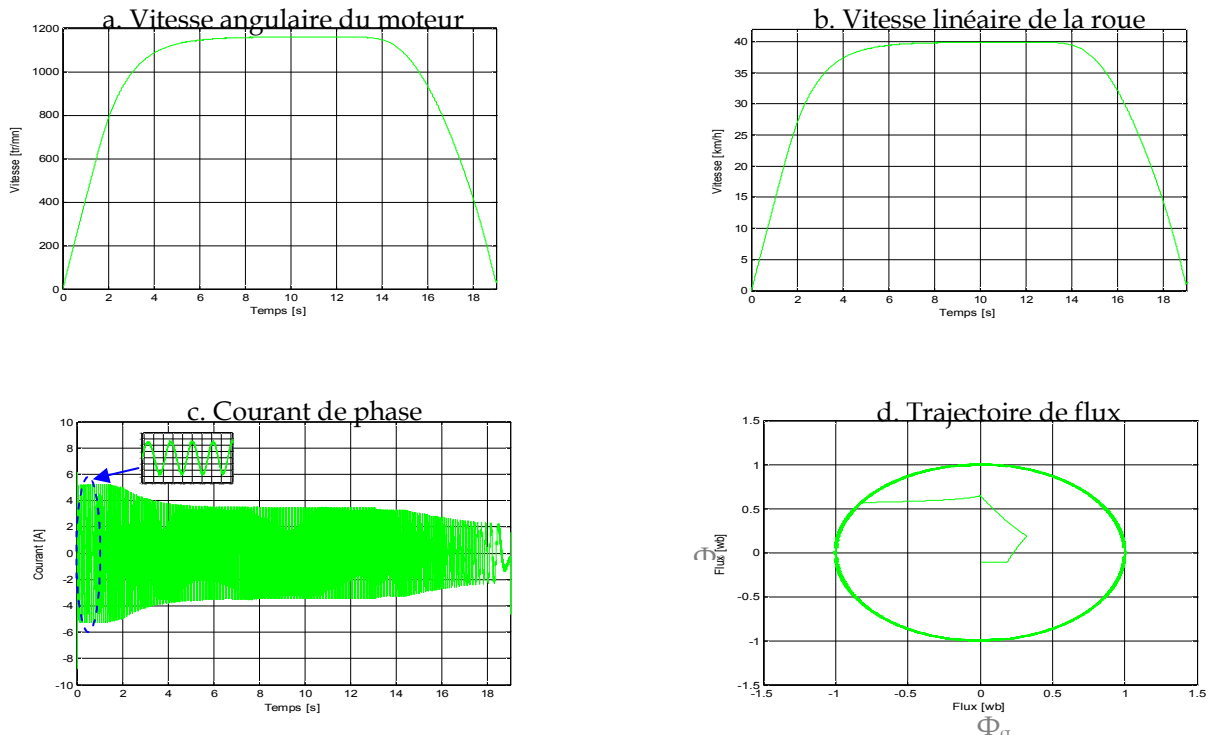


Fig. III.14. Résultats de simulation avec glissement

CONCLUSION

Ce chapitre présente la commande et la simulation de quelques structures possibles de contrôle d'un véhicule électrique à deux roues motrices indépendantes en avant. Ces structures de commande, ont été appliquées pour le contrôle du véhicule afin d'améliorer la motricité, Le système étudié est constitué d'une plate-forme munie de deux roues motrices indépendantes et de deux roues libres.

La plate-forme nécessite un contrôleur de mobilité afin de coordonner les mouvements des deux roues et d'obtenir ainsi les trajectoires désirées.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail est une contribution à l'amélioration et l'optimisation des performances d'une chaîne de traction électrique. L'étude a été focalisée sur un banc de traction électrique à deux roues motrices indépendantes en avant, rigides au pivotement et réalisant à la fois la propulsion et la direction, sachant que les roues arrières sont libres.

Cette configuration confère au système un gain en mobilité grâce à un meilleur contrôle de la motricité, et permet également le contrôle de l'orientation et par conséquent, l'optimisation de la stabilité latérale du véhicule. Cette étude permet également de contribuer à l'amélioration de l'autonomie du véhicule électrique.

Une loi de commande est alors recherchée afin d'utiliser le minimum de matériels embarqués possible. Cette étude a conduit à doter le véhicule d'une référence externe. Elle a permis d'analyser correctement le mouvement dans un environnement naturel. La loi de contrôle autrement dit le couple de chaque roue motrice peut être contrôlé indépendamment, ce qui entraîne un contrôle efficace du véhicule notamment dans les virages rapides.

La stratégie de contrôle impose une connaissance précise de la dynamique du véhicule qui est exhaustivement détaillée. La partie mécanique réside principalement dans le contact roue-route. Ce dernier est un paramètre non-linéaire crucial pour la stabilité du véhicule. Enfin, il est nécessaire de mettre en application un système de commande qui fournit pour chaque actionneur, le couple suffisant pour garder le roulement et assurer, la manœuvrabilité et la stabilité du véhicule.

Les paramètres de la machine asynchrone

$$R_s = 10 \Omega$$

$$R_r = 6.3 \Omega$$

$$L_s = 0.4641 H$$

$$L_r = 0.4612 H$$

$$M = 0.4212 H$$

$$J = 0.02 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

$$f = 0$$

$$P = 2$$

Paramètre du véhicule

Paramètre	Valeur
M (masse du véhicule)	1562 kg
J (moment d'inertie du véhicule)	2630 kg. m^2
I (longueur entre le train avant et le centre de gravité)	L104 m
Ir (longueur entre le train arrière et le centre de gravité)	1.421 m
L (longueur entre les deux trains avant et arrière)	$L=(L_f+L_r) M$
hcg (hauteur du centre de gravité)	0.5 m
d (moitié du longueur du train arrière)	0.75 mm
Sf (section frontale véhicule)	2.04 m^2
p (densité volumique de l'air)	1.2 kg/ m^3
C (coefficient de pénétration dans l'air)	0.25
Grr (coefficient de résistance au roulement)	0.01
G1 (rigidités au glissement, latéral des pneus avant)	37407 N/rad
Gr (rigidités au glissement latéral des pneus arrière)	51918 N/rad
J (moment d'inertie de la roue)	1.284 kg. m^2
R (rayon de la roue)	0.294 m
d (longueur entre le centre de la roue et le point où sa charge agit)	0.0037 m

BIBLIOGRAPHE

- [1] : Michel. Kant, « **La voiture électrique** », Technique de l'ingénieur ; D5560.
- [2] : Bernard MULTON, Laurent HIRSINGER, « **Problème De La Motorisation D'un Véhicule Electrique** », Ecole normale supérieure de Cachan, d1375Revue 3E.I n°5 mars 96 pp.55-64.
- [3] : M. KANT, « **Motorisation d'un véhicule électrique** », Revue Générale de L'Electricité n°10/93, novembre 1993, pp.29-38.
- [4] M. PORNIN, «**Traction électrique automobile routière** », Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, juin 1981.
- [5] Nobuyoshi. Mutoh, Takuro. Horigome, Kazuya. Takita, «**Driving Characteristics of an Electric Vehicle System with Independently Driven Front and Rear Wheels**» , EPE 2003, Toulouse
- [6] J. CHAGETTE, «**Technique automobile, tome 2**», Dunod, Bordas, Paris 1997.
- [7] NICOLAS. Trouche, « **Roue intégrée pour robots mobiles autonomes** », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, 1991.
- [8] Guy. Grellet, Guy. Clerc, « **Actionneurs Electriques, Principes Modèles Commande** », Eyrolles, deuxième tirage 2000.
- [9] Nobuyoshi. Mutoh, « **Electric Vehicle Drive System And Drive Method** », United State Patent NO.5, 549,172, (Aug.27, 1996)
- [10] Idar Petersen, « **Wheel Slip Control in ABS Brakes using Gain Scheduled Optimal Control with Constraints** », Thesis of Doktor Ingenior, Norway 2003.
- [11] Hideo Sado ,Shin-ichiro Sakai, and Yoichi. Hori, « **Novel skid avoidance method without vehicle chassis speed for electric vehicle** », In Proc. International Power Electronics Conference (IPEC), Vol. 4, pp. 1979–1984, Tokyo, Japan, 2000.
- [12] **Abdessemed R. Kadjoudj M**, « Modélisation des machines électriques », Université de Batna, 1997.
- [13] **Chouiter D.R**, « **Conception et réalisation d'une commande robuste de machine asynchrone** », Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997.

-
- [14] **Canudas de wit C**, « **Commande des moteurs asynchrones 1, Modélisation contrôle vectoriel et DTC** », Paris, Hermès Science Publications, 2000.
- [15] **Grelet G. Clerc G**, « **Actionneurs électriques, principes modèles commande** », Editions Eyrolle, 1997.
- [16] **A.HERIZI, H.SERRAI**, «**Commande des systèmes non linéaires par Backstepping** », Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, université de M'sila, juin 2006.
- [17] **N. MANSOURI, L. BENZAADIA**, « **Etude de différents estimateurs du flux statorique lors du contrôle directe du couple d'une machine à induction** », Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, université de M'sila, juin 2008.
- [18] **W. TEODOR**, « **Electrotechnique** », 4ème édition, Bibliographie nationale Paris, 2005.
- [19] **M. ATCHI**, « **Commande prédictive généralisée, application sur la machine asynchrone** », Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, Ecole nationale polytechnique, juin 2007.
- [20] **J. CHIASSON**, « **Modeling and High performance control of electric machines** », IEEE Press series on power engineering © 2005.
- [21] **C. CANUDAS de Wit**, « **Commande des moteurs asynchrones** », Hermes. Paris. 2000.
- [22] **M. BOUHARKAT**, « **Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone a cage en régime dynamique** », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2006.
- [23] **G.GREELLET, G.CLARC**, «**Actionneurs électriques : Principes/ Modèles/ Commande** », Edition Eyrolles, Paris 2000.
- [24] **B. REDA**, « **Contrôle Vectoriel de la Machine Asynchrone** », Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, Université de Constantine, juin 2000.
- [25] **M. ABD ELKEBIR, N. MERZOUG**, " **Contrôle direct de couple d'une machine à induction," Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, université de M'sila, juin2005.**
- [26] **A. RAHAL, M. FEDJIRI**, "**Contrôle Direct du Couple de la Machine Asynchrone," Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, Université de M'sila, juin 2004.**
- [27] **Z. RABAH**, « **Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone Alimentée par des Onduleurs Multi-niveaux** », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

[28] **J. Beretta**, « **Génie électrique automobile, la traction électrique** », H. Science, éd.2005. LAVOISIER.

[29] **Walid HANKACHE**, « **Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible** », UNIVERSITÉ DE TOULOUSE. Thèse de doctorat 2008.

[30] **Olivier GERGAUD**, «**Modélisation énergétique et optimisation économique d'on système de production éolien photovoltaïque couplé au réseau et associé a un accumulateur**», Thèse de Doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN.

[31] **Kerem Koprubasi**. «**Modeling and control of a hybrid-electric vehicle for drivability and fuel economy improvements**». The Ohio State University p40-59, 2008.

[32] **Hitoshi Takeshita**, «**Model-Based Design for Electrical Automobile Chassis Control**», The MathWorks, Inc.2009.

[33] **Yoichi Hori, Yasushi Toyoda and Yoshimasa Tsuruoka**. «**Traction Control of Electric Vehicle**». University of Tokyo.

[34] **Bekheira Tabbache, Abdelaziz Kheloui and Mohamed Benbouzid**. **An Adaptive Electric Differential for Electric Vehicles Motion Stabilization**. IEEE. 2010.

[35] **Canudas de wit C**, « **Commande des moteurs asynchrones 1, Modélisation contrôle vectoriel et DTC** », Paris, Hermès Science Publications, 2000.

[36] **Chouiter D.R**, « **Conception et réalisation d'une commande robuste de machine asynchrone** ». Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997.

[37] **Grelet G. Clerc G**, « **Actionneurs électriques, principes modèles commande** », Editions Eyrolle, 1997.