

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Abderrahmane MIRA Bejaia**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**



## *Mémoire de fin d'études*

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique**

**Option : Machines Electriques**

### *Thème*

---

**Contribution à la commande d'une machine  
asynchrone double étoile dédiée à un véhicule  
électrique**

---

**Présenté par :**

DJERROUD Lamia

AIT BRAHAM Lyna

**Encadré par :**

M<sup>f</sup> LARBA Mohamed

M<sup>lle</sup> BENBOUYA Basma

**Année Universitaire 2019/2020**

## *Remerciements*

Nous tenons en premier lieu à remercier le bon DIEU de nous avoir donné les moyens et l'énergie pour réaliser ce travail.

Nous exprimons nos remerciements pour notre promoteur Mr M.LARBA.

Nous remercions aussi notre Co-promotrice Mlle B.BENBOUYA qui nous a apporté son temps et son aide et contribué à l'élaboration de ce projet.

Nous remercions Mr H .AMIMEUR, Maître de conférences à l'Université de Bejaia pour son aide.

Nous tenons à remercier également Mr Y.HAMOUDI pour l'aide qu'il nous a apporté.

Que les membres du jury trouvent ici nos remerciements les plus vifs pour avoir accepté d'honorer par leur jugement notre travail.

Nous remercions aussi tous les enseignements et responsables du département Electrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Tout notre respect à toute personne qui a de près ou de loin contribué à la réalisation de ce travail particulièrement nos chères familles et nos amis(es).

## *Dédicaces*

Nous dédions ce modeste travail à nos chers parents en témoignage de notre gratitude pour leurs dévouements et leurs soutient permanent durant toutes nos études, leurs réconforts, leurs sacrifices pour nous voir réussir un jour.

Que DIEU les garde.

A nos frères et sœurs.

A nos amis.

**LAMIA et LYNA**

# Liste des figures

Figure 1 : Ancien véhicule nommé « La jamais contente » .....	4
Figure 2 : Véhicule tout électrique.....	5
Figure 3 : L'architecture d'un VE hybride série.....	6
Figure 4 : L'architecture hybride parallèle (arbre simple).....	7
Figure 5 : L'architecture hybride série/parallèle.....	7
Figure 6 : Architecture d'un véhicule électrique .....	8
Figure 7: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible .....	9
Figure 8 : Eléments constituant la chaîne de traction d'un véhicule électrique .....	10
Figure 9 : Principe de fonctionnement d'une batterie .....	11
Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEM .....	11
Figure 11 : Structure d'un supercondensateur .....	12
Figure 12 : Schéma d'onduleur de tension .....	13
Figure 13 : Différents composants de la machine à courant continu .....	14
Figure 14 : Machine synchrone.....	15
Figure 15 : Vue en coupe d'un moteur asynchrone triphasé.....	16
Figure 16 : Chaîne de traction asynchrone .....	19
Figure 17 : Schéma de base du comportement des supercondensateurs.....	21
Figure 18 : Schéma d'un onduleur triphasé à quatre bras.....	22
Figure 19 : Représentation schématique des enroulements d'une MASDE.....	24
Figure 20 : Représentation du modèle généralisé de la MASDE selon les axes «u, v».....	28
Figure 21 : Modèle d'une batterie sous Matlab/Simulink .....	34
Figure 22 : Courbe de la tension de charge de la batterie.....	35
Figure 23 : Modèle d'un super condensateur sous Matlab/Simulink .....	36
Figure 24 : Allure de la tension dans le cas de décharge .....	36
Figure 25 : Modèle d'un onduleur MLI sous Matlab/Simulink.....	37
Figure 26 : Allure de la variation de la tension de l'onduleur MLI.....	37
Figure 27 : Schéma bloc de la machine asynchrone double étoile.....	39
Figure 28 : Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du temps.....	40
Figure 29 : Courbe de variation de la vitesse en fonction du temps.....	40

Figure 30 : Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du temps.....	41
Figure 31 : Courbe de variation du courant statorique en fonction du temps .....	41
Figure 32 : Courbe de variation du flux rotorique direct en fonction du temps.....	41
Figure 33 : Courbe de variation du flux rotorique quadrature en fonction du temps .....	42
Figure 34 : Courbe de variation du courant statorique étoile 1e en fonction du temps .....	42
Figure 35 : Courbe de variation du courant statorique de l'étoile 2 en fonction du temps.....	42
Figure 36 : Courbe de variation du courant rotorique en fonction du temps.....	43
Figure 37 : Courbe de variation du couple résistant en fonction du temps.....	43
Figure 38 : Courbe de variation de la tension en fonction du temps.....	44
Figure 39 : Zoom sur la courbe de variation de la tension en fonction du temps.....	44
Figure 40 : Mode de fonctionnement dans le plan de phase.....	48
Figure 41 : Représentation de la fonction « sign ».....	51
Figure 42 : Illustration du phénomène de broutement .....	52
Figure 43 : Schéma bloc de la commande par mode de glissement de la machine asynchrone double étoile.....	53
Figure 44 : Courbe de la vitesse angulation en fonction du temps.....	54
Figure 45 : Allure du couple résistant en fonction du temps.....	54
Figure 46 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant.....	54
Figure 47 : Courbe de du courant rotorique en fonction du temps.....	55
Figure 48 : Courbe de l'allure du courant statorique direct en fonction du temps.....	55
Figure 49 : Courbe de l'allure de courant statorique quadrature en fonction du temps.....	55
Figure 50 : Courbe de l'allure du courant statorique en fonction du temps.....	56
Figure 51 : Courbe de l'allure du flux rotorique en fonction du temps.....	56
Figure 52 : Courbe de l'allure du flux rotorique en quadrature en fonction du temps.....	56
Figure 53 : Bilan des forces exercées sur un véhicule en mouvement	

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Eléments du cahier de charge d'un véhicule électrique

Tableau 2 : Paramètres de la machine asynchrone double étoile

Tableau 3 : Paramètres de la batterie

Tableau 4 : Paramètres du super condensateur

# Liste des abréviations et notations

## Principales abréviations

**MCC** : Moteur à courant continu

**VE** : Véhicule électrique

**VEB** : Véhicule électrique rechargeable à batterie

**MAS** : Moteur asynchrone

**MASDE** : Moteur asynchrone double étoile

**DC/DC** : Direct current / Direct current

**DC/AC** : Direct current / Alternatif current

**Batt** : Batterie chimique

**SC** : Super condensateur

**PAC** : Pile à combustible

**MSAP** : Machine synchrone à aimant permanent

**MADA** : Machine asynchrone à double alimentation

**MAS** : Machine asynchrone

**M.L.I** : Modulation par Largeur d'Impulsion

**MC** : Mode de convergence

## Principales notations

**$U$**  : Tension de la source (V)

**$I$**  : Courant continue (A)

**$V_{nom}$**  : La tension nominale (V)

**$Q_{cell}$**  : Capacité de la cellule de la batterie (Ah)

**$t_{auto}$**  : Le temps de décharge de la batterie

**$i_t$**  : La charge actuelle de la batterie (A)

**$E_{batt}$**  : Tension à vide de la batterie (V)

**$E_0$**  : La tension en circuit ouvert (v)

**$B$**  : l'inverse de la constante de temps de la zone exponentielle (Ah)

**$\eta$**  : Rendement

$K$  : la constante de polarisation (V/h)  
 $as, bs, cs$  : Les trois phases statorique  
 $ar, br, cr$ : les trois phases rotoriques  
 $V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}$  : Les tensions composées (V)  
 $\vartheta_{as1}$ : Tension simple triphasé de l'étoile 1 (V)  
 $\vartheta_{bs1}$ : Tension simple triphasé de l'étoile 2 (V)  
 $\vartheta_{s1}$ : Tension statorique de l'étoile1 (V)  
 $\vartheta_{s2}$  : Tension statorique de l'étoile2 (V)  
 $\vartheta_r$ : Tension rotorique (V)  
 $i_{as1}$ : Courants triphasés de l'étoile 1 (A)  
 $i_{as2}$ : Courants triphasés de l'étoile 2 (A)  
 $i_{ar}$ : Courants triphasés rotoriques (A)  
 $\varphi_{as1}$ : Flux triphasés de l'étoile 1 (Wb)  
 $\varphi_{as2}$ : Flux triphasés de l'étoile 2 (Wb)  
 $\varphi_{ar}$ : Flux triphasés rotorique (Wb)  
 $R_{as1}$ : Résistances des trois phases statoriques de l'étoile 1( $\Omega$ )  
 $R_{as2}$ : Résistances des trois phases statoriques de l'étoile 2 ( $\Omega$ )  
 $R_r$ : Résistances des trois phases rotoriques ( $\Omega$ )  
 $L_m$ : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et l'étoile 2 (H)  
 $L_{ms}$ : Inductance mutuelle cyclique stator (H)  
 $L_{mr}$ : Inductance mutuelle cyclique rotor (H)  
 $L_{sr}$ : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (H)  
 $L_r$ : Inductance rotorique (H)  
 $L_{s1}$ : Inductance statoriques de l'étoile 1 (H)  
 $L_{s2}$ : Inductance statoriques de l'étoile 2 (H)  
 $C_{em}$ : Couple électromagnétique (N.m)  
 $\theta_{géo}$ : Position géométrique de rotation  
 $\theta_{élec}$ : Position électrique  
 $W$ : Energie électromagnétique (Joule)  
 $P$  : Nombres de pair de pôles

$C_r$ : Couple résistant(N.m)

$J$ : Inertie totale des parties tournantes ( $Kg.m^2$ )

$K_F$ : Coefficient de frottement (Nms/rad)

$\Omega$ : Vitesse mécanique de rotation du rotor (rad/s)

$\theta_r$ : Position du rotor par rapport à l'étoile 1 (rad)

$\theta_s$ : Position électrique relatif aux grandeurs électriques statoriques

$\omega_r$ : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotoriques (rad/s)

$\omega_s$ : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statoriques (rad/s)

$\theta_{gl}$ : Position de l'axe u par rapport au rotor (rad)

$\omega_{coor}$ : Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au Système d'axes triphasé.

$v_{v1}, v_{u1}$ : Tensions de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (u, v) (V)

$v_{v2}, v_{u2}$ : Tensions de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (u, v) (V)

$v_{vr}, v_{ur}$ : Tensions rotoriques dans le référentiel de Park (u, v) (V)

$\phi_{v1}, \phi_{u1}$ : Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (u, v) (Wb)

$\phi_{v2}, \phi_{u2}$ : Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (u, v) (Wb)

$\phi_{vr}, \phi_{ur}$ : Flux rotoriques dans le référentiel de Park (u, v) (Wb)

$i_{v1}, i_{u1}$ : Courants de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (u, v) (A)

$i_{v2}, i_{u2}$ : Courants de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (u, v) (A)

$i_{vr}, i_{ur}$ : Courants rotoriques dans le référentiel de Park (u, v) (A)

$\omega_{gl}$ : Pulsation électrique fondamentale du glissement (rd/s)

$i_{d1}$ : Courants de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d, q) (A)

$i_{d2}$ : Courants de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d, q) (A)

$v_{d1}, v_{q1}$ : Tensions de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d, q) ( V )

$v_{d2}, v_{q2}$ : Tensions de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d, q) ( V )

$\phi_{d1}, \phi_{q1}$ : Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d, q) (Wb)

$\phi_{d2}, \phi_{q2}$ : Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d, q) (Wb)

$v_{dr}, v_{qr}$ : Tensions rotoriques dans le référentiel de Park (d, q) ( V )

$i_{dr}, i_{qr}$ : Courants rotoriques dans le référentiel de Park (d, q) (V)

$\Phi_{dr}, \Phi_{qr}$  : Flux rotoriques dans le référentiel de Park (d, q) (Wb)

$P_a$ : Puissance absorbée par la MASDE (W)

$P_{em}$ : Puissance électromagnétique (W)

$V_m$  : Amplitude de la tension de référence (V )

$V_{eff}$  : La tension efficace (V)

$\alpha$  : Angle électrique de décalage entre les deux étoiles (rad)

$C_r$  : Couple résistant (de charge) (N.m)

$F$  : Fréquence de la tension de référence (Hz)

$f_p$ : Fréquence de la porteuse (Hz)

$r_1$ : Résistance d'une phase (statorique) de l'étoile 1 ( $\Omega$ )

$r_2$ : Résistance d'une phase (statorique) de l'étoile 2 ( $\Omega$ )

$r$  : Coefficient de réglage en tension

$U_{eqq}$ : La commande équivalente [V]

# Table des métiers

Remerciement	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations et notations	
Table des matières	
Introduction générale.....	1
Chapitre 01: Généralité et présentation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	3
I. Introduction .....	3
II. Historique de la voiture électrique.....	3
III. Définition d'un véhicule électrique .....	4
IV. Architecture d'un véhicule électrique.....	4
V. Différentes technologies des véhicules électriques.....	5
V.1 Véhicule hybrides.....	5
V.2 Véhicule électrique rechargeables a batterie.....	8
V.3 Véhicule électrique a hydrogène.....	8
VI. Eléments constituant une chaîne de traction.....	9
VII. Alimentation d'une chaîne de traction .....	10
VIII. Motorisations d'une chaîne de traction.....	13
VIII.1 Machines à courant continu.....	13
VIII.2 Machine à courant alternatif.....	14
VIII.2.1 Machine synchrone.....	14
VIII.2.1.1 Machine synchrone a aimant permanent.....	15
VIII.2.2 Machine asynchrone.....	15
VIII.2.2.1 Machine asynchrone a rotor bobiné (rotor a bague).....	16
VIII.2.2.2 Machine asynchrone a cage d'écureuil (rotor en court-circuit).....	16
VIII.2.2.3 Machine a réluctance variable.....	16
VIII.2.2.4 Machine asynchrone double alimentation.....	17
VIII.2.2.5 Machine asynchrone double étoile.....	17
IX. Avantages et inconvénients d'un véhicule électrique.....	17
IX.1 Avantages.....	17
IX.2 Inconvénients.....	18
X. Conclusion.....	18
Chapitre 02: Modélisation des éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique ...	19
I. Introduction .....	19
II. Modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	19
II.1 Modélisation de la batterie.....	20

II.2	Modélisation d'un super condensateur.....	21
II.3	Modélisation de l'onduleur.....	22
II.4	Modélisation de la MASDE.....	23
II.4.1	La constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE).....	23
II.4.2	Principe de fonctionnement de la MASDE.....	23
II.4.3	Description de la machine asynchrone double étoile (MASDE).....	24
II.4.4	Les hypothèses simplificatrices.....	24
II.5	Modèle de la MASDE dans le repère naturel.....	25
II.5.1	Equations électriques.....	25
II.5.2	Equations magnétiques.....	25
II.5.3	Expression du couple électromagnétique.....	26
II.5.4	Equations mécanique.....	27
II.6	Modèle biphasé de la MASDE.....	27
II.6.1.	Transformation de PARK.....	27
II.6.2.	Modèle de la MASDE selon le système d'axe généralisé « u, v».....	28
II.6.3.	Choix du système d'axes.....	29
II.6.4.	Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes « d, q».....	30
II.6.5.	Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	31
III.	Conclusion.....	33
Chapitre 03 : Simulation et éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.....		34
I.	Introduction.....	34
II.	Simulation de la batterie.....	34
II.1	Résultats de simulation de batterie.....	35
III.	Simulation d'un super condensateur.....	35
III.1	Schéma bloc.....	36
III.2	Résultats de simulation.....	36
IV.	Simulation d'un onduleur.....	37
IV.1	Schéma bloc.....	37
IV.2	Résultats de simulation.....	37
V.	Simulation de la MASDE.....	38
V.1	Schéma bloc.....	39
V.2	Résultats de simulation.....	40
V.3	Discussion des résultats de simulation.....	44
VI.	Commande MLI.....	45
VII.	Conclusion.....	46
Chapitre 04 : Application d'une commande par mode de glissement sur la MASDE.....		47
I.	Introduction.....	47
II.	Définition de la commande par mode de glissement.....	47
III.	Principe de la commande par mode de glissement.....	47

III.1	Conception de la commande par mode de glissement.....	48
III.1.1	Le choix de la surface.....	48
III.1.2	Condition d'existence et de convergence.....	49
III.1.3	Fonction directe de commutation.....	49
III.1.4	Fonction de Lyapunov.....	49
III.1.5	Détermination de la loi commande.....	50
IV.	Avantage et inconvénients de la commande par mode glissant.....	52
V.	Simulation de la commande par la MASDE.....	53
V.1	Schéma bloc.....	53
V.2	Résultats de simulation.....	53
V.3	Discussion des résultats.....	57
VI.	Conclusion.....	57
	Conclusion générale.....	58
	Bibliographie	
	Annexe	

## **Introduction générale**

Le changement climatique a été reconnu comme une préoccupation majeure de la planète. Le secteur des transports routiers est l'un des plus grands consommateurs d'énergie et pollueurs en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Dans ce contexte, la propulsion électrique offre une solution idéale, sans émission et avec une opportunité d'être alimenté par une énergie électrique qui devient renouvelable. Toutefois, le véhicule électrique souffre de limites principalement liées à l'autonomie et au coût de fabrication en comparaison avec des solutions thermiques [30].

La chaîne de traction qui propulse ces véhicules est composée d'éléments spécifiques à savoir des batteries comme source d'énergie, des machines électrique notamment, les machines à courant continu, les machines synchrones et plus spécialement les machines asynchrones.

Actuellement un intérêt de plus en plus croissant est accordé aux systèmes de conversion à base de machines asynchrones, et ceci est dû aux avantages qu'offre ce type de machines en termes de puissance, fiabilité...

L'étude de la MASDE dédiée à un véhicule électrique sa structure, sa modélisation, son alimentation et enfin sa commande par mode de glissement font l'objet de quatre chapitre qui constitue notre mémoire.

Le premier chapitre sera consacré à la présentation du véhicule électrique : son histoire, son architecture, les éléments constituant sa chaîne de traction et enfin quelque généralité sur les machines multiphasées, la présentation des différents types de machines multiphasées, leurs avantages et leurs inconvénients tout en prenant l'exemple de la machine asynchrone double étoile.

Dans le deuxième chapitre nous allons élaborer une modélisation des différents organes de la chaîne de traction du véhicule électrique en commençant par modéliser les sources d'énergie (batterie et super-condensateur) puis le convertisseur statique (DC/AC), et après, une description de la MASDE. On développe au premier lieu son modèle triphasé, ensuite le modèle triphasé basé sur la transformation de Park.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation des éléments formant la chaîne de traction. Nous présentons l'alimentation de la machine par onduleur de commande M.L.I. La modélisation et la simulation vont être effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink.

Le quatrième chapitre est dédié à la commande par mode de glissement de la MASDE. Un aperçu sur le principe et le fonctionnement de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable. Nous entamons par la suite l'application de cette commande sur

la MASDE tout en montrons les avantages apportés par ce type de réglage en exposent les résultats de simulation.

Le travail sera achevé par une conclusion générale et les perspectives envisageables à l'avenir

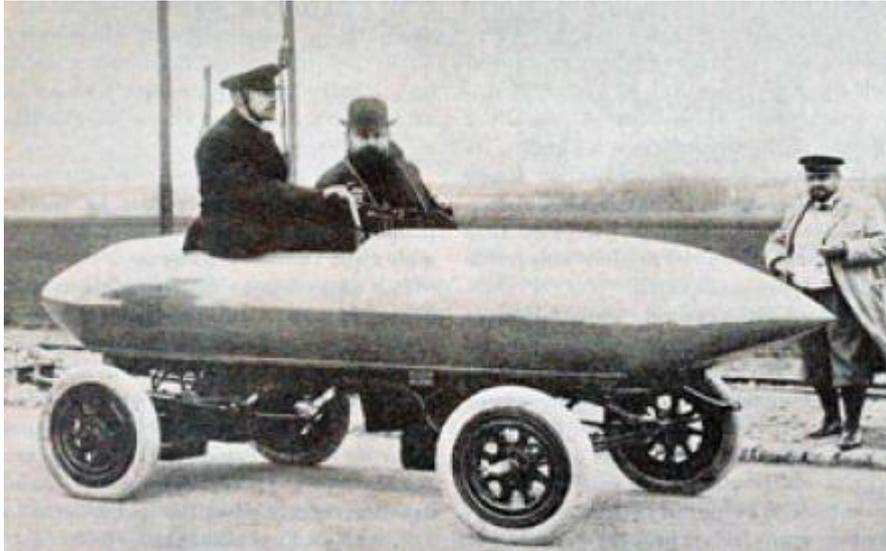
## **I. Introduction**

Un véhicule électrique peut être motorisé de différentes façons selon le degré de simplification mécanique souhaité de la chaîne de traction. Ce concept englobe un large domaine à caractère pluridisciplinaire. Il fait appel à des connaissances en électrotechnique, électronique, mécanique, automatique, chimie, et informatique. 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 [1].

Dans une première section de ce chapitre, la définition d'un véhicule électrique, ses différents composants, et ses différentes architectures. Dans une deuxième section nous allons présenter les éléments de la chaîne de traction électrique qui est généralement composée de source d'énergie (batteries) et des récepteurs (moteur de traction).

## **II. Historique de la voiture électrique**

L'histoire du véhicule électrique commence en Europe au début du XIX<sup>ème</sup> siècle. Après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday, la première voiture électrique a été construite en 1834 à Brandon, en Grande Bretagne, par un mécanicien nommé Thomas Davenport. Le petit véhicule fonctionnait sur une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail. Puis, en 1859, le français G. Planté inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable, et en 1869 Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval. 12 ans plus tard, en 1881 Gustave Trouvé, réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire. Le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu. Le début du XX<sup>ème</sup> siècle a constitué l'âge d'or du VE. En effet, c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100 km/h, en 1899, « *La Jamais Contente* ». Ce VE avait deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 KW [2].



**Figure 1** : Ancien véhicule électrique nommé « La jamais contente »

### **III. Définition d'un véhicule électrique**

Un véhicule électrique est un véhicule dont le moteur fonctionne grâce à une source d'énergie basée sur une batterie ou une pile à combustible. Ce dernier est plus écologique que l'automobile classique à essence, diesel. Ces voitures existent depuis la fin du XIXe siècle, mais sont commercialisées seulement depuis la fin du XXe siècle [3].

Une voiture électrique, ne contient pas de réservoir à carburant car elle n'a pas de moteur à combustion mais plutôt un moteur électrique piloté par un contrôleur électronique et associé à une batterie. Plus ou moins grande, celle-ci permet de parcourir de 100 à plusieurs centaines de kilomètres selon les modèles et se recharge directement sur le réseau électrique, chez soi ou sur une borne de recharge publique [4].

### **IV. Architecture d'un véhicule électrique**

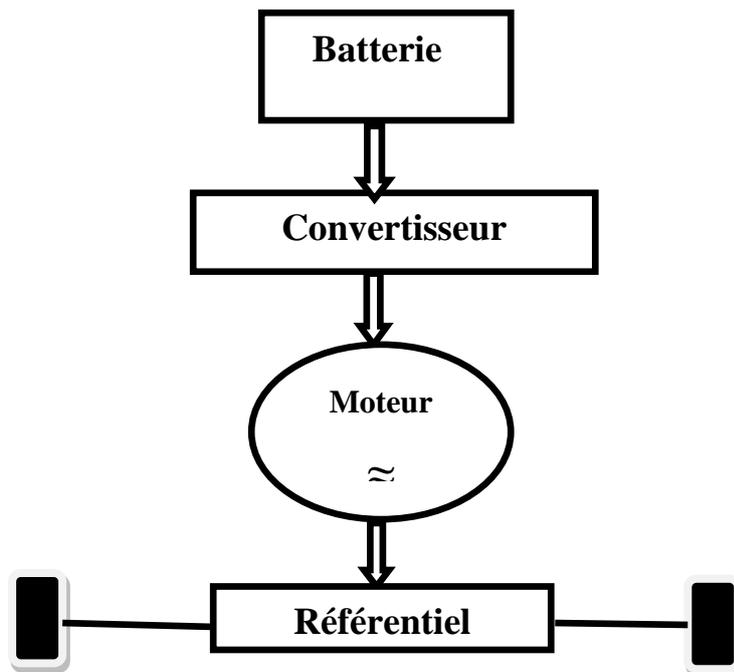
La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire à base d'un véhicule thermique, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique [5].

L'architecture mécanique du véhicule électrique est conservée car les contraintes de dimensionnement en couple et en vitesse sont les mêmes que celles du moteur thermique [6]. Les moteurs électriques utilisés pour la traction ont un meilleur comportement à faible vitesse de rotation et délivrent une puissance plus importante. La capacité des moteurs électriques, démarre à couple élevé et fonctionne sur une large plage de vitesse, rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses [7].

Comme le couple est une grandeur dimensionnante, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embaquée, les véhicules électriques peuvent être conçus avec un réducteur qui permet

au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des véhicules électriques [8].

La structure est donnée par le schéma de la figure suivante :



**Figure 2** : Véhicule tout électrique

## **V. Différentes technologies de véhicules électriques**

La notion du véhicule électrique dans notre langage désigne plusieurs types par rapport à sa technologie. Nous présentons quelques technologies les plus connus :

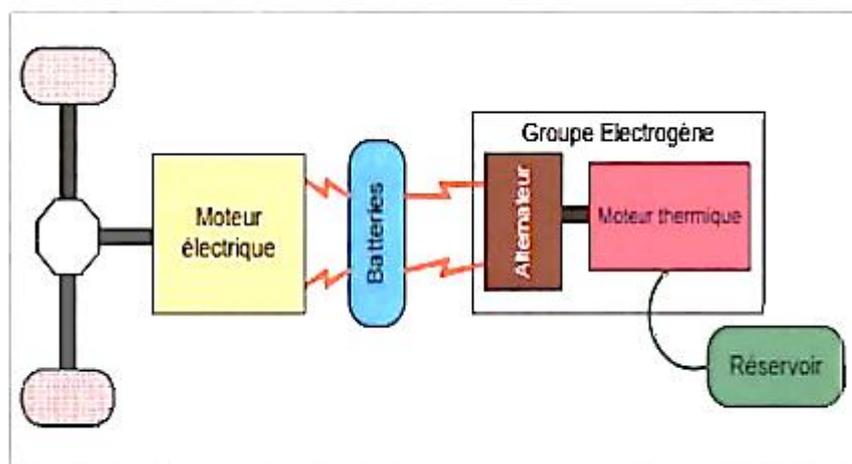
### **V.1 Véhicules hybrides**

Selon « International Energy Agency (IEA) », la définition la plus appropriée d'un véhicule hybride est la suivante : « un véhicule hybride contient un groupe motopropulseur, dans lequel l'énergie est transmise par au moins deux systèmes de conversion d'énergie différents qui tirent l'énergie d'au moins deux systèmes de stockage d'énergie différents. Dans ces véhicules, au moins un des flux est réversible, c'est celui où l'énergie circule du système de stockage d'énergie aux roues et au moins un autre flux devrait être irréversible. C'est le système de stockage d'énergie réversible, qui devrait fournir l'énergie électrique ».

Les véhicules hybrides électriques peuvent être classés selon l'architecture dans laquelle sont intégrés les différents composants de la chaîne de traction. On distingue trois architectures du véhicule hybride électrique : hybride série, hybride parallèle et hybride série/parallèle [9].

- **Hybride série (HS) :**

Cette architecture désigne un modèle où le moteur thermique n'est pas directement couplé aux roues (Figure 3). Seul le moteur électrique, qui est alimenté par une batterie et/ou par un système de type groupe électrogène, assure la propulsion. Parmi les modèles électriques qui ont adapté l'hybride série, on retrouve la Chevrolet Volt (2010) [9].



**Figure 3 :** L'architecture d'un VE hybride série.

- **Hybride parallèle :**

Dans un hybride parallèle, les deux sources d'énergie (moteur thermique et la/les machine(s) électrique(s)) sont associées aux roues et liées mécaniquement entre elles (Figure 4). Les flux énergétiques des deux sources d'énergie arrivent en parallèle aux roues, assurant ainsi la traction du véhicule conjointement ou séparément. La Ford Escape et la PSA Peugeot Citroën sont parmi les véhicules hybrides parallèles commerciaux [9].

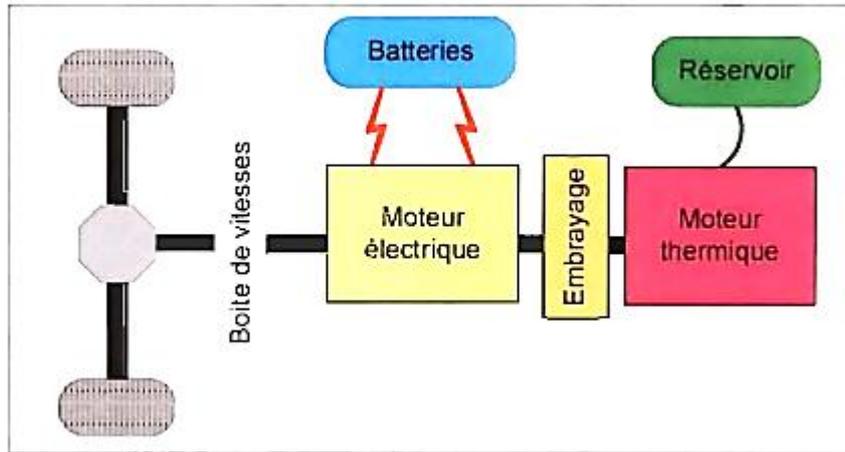


Figure 4 : L'architecture hybride parallèle (arbre simple).

- **Hybride Série/Parallèle :**

L'architecture série/parallèle est un modèle complexe qui combine les principes de fonctionnement des architectures série et parallèle. Cette architecture contient au moins deux machines électriques en plus du moteur thermique pour que le couple et le régime du moteur thermique puissent être sélectionnés presque indépendamment des conditions de conduite Figure (5). Dans ce modèle d'hybridation, le fonctionnement série ou parallèle est possible soit d'une manière indépendante ou bien simultanée. Le véhicule hybride série/parallèle assure un usage sélectif du moteur thermique et électrique pour économiser la consommation du carburant. Parmi les véhicules commerciaux adoptant ce type d'architecture, on trouve la Toyota Prius présentée dès 1997 [9].

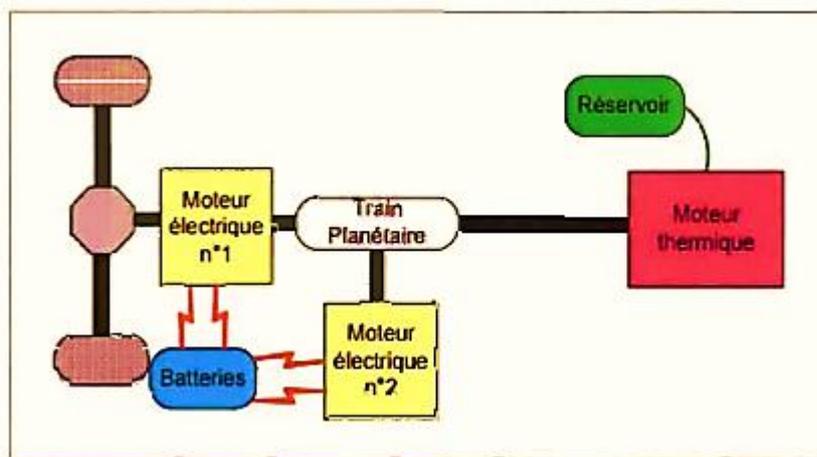


Figure 5 : L'architecture hybride série/parallèle

## V.2 Véhicules électriques rechargeables à batterie

Un véhicule électrique rechargeable à batterie (VEB) se définit comme étant un véhicule cent pour cent électrique. Ce type de véhicule est uniquement doté d'une chaîne de traction électrique [9].

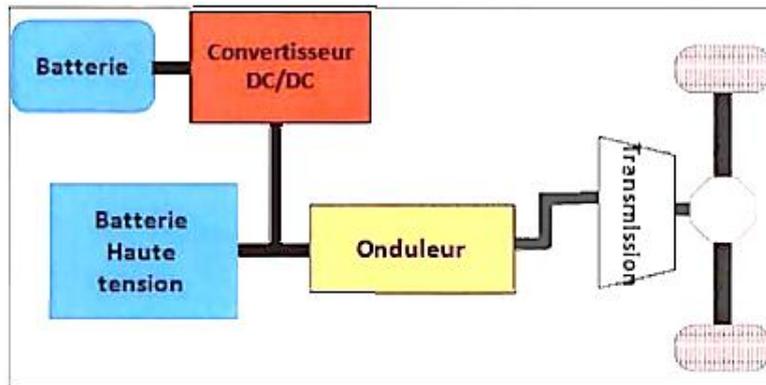


Figure 6 : Architecture d'un véhicule électrique

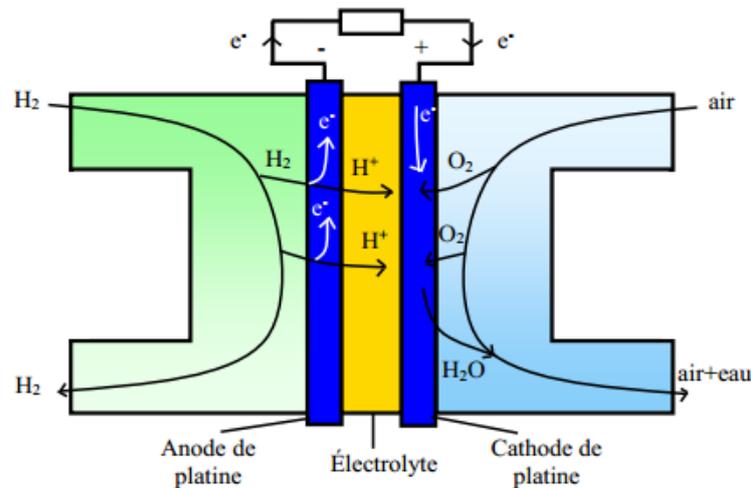
## V.3 Véhicules électriques à hydrogène

Dans le domaine de l'automobile le réservoir d'hydrogène prend généralement la forme d'une bonbonne résistante et légère en plastique renforcé par fibres de carbone et par une enveloppe interne métallique « liner ».

Il existe deux technologies d'automobiles à hydrogène. La première utilise un moteur thermique pour convertir l'énergie chimique des bonbonnes en énergie thermique de traction idéalement un piston y compresse un mélange d'hydrogène ( $H_2$ ) et de dioxygène ( $O_2$ ) à haute température la combustion résultante crée de l'eau ( $H_2O$ ) et repousse le piston afin de créer un mouvement nécessaire à la traction. Dans la pratique c'est de l'air qui est utilisé comme oxydant. L' $H_2$  peut être utilisé dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs thermique conventionnel mais cette utilisation produit plus de polluants que de brûler l' $H_2$  seul. Le moteur à hydrogène apparait donc comme une technologie de transition dont les applications restent pour le moment des prototypes ou des démonstrateurs technologiques.

La seconde technologie utilise une pile à combustible (PAC) afin de convertir l'énergie des bonbonnes en énergie électrique (Figure 7) une électrolyse inverse y réunit des molécules d' $H_2$  et  $O_2$  pour crée de l'eau, de l'électricité et de la chaleur.

Une oxydation d'  $H_2$  à lieu à l'anode : un catalyseur de platine sépare les protons ( $H^+$  sur la figure 7) l'hydrogène des électrons ( $e^-$ ). Une membrane électrolytique est ensuite traversée par les protons. Les électrons quant à eux sont bloqués par la membrane et forcé d'emprunter un chemin différent pour migrer vers la cathode et rejoindre les protons. Ce mouvement d'électrons génère alors un courant électrique et enfin le courant alimente une motorisation électrique [10].



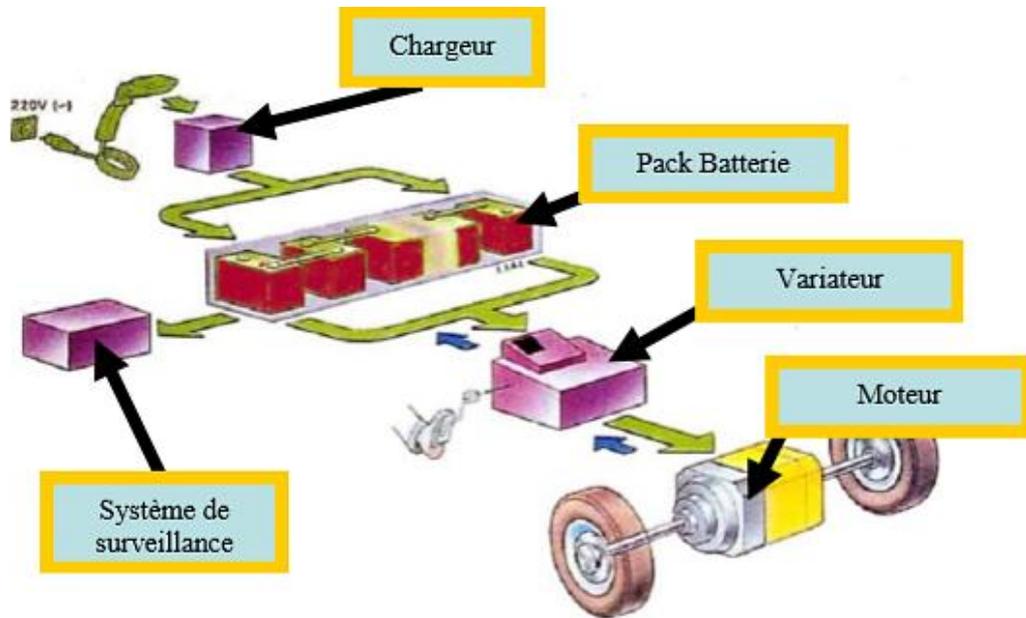
**Figure 7:** Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

## **VI. Éléments constituant une chaîne de traction**

Depuis les premiers modèles de véhicules électriques, les éléments de base constituant la chaîne de traction n'ont guère changés. Le véhicule est toujours constitué d'accumulateurs pour le stockage d'énergie électrique, d'un moteur pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et d'un convertisseur électrique pour transférer et contrôler la puissance des batteries au moteur. Ces convertisseurs font appel à des structures d'électronique de puissance largement développées par ailleurs, en particulier dans la variation de vitesse [11].

Ces dernières années, la composition des différents éléments d'un véhicule électrique a changé et ces constituants font appel à de nouvelles technologies mais présentent toujours les mêmes principes de fonctionnement. Les premières batteries à plomb ont été remplacées par des batteries au lithium ion qui présentent des densités de puissance plus importantes actuellement. Les moteurs à courant continu ont cédé la place aux moteurs triphasés qui présentent eux aussi une meilleure densité de puissance, de meilleurs rendements énergétiques et un entretien réduit. Les convertisseurs électriques sont adaptés pour piloter les moteurs mais

gardent le même principe qui est de transférer l'énergie électrique entre les batteries lors des phases de motricité et du moteur électrique aux batteries lors des phases de freinage [11]. Tout ceci est présenté sur la figure ci-dessous :



**Figure 8** : Eléments constituant la chaîne de traction d'un véhicule électrique

## **VII. Alimentation d'une chaîne de traction**

### ➤ **Batterie**

Les véhicules électriques actuels ont des batteries au Lithium-ion (ou Li-ion). Ces packs de batteries sont un ensemble de dizaines ou centaines de cellules, en série ou en parallèle. Les cellules sont composées d'électrodes en mélanges composites. L'anode négative est généralement à base de carbone. La cathode positive peut être formée de différentes chimies. Pour une batterie de traction de ~20kWh ou plus, les 4 principales chimies sont [12] :

- LMO : Lithium Manganèse Oxyde, c'est la chimie de la batterie du Twizy ;
- NMC : Nickel Manganese Cobalt ;
- NCA : Nickel Cobalt Aluminum ;
- LFP: Lithium Fer Phosphate.

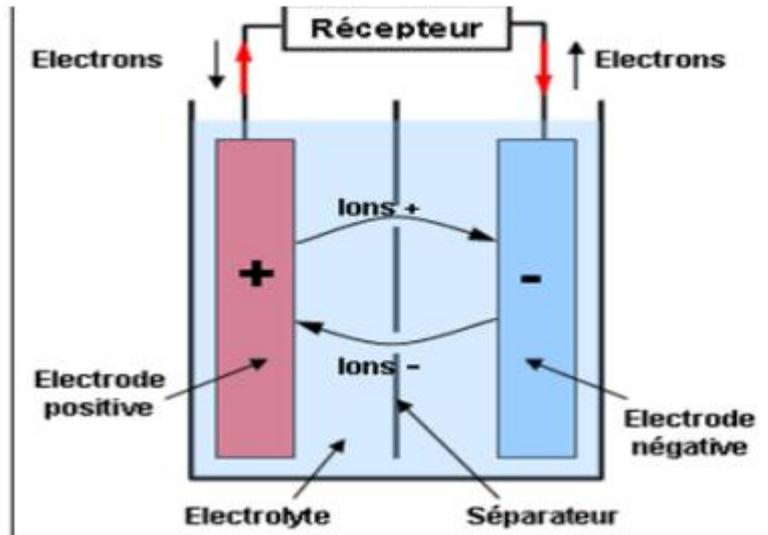


Figure 9 : Principe de fonctionnement d'une batterie

➤ Piles à combustible :

La pile à combustible de type PEM convertit l'énergie chimique (l'hydrogène et oxygène) en énergie électrique. Cette réaction électrochimique est une électrolyse de l'eau inverse. L'énergie électrique est produite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène (oxydant) et l'hydrogène (réducteur). L'oxydation a lieu à l'anode et la réduction à la cathode. Ces deux réactions sont isolées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte [13].

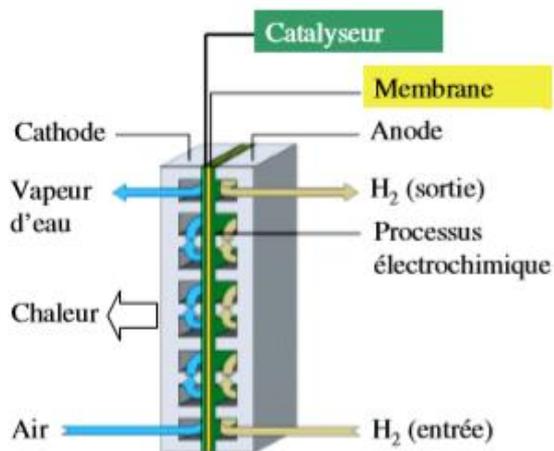


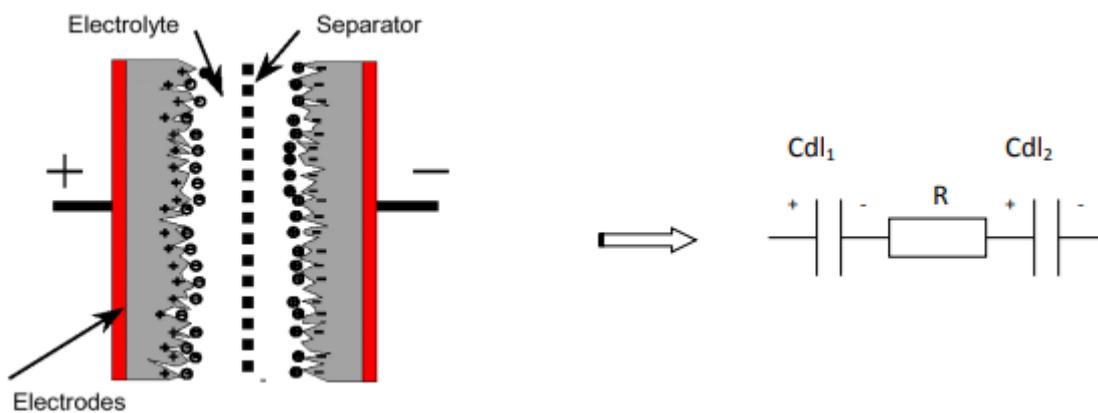
Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEM

➤ **Supercondensateurs :**

La structure de supercondensateur basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes [14].

En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est cette zone de charge d'espace qui est appelée double couche électrique. On peut donc considérer la structure élémentaire d'un supercondensateur comme deux condensateurs en série séparés par une résistance équivalente (Figure 11). Le stockage de l'énergie est principalement électrostatique, le stockage de l'électricité s'effectuant par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques [14].

Il est estimé que le taux de réactions faradiques à la surface du carbone est compris entre 1 et 5% [14].



**Figure 11 :** Structure d'un supercondensateur

➤ **Convertisseur statique :**

**a) L'onduleur DC-AC :**

L'onduleur de tension étant la structure de puissance la plus répandue et son principe de fonctionnement est bien connu. Le schéma de la structure de puissance est représenté sur la (Figure 12). L'onduleur est alimenté par une source de tension continue qui est la batterie du véhicule. Le côté alternatif est réalisé à l'aide de trois bras d'onduleur qui sont connectés sur les trois phases du moteur [15].

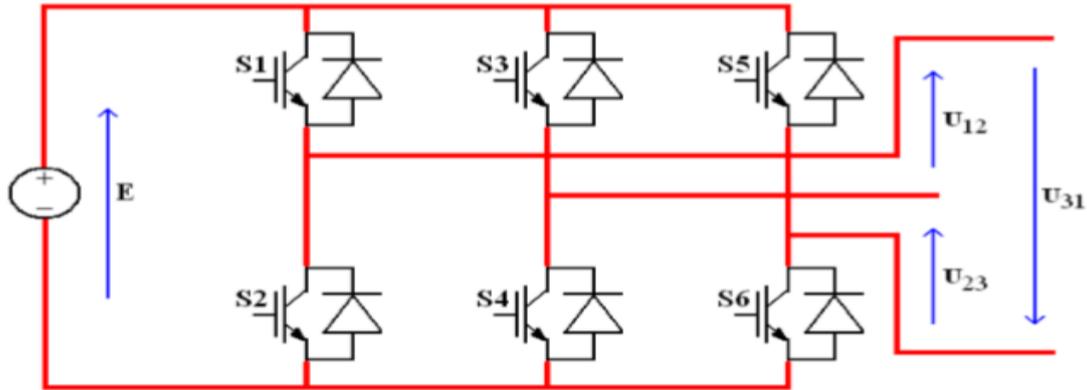


Figure 12 : Schéma d'onduleur de tension

### b) Le hacheur (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 et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation des divers récepteurs (capteurs, régulateurs, 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...) [16].

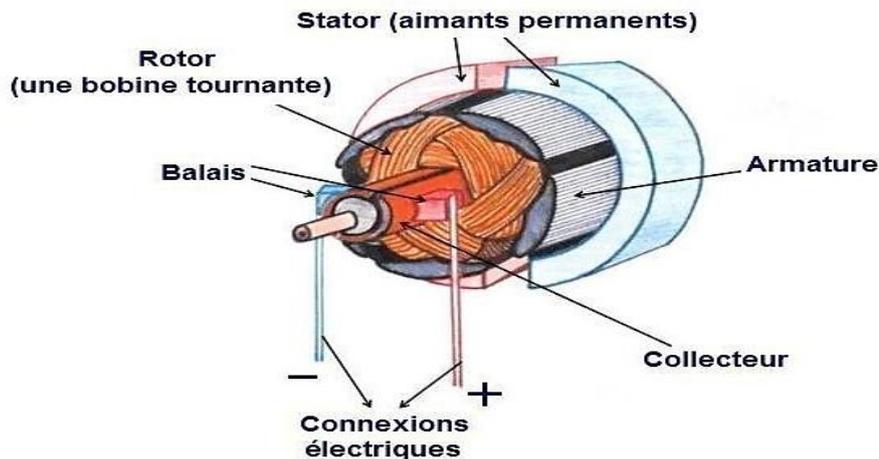
## VIII. Motorisations d'une chaîne de traction

La motorisation des véhicules a connu l'introduction de l'actionneur électrique sous plusieurs configurations : moteur à courant continu, moteur synchrone et moteur asynchrone. En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu. Mais l'évolution de l'électronique de puissance conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations à courant alternatif [9].

### VIII.1 Machines à courant continu

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie qui fonctionnent avec deux modes [17]:

- Mode moteur quand ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement.
- Mode génératrice quand ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée.

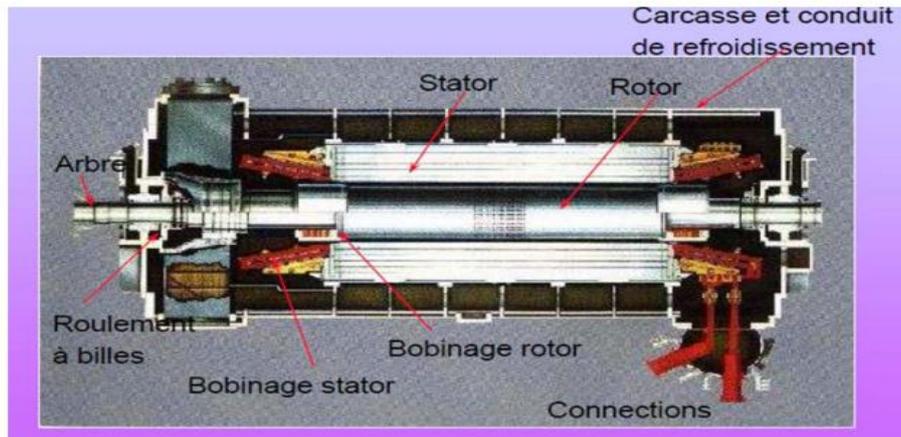


**Figure 13** : Différents composants de la machine à courant continu

## **VIII.2. Machines à courant alternatif**

### **VIII.2.1 Machine synchrone**

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons la plus fréquente dans la littérature : Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) semble à plus d'un titre, une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, son rendement. L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents. Les avantages dont dispose cette machine est les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente [1].



**Figure 14** : Machine synchrone

### **VIII.2.1.1 Machine synchrone à aimant permanent**

Les moteurs synchrones à aimants permanents ont une puissance massique et un rendement élevé. 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 statoriques [1].

### **VIII.2.2 Machine asynchrone**

La machine asynchrone (MAS) est la machine la plus répandue dans le monde industriel. Elle est simple, robuste, à bas coût et à rendement et densité de puissance élevé comparée à la MCC. Parmi les deux types de moteur asynchrone qui existent, l'un est appelé "à cage d'écureuil" et l'autre "à rotor bobine". La technologie avec cage d'écureuil est plus simple, plus robuste et moins chère et représente donc le choix préféré de beaucoup de fabricants et de développeurs. Si on parle de moteur asynchrone dans le monde des véhicules électriques c'est (presque) toujours du moteur à cage d'écureuil qu'il s'agit [15].

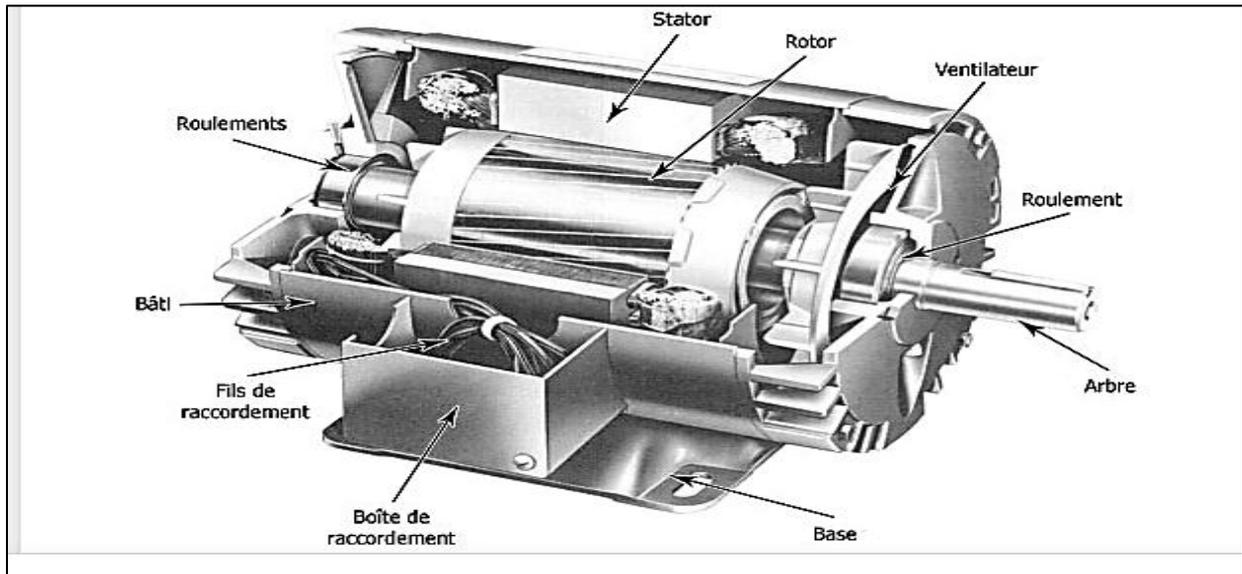


Figure 15 : Vue en coupe d'un moteur asynchrone triphasé

### VIII.2.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné (rotor à bague)

Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide des bagues collectrices. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil.

Cependant, il présente les avantages suivants :

- Le couple de démarrage est plus élevé,
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostats), Le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat [18].

### VIII.2.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil : (rotor en court-circuit)

C'est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé au début des années 1890. Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants d'induits [18].

### VIII.2.2.3 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, pourraient présenter des avantages spécifiques indéniables qui devraient jouer un rôle décisif dans le développement du véhicule électrique [18].

#### **VIII.2.2.4 Machine asynchrone double alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son coût par rapport aux topologies concurrentes [19].

#### **VIII.2.2.5 Machine asynchrone double étoile**

La machine asynchrone double étoile est une machine qui possède deux enroulements triphasés identiques. Les deux étoiles se partagent le même stator et sont décalés d'un angle électrique de  $30^\circ$ . Ces enroulements ont le même nombre de pôles et sont alimentés à la même fréquence. La structure du rotor reste identique à celle d'une machine triphasée ; il peut donc être soit à cage d'écureuil, soit bobiné pour former un enroulement triphasé. Une telle machine à l'avantage, outre la segmentation de puissance et la redondance intéressante qu'elle introduit, de réduire de manière significative les ondulations du couple électromagnétique et les pertes rotoriques [20].

### **IX. Avantages et inconvénients d'un véhicule électrique**

#### **IX.1 Avantages**

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui permettront aux consommateurs de faire à terme la différence entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques :

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.
- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).

- L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composés de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40 (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera le principal mode d'habitat du futur (mégapole).
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).
- Le principal avantage est l'indépendance vis-à-vis du pétrole.

### **IX.2 Inconvénients**

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des malle-faits :

- Question autonomie.
- Sans oublier que la voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.
- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.
- La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes.

### **X. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale le véhicule électrique et ses différentes architectures, puis on a détaillé les différents éléments de sa chaîne de traction (source d'énergies, convertisseurs statique et moteurs) et on a terminé par citer ses avantages et inconvénient

## I. Introduction

Le véhicule électrique (VE) est un système complexe constitué de plusieurs composants différents (mécanique, électrique, électrochimique, ...) qui sont en interaction. Son comportement est 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 [22].

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

## II. Modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique

Un groupe motopropulseur se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel) [22].

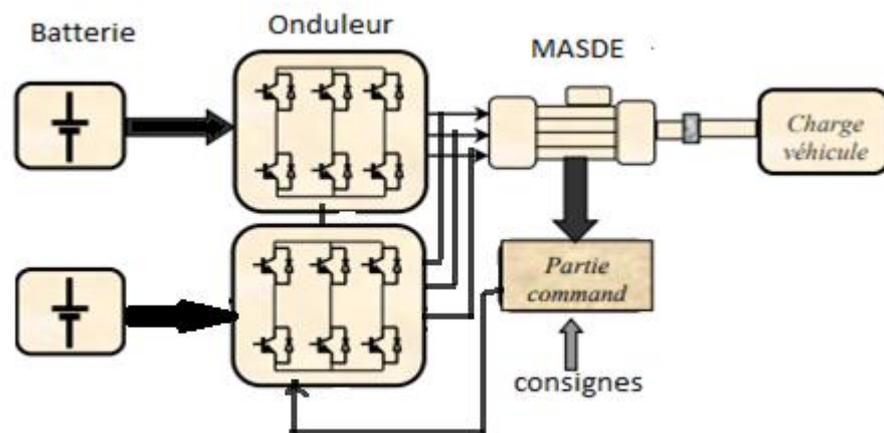


Figure 2 : Chaîne de traction asynchrone

- Source d'énergie : La source d'énergie est une batterie d'accumulateur, ou un supercondensateur qui a pour but de fournir (éventuellement de récupérer en cas de freinage) l'énergie électrique.
- Convertisseur : Les onduleurs sont utilisés dans la chaîne de traction pour gérer les échanges énergétiques entre la source d'énergie et le groupe motopropulseur (moteur de traction). L'onduleur de tension permet une alimentation alternative triphasée du moteur. Les semi-conducteurs utilisés sont des IGBT.

- Partie commande : La partie commande reçoit sur son entrée des consignes telles que : le couple demandé par l'utilisateur et la vitesse de rotation de la machine.
- Moteur de traction : Le moteur utilisé est de type asynchrone triphasé double étoiles. L'intérêt de ce type de machine est sa grande fiabilité, sa segmentation de puissance et son rendement plus élevé.
- Partie mécanique : Il existe une transmission mécanique comprenant un réducteur entre le moteur et la roue [22].

## II.1. Modélisation de la batterie

Les deux propriétés principales d'une batterie sont sa tension  $V_{nom}$  et sa capacité  $Q_{cell}$  en Ah. Le produit de ces deux valeurs est une mesure de la quantité d'énergie contenue dans la batterie. Dans une source de tension idéale, la tension devrait demeurer constante en tout temps, jusqu'à ce que la batterie soit complètement déchargée, et ce peu importe la demande de courant [23]. Ainsi l'autonomie d'une batterie devrait pouvoir se calculer directement par l'équation 2.1, où  $t_{auto}$  est le temps de décharge et  $I$  est le courant demandé.

$$t_{auto} = \frac{Q_{cell}}{I} \quad (2.1)$$

Or, les batteries au lithium n'adoptent pas un comportement idéal car leur tension ne reste pas constante tout au long de la décharge. On a longtemps estimé l'autonomie réelle d'une batterie par la loi de Peukert (eq. 2.2). Le  $b > 1$  est une constante propre à chaque batterie, tenant compte de la diminution de la capacité en fonction du courant débité et doit être obtenus expérimentalement.

$$t_{auto} = \frac{Q_{cell}}{I^b} \quad (2.2)$$

La relation de Peukert (eq. 2.2) ne tient pas compte de la température, ni ne permet de calculer la tension de la batterie. C'est l'utilisation des batteries dans les appareils électroniques portables qui a amené les électrotechniciens à s'intéresser à la modélisation des batteries [23].

Le modèle comprend une source de tension variable. La tension de cette source  $E_{batt}$  pour le lithium-ion opère selon l'équation (2.3) en recharge ou selon l'équation (2.4) en décharge.

$$E_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \left( \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} \right) i^* - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) \cdot it + A \exp(-B \cdot it) \quad (2.3)$$

$$E_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \left( \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} \right) \cdot (it + i^*) + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.4)$$

Les variables des équations 2.3 et 2.4 sont  $E_0$  la tension en circuit ouvert (V),  $i$  le courant de la pile (A),  $K$  la constante de polarisation (V/Ah),  $Q$  la capacité de la pile (Ah),  $it$  la

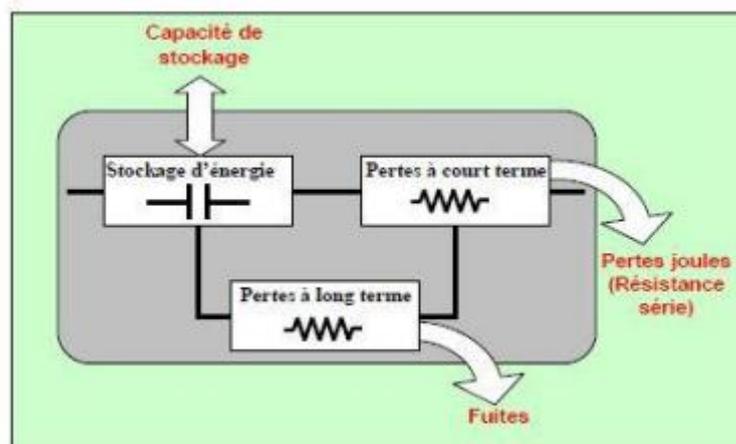
charge actuelle de la batterie (A),  $i^*$  est le courant filtré (A), A l'amplitude de la zone exponentielle (V) et B l'inverse de la constante de temps de la zone exponentielle (Ah). Le paramètre R représente la résistance interne ( $\Omega$ ) [24].

$$R = V_{nom} \cdot \frac{1-\eta}{0,2 \cdot Q_{nom}} \quad (2.5)$$

L'équation de la résistance interne est constituée de l'efficacité énergétique  $\eta$ , de la tension nominale  $V_{nom}$  (V) et de la capacité nominale de la pile  $Q_{nom}$  (Ah). Selon Tremblay (2007), cette formule peut être utilisée pour calculer la résistance interne avec un  $\eta$  de 0,995 lorsque la valeur de la résistance n'est pas disponible à partir des informations du fabricant [24].

## II.2. Modélisation d'un supercondensateur

Le supercondensateur est un dispositif capacitif, sa modélisation permet de prévoir son comportement dans différentes applications, tout en se basant sur une représentation des principaux phénomènes énergétique et électrique apparaissant au sein du composant. Pour l'électricien, le supercondensateur est un composant parmi d'autres faisant partie d'un système énergétique qu'il convient d'identifier, Pour cela, il est prioritaire d'avoir une bonne représentation énergétique de ce composant puisque sa fonction principale est le stockage. En second lieu, il est également important de connaître son comportement temporel afin d'évaluer les contraintes qu'il impose au reste du circuit. La figure (17) montre un schéma de base représentant le comportement énergétique [25].



**Figure 17** : Schéma de base du comportement des supercondensateurs

- **Le modèle électrique** : Avec ce type de modèle, on vérifie la validité de la réponse électrique des modèles. On essaie de rendre la réponse temporelle du modèle proposé la plus proche possible de la réponse expérimentale [26].

- **Le modèle énergétique** : Avec ce type de modèle, on vérifie la validité du bilan énergétique des modèles. On privilégie ainsi l'aspect énergétique (énergie stockée et pertes), approche qui est plus globale (liée au cycle d'utilisation) que l'approche électrique précédente ayant un caractère plus instantané [26].

### II.3. Modélisation de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable. Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable. Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires; [27] chaque interrupteur est représentée par une paire transistor-diode qui est modélisée par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{interrupteur } i \text{ est fermé (} K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{interrupteur } i \text{ est ouvert (} K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec :  $f_i + \bar{f}_i = 1$  et  $i=1\dots3$

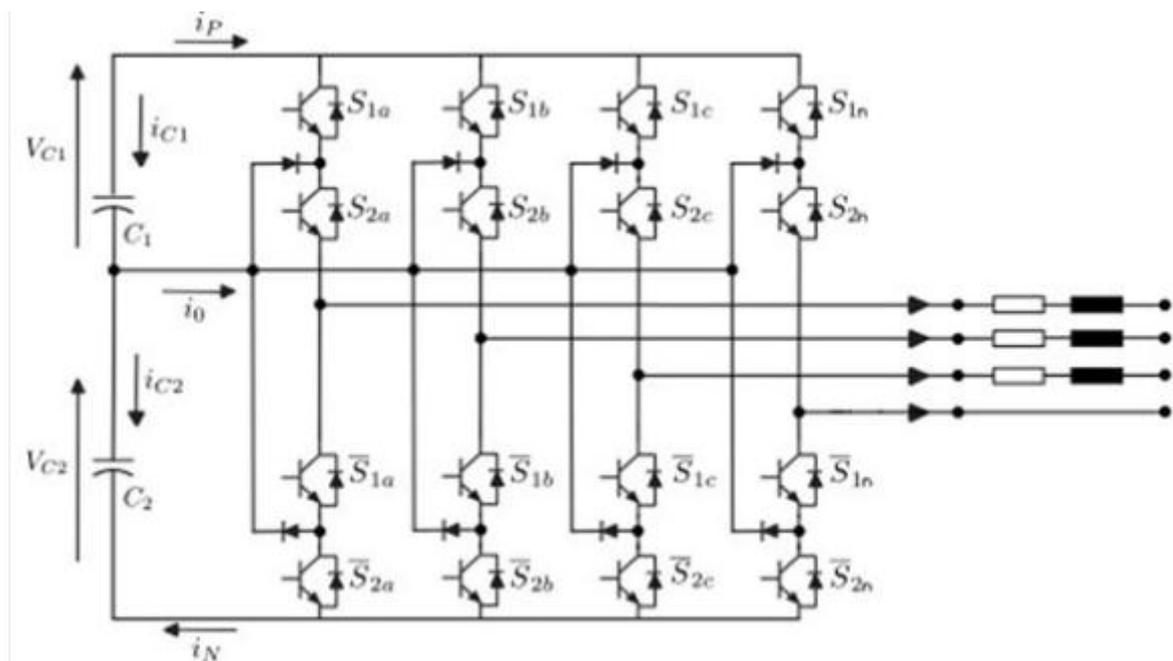


Figure 18 : Schéma d'un onduleur triphasé à quatre bras

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = \vartheta_{as1} - \vartheta_{as1} = E (f_1 - f_2) \quad (\text{II.1})$$

$$V_{BC} = \vartheta_{bs1} - \vartheta_{cs1} = E (f_2 - f_3) \quad (\text{II.2})$$

$$V_{CA} = \vartheta_{cs1} - \vartheta_{as1} = E (f_3 - f_1) \quad (\text{II.3})$$

Les tensions simples  $\vartheta_{as1}$  et  $\vartheta_{bs1}$  et  $\vartheta_{cs1}$  forment un système triphasé équilibre tel que :

$$\vartheta_{as1} + \vartheta_{bs1} + \vartheta_{cs1} = 0 \quad (\text{II.4})$$

La résolution des équations (II. 1), (II. 2) (II. 3) et (II. 4) nous donne :

$$\begin{bmatrix} \vartheta_{as1} \\ \vartheta_{bs1} \\ \vartheta_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \vartheta_{as2} \\ \vartheta_{bs2} \\ \vartheta_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

## **II.4. Modélisation de la MASDE**

### **II.4.1. La constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE)**

La machine asynchrone double étoile est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor, contrairement aux machines asynchrones triphasés elle possède plus de 3 phases au stator (2x3 phases), et contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation, les enroulements rotoriques sont raccordés sur eux-mêmes [28].

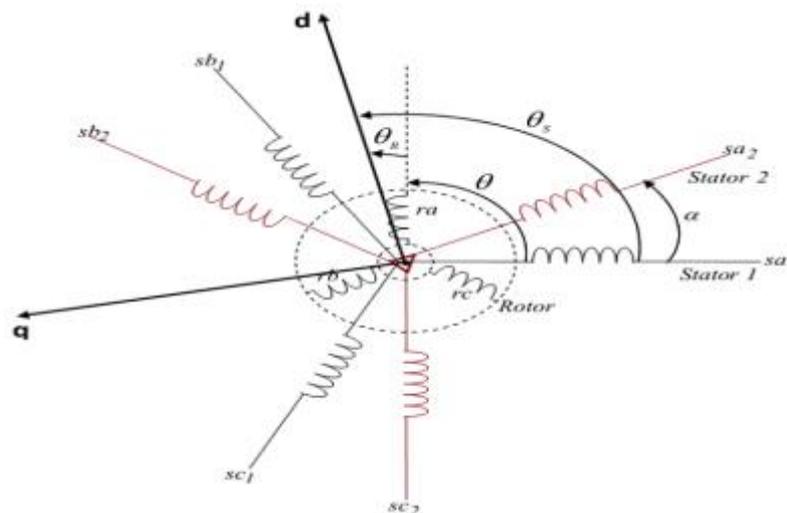
### **II.4.2. Principe de fonctionnement de la MASDE**

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur l'application des principes I, II et III de l'électromagnétisme (loi d'Ampère, loi de La Place et la loi de Faraday). Grace à l'interaction électromagnétisme des champs tournants créent par le système de tension fournie au stator et par les courants induits dans le rotor, ce dernier tourne dans le même sens

que le champ tournant, mais à vitesse inférieure de celle de synchronisme, car, dans le cas contraire, le champ serait immobile par rapport au rotor, et aucun courant ne serait induit [28].

### II.4.3. Description de la machine asynchrone double étoile (MASDE)

La machine asynchrone double étoile est composée de deux stators décalés entre eux d'un angle électrique  $\alpha = 30^\circ$  et un rotor bobiné ou à cage d'écurieul, L'angle entre une phase statoriques et une phase rotorique est  $\theta$ . Les enroulements du stator et du rotor ont le même nombre de pôles et sont alimentés par la même fréquence. La figure ci-dessous donne les positions des axes magnétiques des neuf enroulements formant les neuf phases [29].



**Figure 19** : Représentation schématique des enroulements d'une MASDE

### II.4.4. Les hypothèses simplificatrices

La répartition des enroulements de la machine asynchrone double étoile (MASDE), et sa géométrie est très complexe, pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices qui sont :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé ce qui permet d'exprimer les flux comme fonction linéaire du courant
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont des répartitions sinusoïdale d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, que les inductances propres sont des constantes et que les inductances mutuelles entre deux enroulements sont une fonction sinusoïdale de l'angle entre leurs axes magnétiques
- Les résistances ne varient pas avec la température
- Effets de peau négligés.

➤ La machine est de construction symétrique [28].

## II.5. Modèle de la MASDE dans le repère naturel

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, les équations électriques de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor sont respectivement exprimées par [29] :

### II.5.1. Equations électriques

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\phi_{s1}] \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\phi_{s2}] \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$[v_{s1}] = [v_{as1} \ v_{bs1} \ v_{cs1}]^T, [v_{s2}] = [v_{as2} \ v_{bs2} \ v_{cs2}]^T \text{ et } [v_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T$$

$$[i_{s1}] = [i_{as1} \ i_{bs1} \ i_{cs1}]^T, [i_{s2}] = [i_{as2} \ i_{bs2} \ i_{cs2}]^T \text{ et } [i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$$

$$[\phi_{s1}] = [\phi_{as1} \ \phi_{bs1} \ \phi_{cs1}]^T, [\phi_{s2}] = [\phi_{as2} \ \phi_{bs2} \ \phi_{cs2}]^T \text{ et } [\phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^T$$

$$[r_{s1}] = \text{diag}[r_{as1} \ r_{bs1} \ r_{cs1}]^T, [r_{s2}] = \text{diag}[r_{as2} \ r_{bs2} \ r_{cs2}]^T \text{ et } [r_r] = \text{diag}[r_{ar} \ r_{br} \ r_{cr}]^T$$

Ou :  $r_{as1} = r_{bs1} = r_{cs1} = r_1, r_{as2} = r_{bs2} = r_{cs2} = r_2$  et  $r_{ar} = r_{br} = r_{cr} = r_r$ .

### II.5.2. Equations magnétiques

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} [\phi_{s1}] \\ [\phi_{s2}] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{1,1}] & [L_{1,2}] & [L_{1,3}] \\ [L_{2,1}] & [L_{2,2}] & [L_{2,r}] \\ [L_{r,1}] & [L_{r,2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s1} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s2} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_r + L_{mr} & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[M_{s1,r}] = L_{mr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[M_{s2,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[M_{s1,s2}] = [M_{s1,s2}]^T ; [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T ; [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T$$

$$\text{Avec } L_{ms} = L_{mr} = L_{sr} = \frac{2}{3}L_m$$

### II.5.3. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor

$$C_{em} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{geo}} = P \frac{\partial w}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec } w = \frac{1}{2} \{ [i_{s1}]^t [\phi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\phi_{s2}] + [i_r]^t [\phi_r] \} \quad (\text{II.16})$$

D'où

$$C_{em} = \frac{P}{2} \left\{ [i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{1.r}] [i_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{2.r}] [i_r]^t \right\} \quad (\text{II.17})$$

### II.5.4. Équation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad (\text{II.19})$$

$$\text{D'autre part : } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.20})$$

## II.6. Modèle biphasé de la MASDE

### II.6.1. Transformation de Park

La modélisation de la MASDE passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Pour cela, on applique les matrices de passage de Park direct et inverse suivantes :

• Pour l'étoile 1 :

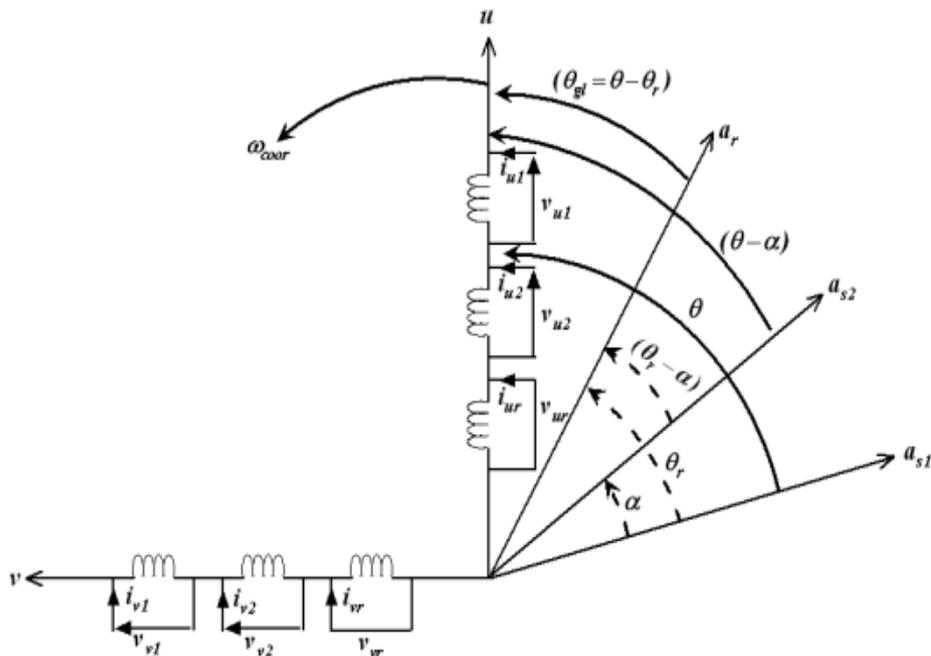
$$[A_p] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$[A_p^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

- Pour l'étoile 2 et le rotor, on remplace dans (II.21) et (II.22)  $\theta$  par  $(\theta - \alpha)$  et par  $(\theta_{gl} = \theta - \theta_r)$  respectivement.
- Avec  $\theta = \int_0^t \omega_{coord} dt$  : angle entre les systèmes d'axes biphasés et triphasés.
- $\omega_{coord}$ : vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

### II.6.2. Modèle de la MASDE selon le système d'axes généralisé « u,v »

La figure 20 représente le modèle généralisé de la MASDE selon le système d'axes u,v tournant à la vitesse  $\omega_{coord}$



**Figure 20** : Représentation du modèle généralisé de la MASDE selon les axes «u,v»

Les systèmes d'équations différentielles de la MASDE selon « u,v » tournant à la vitesse  $\omega_{coord}$  sont :

1. Système d'équations électriques :

$$v_{u1} = r_1 i_{u1} + \frac{d\phi_{u1}}{dt} - \omega_{coord} \phi_{v1}$$

$$v_{v1} = r_1 i_{v1} + \frac{d\phi_{v1}}{dt} + \omega_{coord} \phi_{u1}$$

$$v_{u2} = r_2 i_{u2} + \frac{d\phi_{u2}}{dt} - \omega_{coor} \phi_{v2} \quad (\text{II.23})$$

$$v_{v2} = r_2 i_{v2} + \frac{d\phi_{v2}}{dt} + \omega_{coor} \phi_{u2}$$

$$v_{ur} = r_r i_{ur} + \frac{d\phi_{ur}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{vr}$$

$$v_{vr} = r_r i_{vr} + \frac{d\phi_{vr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{ur}$$

2. Système d'équations magnétiques :

$$\phi_{u1} = L_1 i_{u1} + \frac{3}{2} (L_{ms} i_{u1} + L_{ms} i_{u2} + L_{sr} i_{ur})$$

$$\phi_{v1} = L_1 i_{v1} + \frac{3}{2} (L_{ms} i_{v1} + L_{ms} i_{v2} + L_{sr} i_{vr})$$

$$\phi_{u2} = L_2 i_{u2} + \frac{3}{2} (L_{ms} i_{u1} + L_{ms} i_{u2} + L_{sr} i_{ur}) \quad (\text{II.24})$$

$$\phi_{v2} = L_2 i_{v2} + \frac{3}{2} (L_{ms} i_{v1} + L_{ms} i_{v2} + L_{sr} i_{vr})$$

$$\phi_{ur} = L_r i_{ur} + \frac{3}{2} (L_{mr} i_{ur} + L_{sr} i_{u1} + L_{sr} i_{u2})$$

$$\phi_{vr} = L_r i_{vr} + \frac{3}{2} (L_{mr} i_{vr} + L_{sr} i_{v1} + L_{sr} i_{v2})$$

On a :

$$3/2 L_{ms} = 3/2 L_{sr} = 3/2 L_{mr} = L_m \quad (\text{II.25})$$

### II.6.3. Choix du système d'axes

✓ Système d'axes « $\alpha$ ,  $\beta$ »

Ce système est immobile par rapport au stator, donc  $\omega_{coor} = 0 \Rightarrow \theta = 0$ .

✓ Système d'axes « $x$ ,  $y$ »

Celui-ci est immobile par rapport au rotor, alors  $\omega_{coor} = \omega_r \Rightarrow \theta = \int_0^t \omega_r dt$ .

✓ Système d'axes « d, q »

Ce dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où  $\omega_{coor} = \omega_s \Rightarrow \theta = \int_0^t \omega_s dt$

#### II.6.4. Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes « d,q »

En remplaçant dans les systèmes d'équations (II.23) et (II.24)  $\omega_{coor}$  par  $\omega_s$ ,  $(\omega_s - \omega_r)$  par  $\omega_{gl}$ ,  $\frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{sr} = \frac{3}{2}L_{mr}$  par  $L_m$  et les indices (u,v) par (d,q), on obtient les systèmes d'équations liés au champ électromagnétique suivants :

$$\begin{aligned}
 v_{d1} &= r_1 i_{d1} + \frac{d}{dt} \phi_{d1} - \omega_s \phi_{q1} \\
 v_{q1} &= r_1 i_{q1} + \frac{d}{dt} \phi_{q1} + \omega_s \phi_{d1} \\
 v_{d2} &= r_2 i_{d2} + \frac{d}{dt} \phi_{d2} - \omega_s \phi_{q2} \\
 v_{q2} &= r_2 i_{q2} + \frac{d}{dt} \phi_{q2} + \omega_s \phi_{d2} \\
 v_{dr} &= r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_{gl} \phi_{dr} \\
 v_{qr} &= r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_{gl} \phi_{dr}
 \end{aligned} \tag{II.26}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_{d1} &= L_1 i_{d1} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\
 \phi_{q1} &= L_1 i_{q1} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\
 \phi_{d2} &= L_2 i_{d2} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\
 \phi_{q2} &= L_2 i_{q2} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\
 \phi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\
 \phi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr})
 \end{aligned} \tag{II.27}$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta}{dt}, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \text{ et } \omega_{gl} = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

En introduisant le système d'équations (II.26) dans (II.27) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L][\dot{I}] + \omega_{gl}[C][I] + [D][I] \quad (II.28)$$

Ou :

$[U] = [v_{d1} v_{q1} v_{d2} v_{q2} v_{dr} v_{qr}]^t$  : vecteur de commande ;

$[I] = [i_{d1} i_{q1} i_{d2} i_{q2} i_{dr} i_{qr}]^t$  : vecteur d'état, et  $[\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I]$  ;

$[B] = \text{diag} [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$  ;

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_1 + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_1 + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_2 + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_2 + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r + L_m) \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} r_1 & -\omega_s(L_1 + L_m) & 0 & -\omega_s L_m & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s(L_1 + L_m) & r_1 & \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_s L_m & r_2 & -\omega_s(L_2 + L_m) & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s(L_2 + L_m) & r_2 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_{gl} & r_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.28) sous forme d'état, on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1} \{ [B][U] - \omega_{gl}[C][I] - [D][I] \} \quad (II.29)$$

### II.6.5. Puissance absorbée et couple électromagnétique

La puissance absorbée par la MASDE dans le système d'axes « d,q », tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par :

$$P_a = v_{d1} i_{d1} + v_{q1} i_{q1} + v_{d2} i_{d2} + v_{q2} i_{q2} \quad (II.30)$$

En remplaçant les tensions ( $v_{d1}, v_{q1}, v_{d2}$  et  $v_{q2}$ ) par leurs expressions dans (II.30), on trouve :

$$P_a = [r_1 i_{d1}^2 + r_1 i_{q1}^2 + r_2 i_{d2}^2 + r_2 i_{q2}^2] + \left\{ \frac{d\phi_{d1}}{dt} i_{d1} + \frac{d\phi_{q1}}{dt} i_{q1} + \frac{d\phi_{d2}}{dt} i_{d2} + \frac{d\phi_{q2}}{dt} i_{q2} \right\} (\phi_{d1} i_{d1} - \phi_{q1} i_{q1} + \phi_{d2} i_{d2} - \phi_{q2} i_{q2}) \quad (\text{II.31})$$

L'expression (II.31) se compose de trois termes :

- Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;
- Le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) ;
- Le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ )

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = P \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.32})$$

Alors, l'expression du couple électromagnétique est égale à :

$$C_{em} = P (\phi_{d1} i_{d1} - \phi_{q1} i_{q1} + \phi_{d2} i_{d2} - \phi_{q2} i_{q2}) \quad (\text{II.33})$$

En remplaçant les flux ( $\phi_{d1}, \phi_{q1}, \phi_{d2}, \phi_{q2}$ ) donnés par (II.26) dans (II.32), on obtient :

$$C_{em} = P L_m [(i_{q1} + i_{q2}) i_{dr} - (i_{d1} + i_{d2}) i_{qr}] \quad (\text{II.34})$$

A partir des équations des flux rotoriques ( $\phi_{dr}$  et  $\phi_{qr}$ ) exprimées par (II.27), on tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\phi_{dr} - L_m (i_{d1} + i_{d2})] \quad (\text{II.35})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\phi_{qr} - L_m (i_{q1} + i_{q2})] \quad (\text{II.36})$$

En introduisant (II.35) et (II.36) dans l'équation (II.34), on aura la relation du couple électromagnétique exprimé en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park «d,q» suivante :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{q1} + i_{q2}) \phi_{dr} - (i_{d1} + i_{d2}) \phi_{qr}] \quad (\text{II.37})$$

Enfin, pour compléter la relation (II.37), on doit ajouter les équations (II.18) et (II.19). Les équations (II.18), (II.19), (II.20) et (II.37) constituent un modèle électromécanique complet de la MASDE, conformément aux hypothèses simplificatrices d'étude.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons modélisé les éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique à savoir une machine asynchrone double étoile, une batterie et d'un super condensateur

Le chapitre suivant fait l'objet de la simulation de chaque élément de cette chaîne de traction.

## I. Introduction

La résolution numérique des équations différentielles précédemment cités dans le chapitre 2 a été faite à l'aide d'une programmation sous l'environnement Matlab/Simulink, ce dernier offre également plusieurs méthodes de résolution numérique (la méthode d'EULER simple, d'EULER modifiée, RUNGE-KUTTA d'ordre 4 ... etc.),

Ce chapitre a pour objectif de présenter la simulation des différents composants de la chaîne de traction d'un véhicule électrique notamment la machine la MASDE, en étudiant ses performances à la fois en charge et à vide.

## II. Simulation de la Batterie

Le schéma bloc suivant présente celui de la batterie lithium-ion sous environnement Matlab

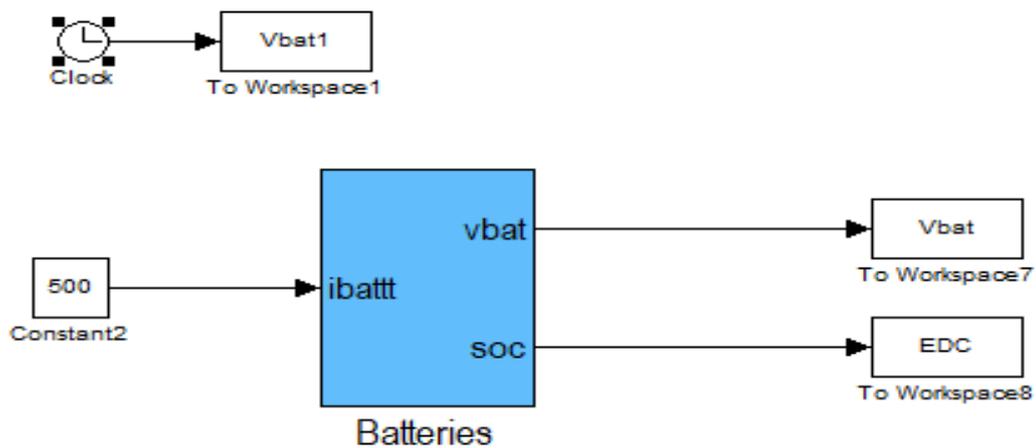


Figure 21 : Modèle d'une batterie sous Matlab/Simulink

## II.1 Résultats de simulation de la batterie

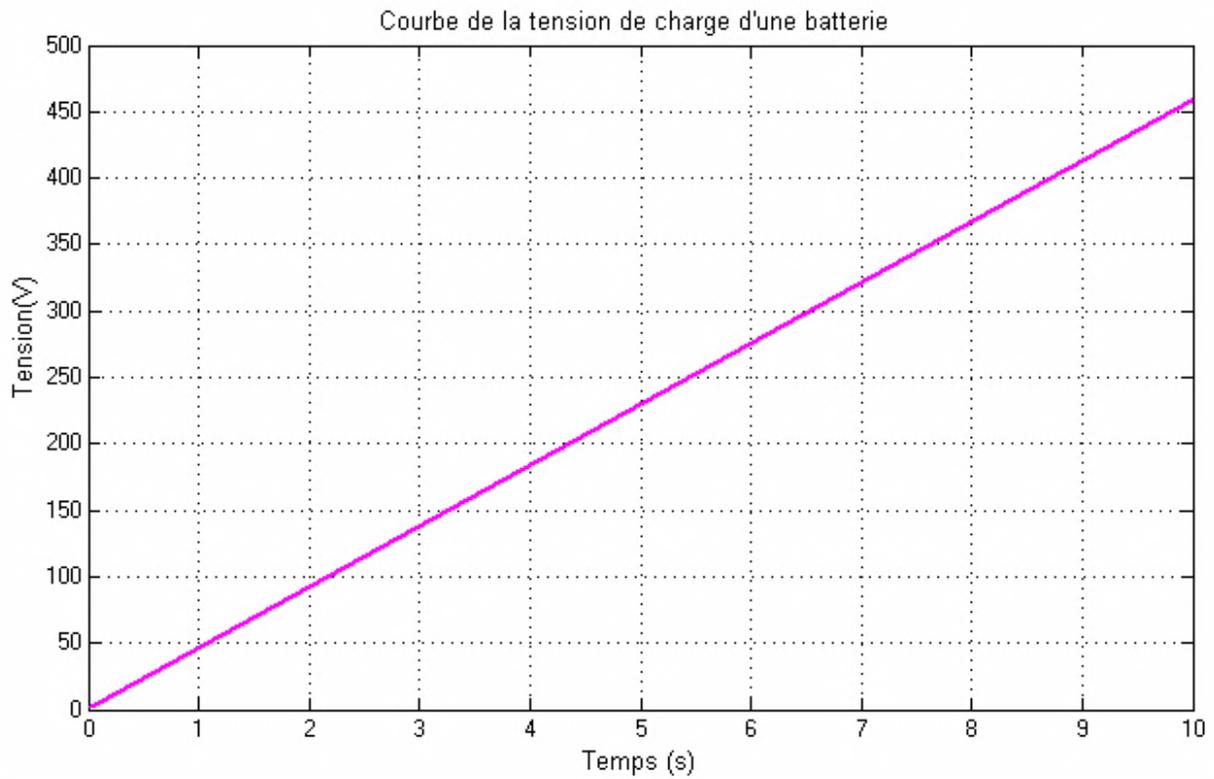


Figure 22 : Courbe de la tension de charge de la batterie

## III. Simulation d'un super condensateur

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle du super condensateur sous l'environnement Matlab/Simulink

### III.1 Schéma bloc

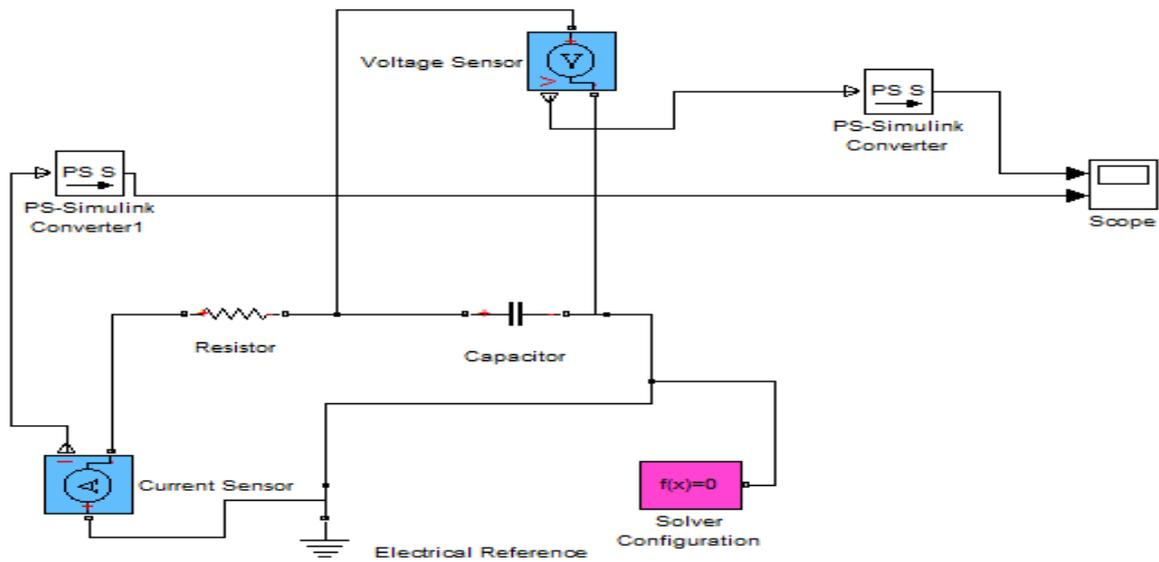


Figure 23 : Modèle d'un super condensateur sous Matlab/Simulink

### III.2 Résultats de simulation

La figure 24 présente l'allure de la tension et de la capacité du supercondensateur en fonction du temps.

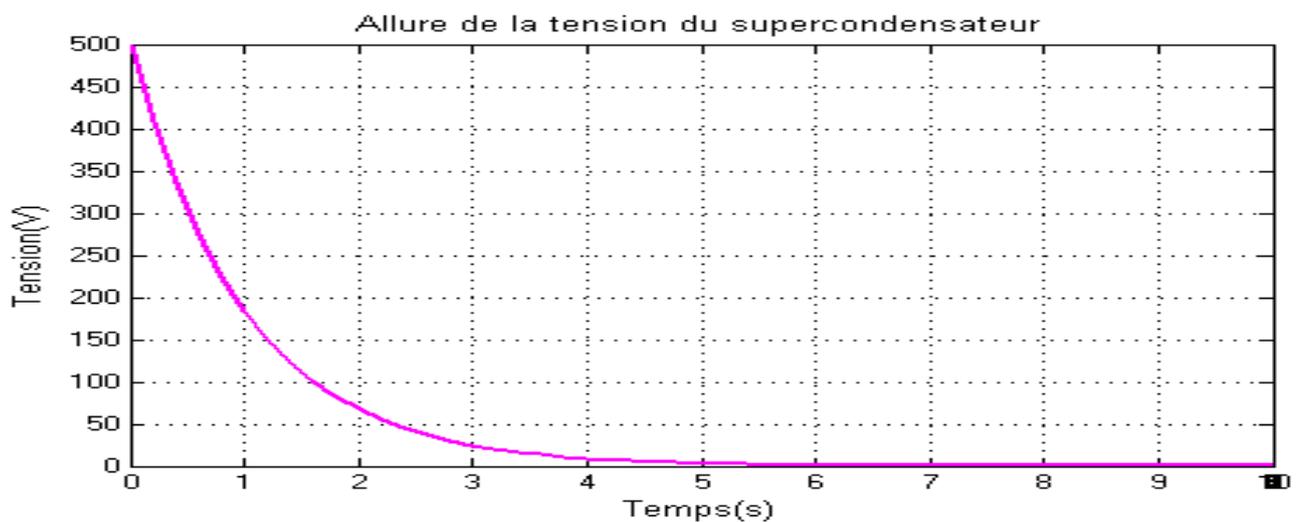


Figure 24 : Allure de la tension dans le cas de décharge

**Commentaire :**

D'après les résultats obtenu de la simulation d'un super condensateur on constate que la tension fournit au SC diminue, et ceci est due a la charge du vehicule électrique

**VI. Simulation d'un onduleur :**

Pour la simulation de l'onduleur, il suffit de créer le modèle d'un onduleur MLI sous l'environnement Matlab/Simulink.

**VI.1. Schéma bloc :**

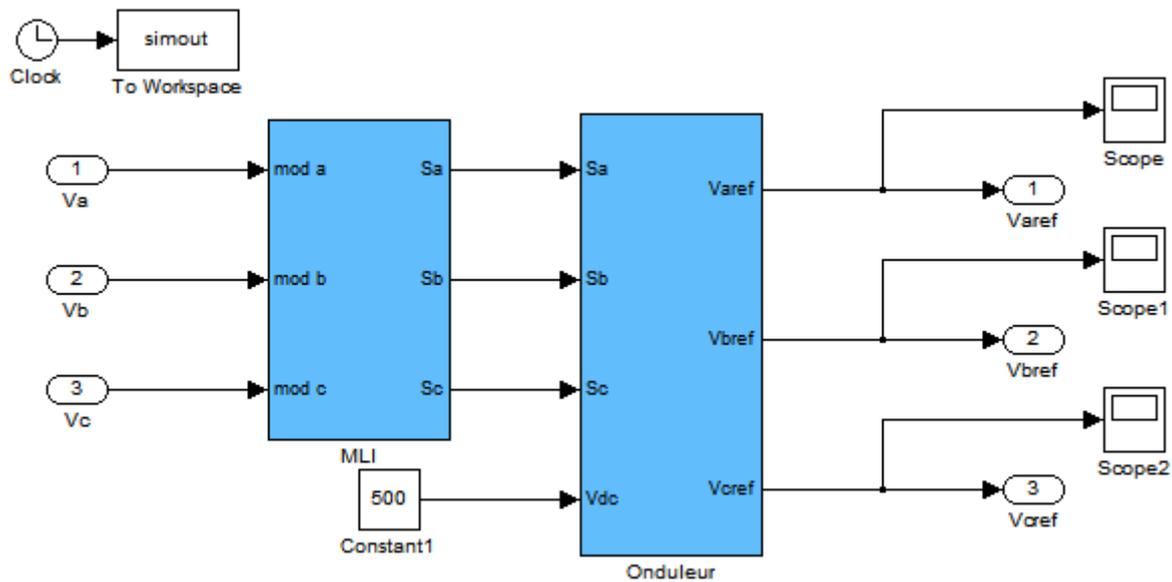


Figure 25 : Modèle d'un onduleur MLI sous Matlab/Simulink

**VI.2 Résultats de simulation**

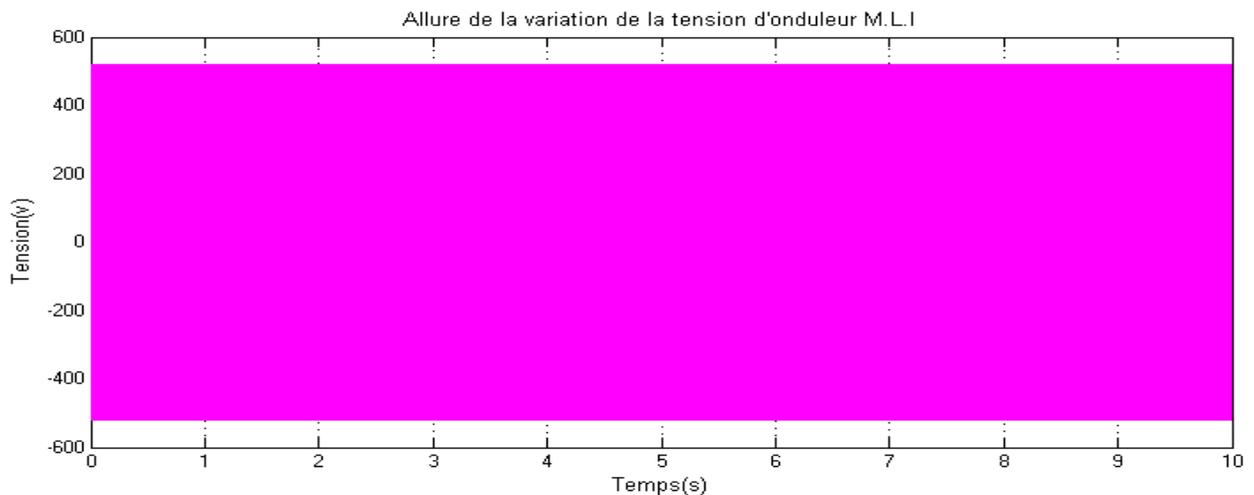


Figure 26 : Allure de la variation de la tension de l'onduleur MLI

## **V. Simulation de la MASDE :**

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle électromécanique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink. La MASDE est alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées, exprimées comme suit :

– Pour la première étoile :

$$v_{as1} = V_m \sin(\omega_s t)$$

$$v_{bs1} = V_m \sin(\omega_s t - 2\pi/3)$$

$$v_{cs1} = V_m \sin(\omega_s t + 2\pi/3)$$

Avec :

$$V_m = \sqrt{2} V_{\text{eff}}$$

– Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations

$(v_{as1}, v_{bs1} \text{ et } v_{cs1})$ ,  $(\omega_{st})$  par  $(\omega_{st} - \alpha)$  et l'indice 1 par 2 ;

– Pour le rotor, les tensions  $(v_{ar}, v_{br} \text{ et } v_{cr})$  sont nulles, (rotor à cage d'écureuil

V.1 Schéma bloc

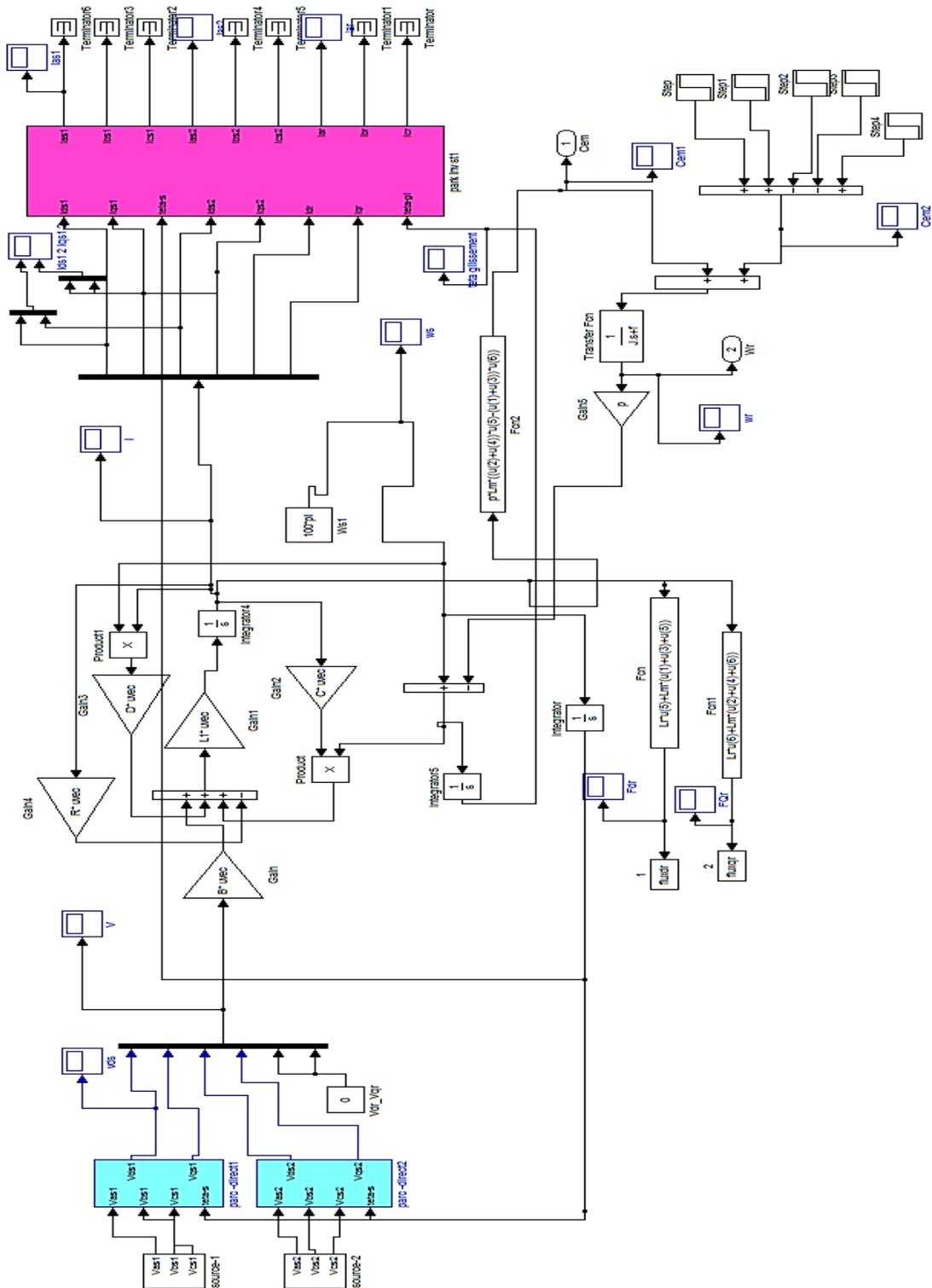


Figure 27 : Schéma bloc de la machine asynchrone double étoile

## V.2. Résultats de simulation

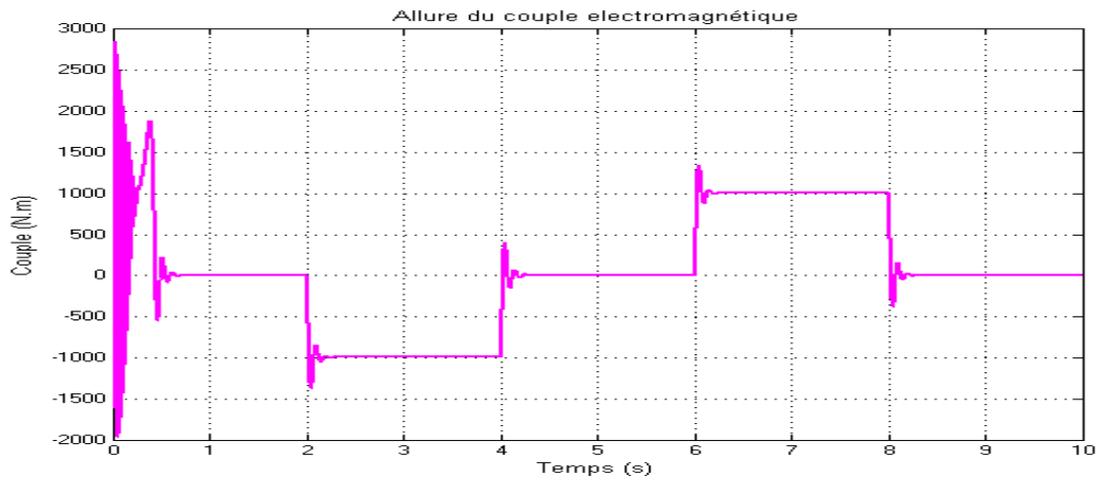


Figure 28 : Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du temps

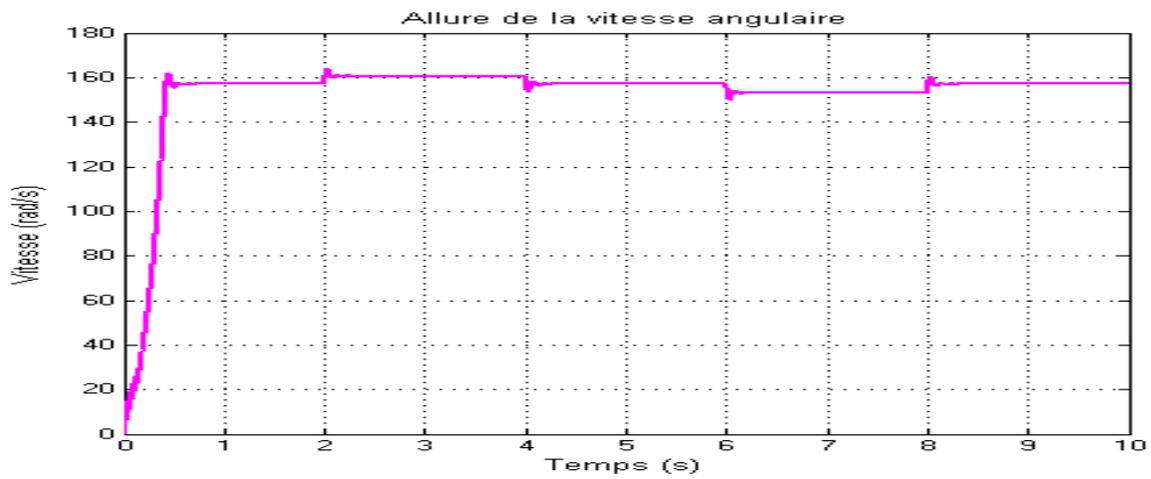


Figure 29 : Courbe de variation de la vitesse en fonction du temps

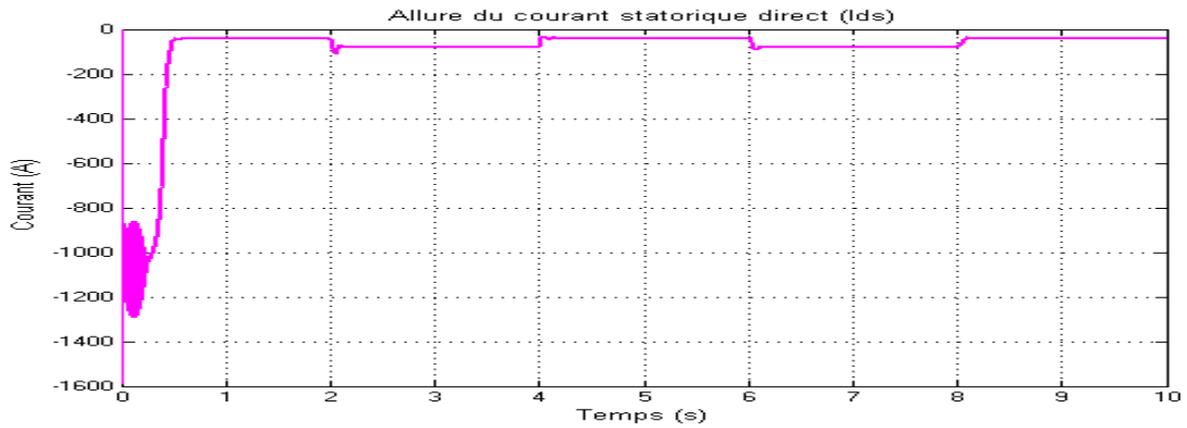


Figure 30 : Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du temps

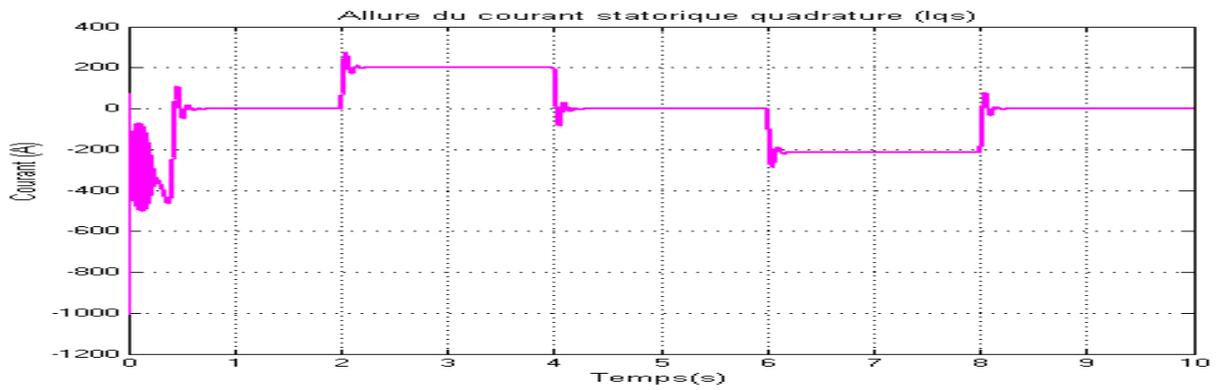


Figure 31 : Courbe de variation du courant statorique en fonction du temps

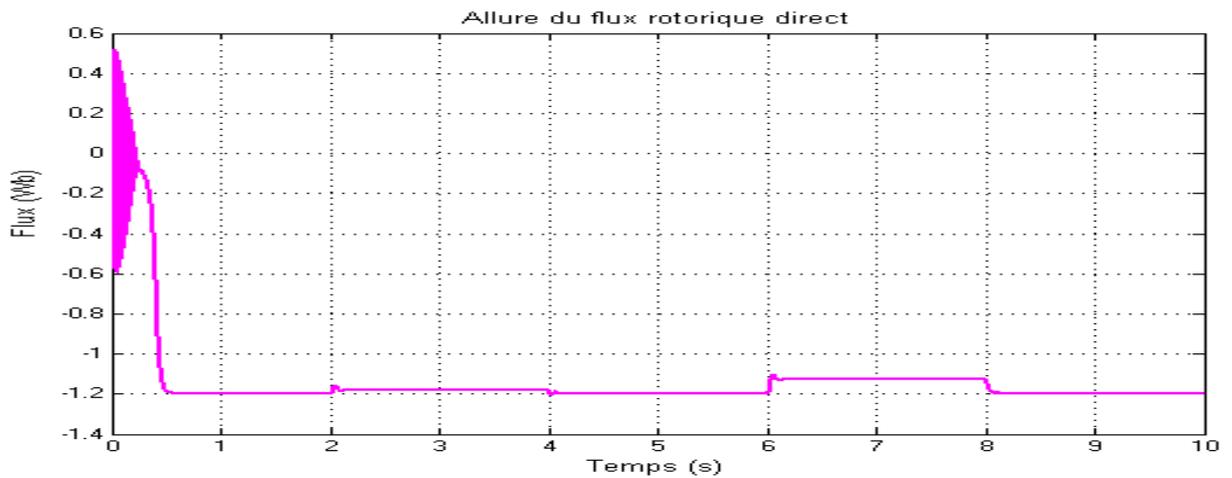


Figure 32 : Courbe de variation du flux rotorique direct en fonction du temps

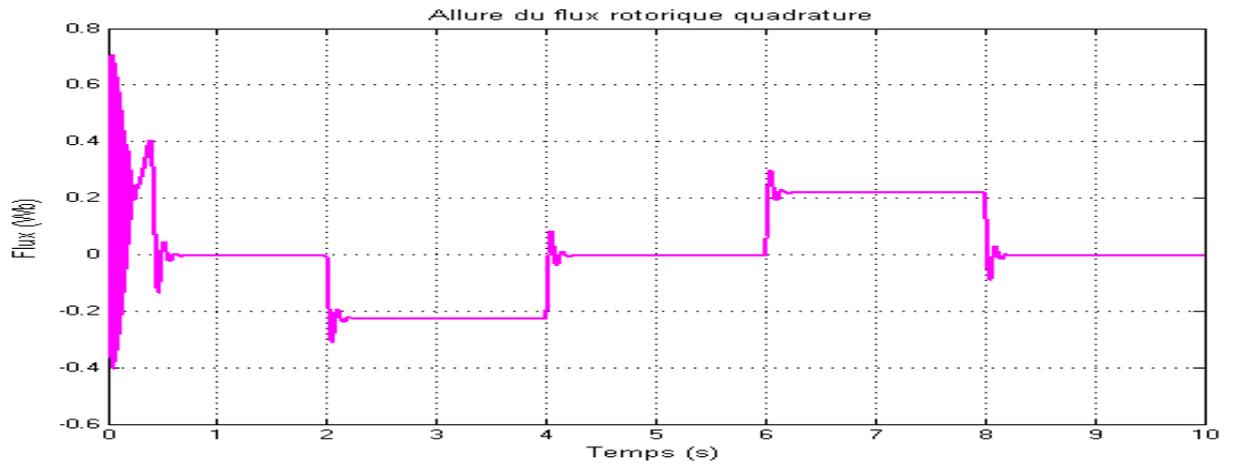


Figure 33 : Courbe de variation du flux rotorique quadrature en fonction du temps

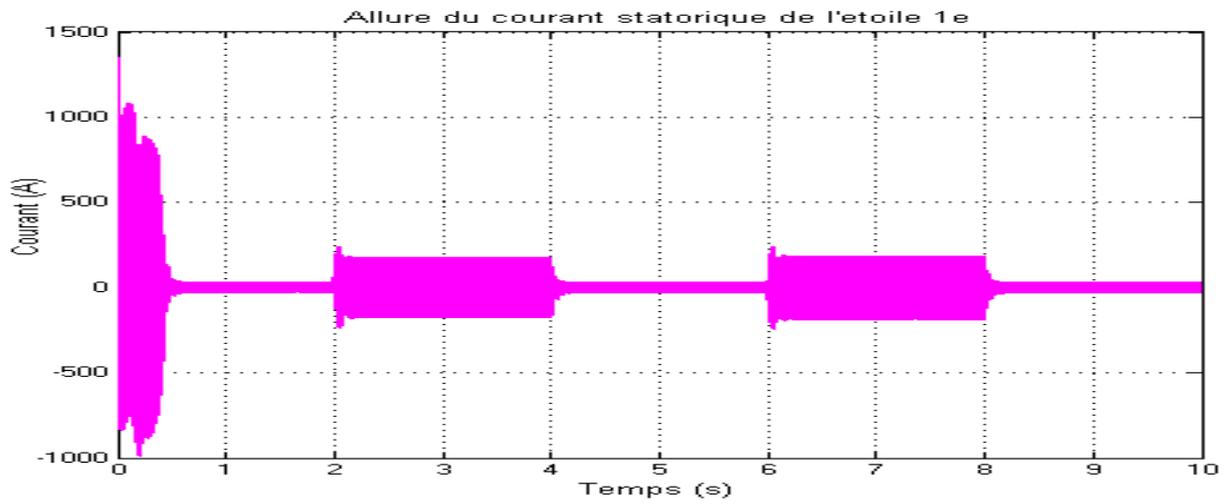


Figure 34 : Courbe de variation du courant statorique étoile 1e en fonction du temps

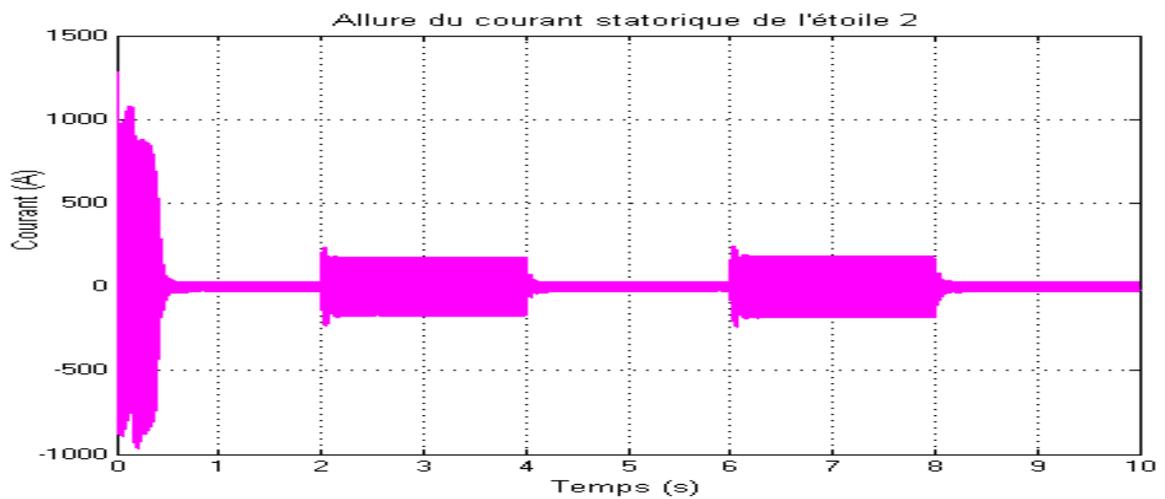


Figure 35 : Courbe de variation du courant statorique de l'étoile 2 en fonction du temps

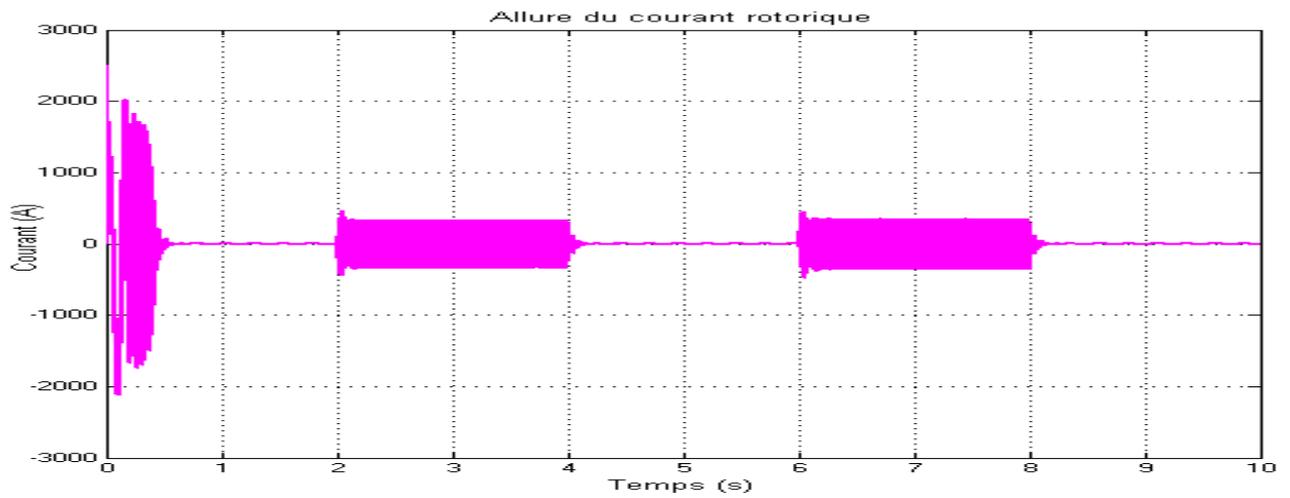


Figure 36 : Courbe de variation du courant rotorique en fonction du temps

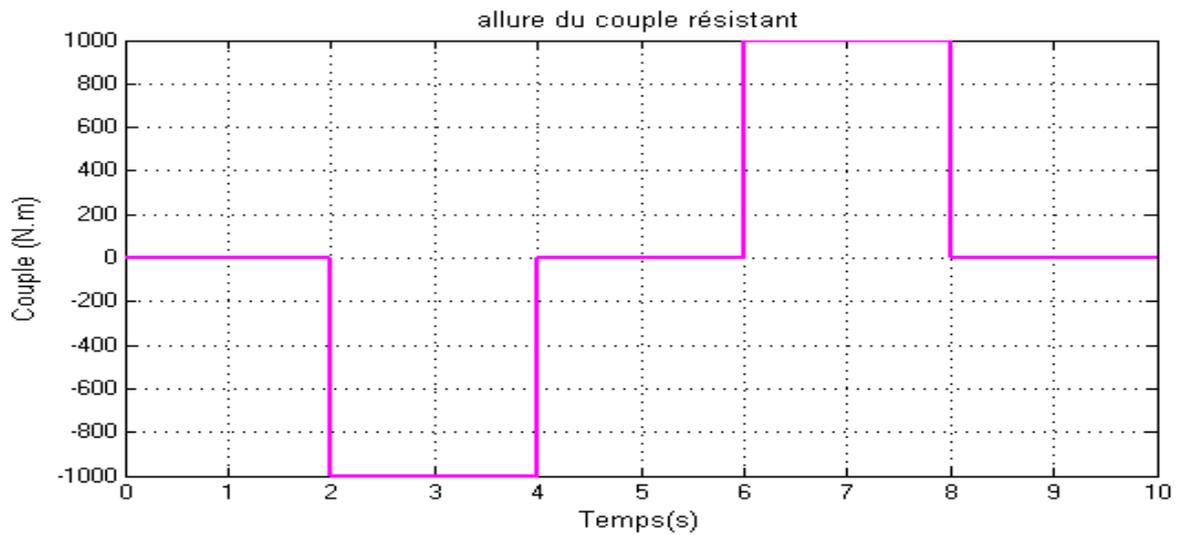


Figure 37 : Courbe de variation du couple résistant en fonction du temps

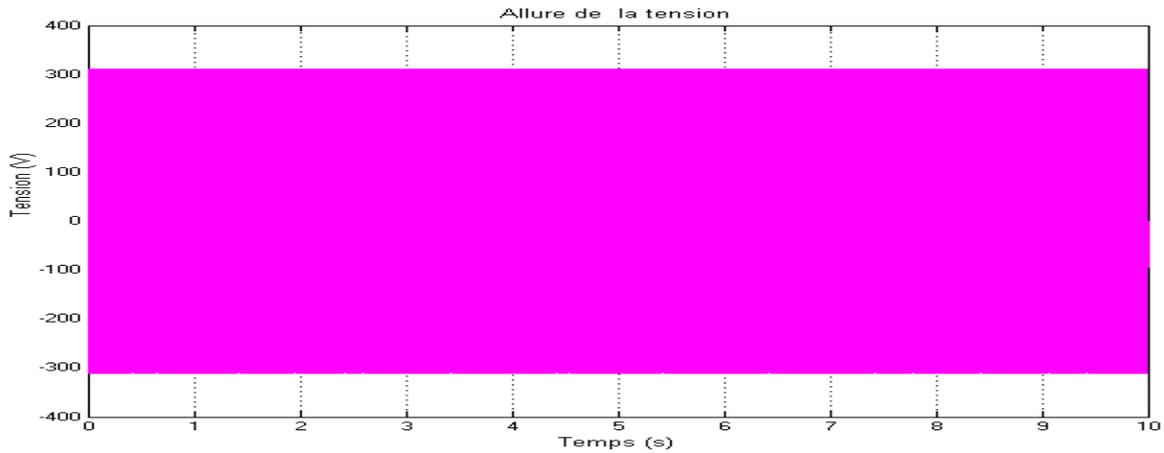


Figure 38 : Courbe de variation de la tension en fonction du temps

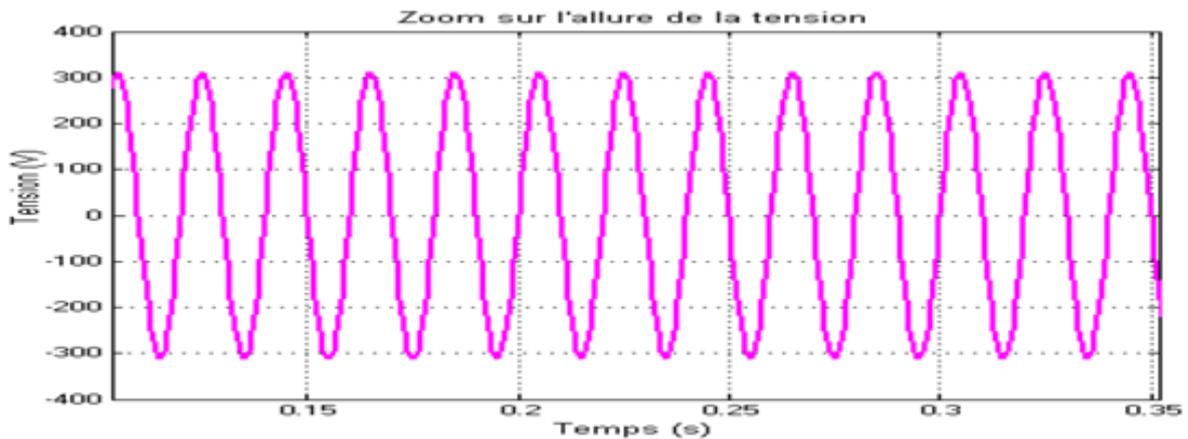


Figure 39 : Zoom sur la courbe de variation de la tension en fonction du temps

### V.3 Discussion des résultats de simulation

Les figures ci-dessus représentent les performances de la machine asynchrone double étoile lors de l'application d'une charge  $C_r = 1000 \text{ N.m}$  à partir de l'instant  $t = 2\text{s}$ . Cette charge correspond au fonctionnement nominal de la machine.

La vitesse de rotation se stabilise presque à  $1525 \text{ tr/min}$

Le couple électromagnétique présente au démarrage, un pic de  $2500 \text{ N.m}$  au moment où le couple de charge est nul (essai à vide) Le couple électromagnétique compense le couple de charge et bien sur les pertes par frottement,

Le courant de l'étoile 1  $i_{as1}$  atteint au démarrage la même valeur qu'en fonctionnement à vide entre 0 et 2s ; à l'insertion de la charge, le courant augmente et atteint une valeur crête 1000A.

Les courants d'axes  $i_{ds1}$  et  $i_{qs1}$  à l'instant  $t = 2$  s augmentent. Le courant  $i_{ds1}$  Atteint la valeur -50A, alors que  $i_{qs1}$  atteint la valeur 200A

Le flux  $\phi_{dr}$  lors de l'application de la charge, diminue de 1.2 Wb à 0.4 Wb en valeur absolue alors que le flux  $\phi_{qr}$  augmente de 0 Wb à 0,2Wb

Pour maintenir la vitesse de rotation constante indépendamment de la charge appliquée, On applique une commande particulière le réglage de la vitesse du rotor de la MASDE se réalise logiquement par une action simultanée sur la fréquence et sur la tension statorique. Par conséquent, pour réaliser ceci, il faut disposer d'une source d'alimentation capable de délivrer une tension d'amplitude et de fréquence réglable en valeur instantanée

## **V.II Commande MLI**

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [29].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

Pour l'étoile 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ref\ a1} = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_{ref\ b1} = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref\ c1} = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right\}$$

Pour l'étoile 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ref\ a1} = V_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ V_{ref\ b1} = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} - \alpha\right) \\ V_{ref\ c1} = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3} + \alpha\right) \end{array} \right\}$$

La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres :

L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation ( $f_p$ ) sur la fréquence de référence ( $f$ ) ; Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ ) [30].

## **VIII Conclusion**

Ce chapitre est consacré à la simulation des différents composants de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, constitué d'une machine asynchrone double étoile et une source d'alimentation à savoir une batterie et d'un supercondensateur. Afin de simuler la MASDE et les sources d'énergie (batterie et supercondensateur), nous avons exploité l'environnement Matlab/Simulink pour implanter les schémas bloc.

Dans le chapitre qui suit nous allons appliquer une commande dite commande par mode de glissement qui est d'ailleurs l'une des commandes robustes, connue par son adaptation aux changements paramétrique et par sa stabilité.

## **I. Introduction**

Depuis plusieurs années, la commande par mode de glissement reste l'un des domaines de la commande les plus étudiés dans les travaux de recherche. En effet, la robustesse et la simplicité qui la caractérisent, sont les motifs essentiels qui nous amènent souvent à chercher de plus sur cette technique. Elle est considérée comme l'une des approches de commande des systèmes non linéaires et des systèmes ayant des modèles imprécis [31] [28].

Dans ce chapitre nous allons montrer comment la commande par mode de glissement peut être appliqué au contrôle de la MASDE pour cela nous présentons en premier lieu un rappel théorique sur la commande par mode de glissement des systèmes à structures variable ensuite on va l'appliquer sur MASDE en montrant les avantages apportés par cette technique après illustrations et visualisations des résultats de simulation.

## **II. Définition de la commande par mode de glissement**

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable. C'est une commande qui est reconnue pour sa grande robustesse vis à vis les incertitudes paramétriques et les perturbations externes au système, d'autant plus qu'elle est simple à implémenter. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'étudier plus la commande par mode de glissement [32].

## **III. Principe de la commande par mode de glissement**

La tâche principale de la commande par mode glissant, est de fournir une surface de commutation, selon des lois d'existence, de convergence et de stabilité. La surface de commutation peut être atteinte par la trajectoire d'état grâce aux changements appropriés de la structure du système commandé [33].

La commande par mode de glissement a en général deux modes de fonctionnement (figure 41) :

- Le mode non glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC).
- Le mode glissant (sliding mode).

Ainsi, la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini, (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant [34].

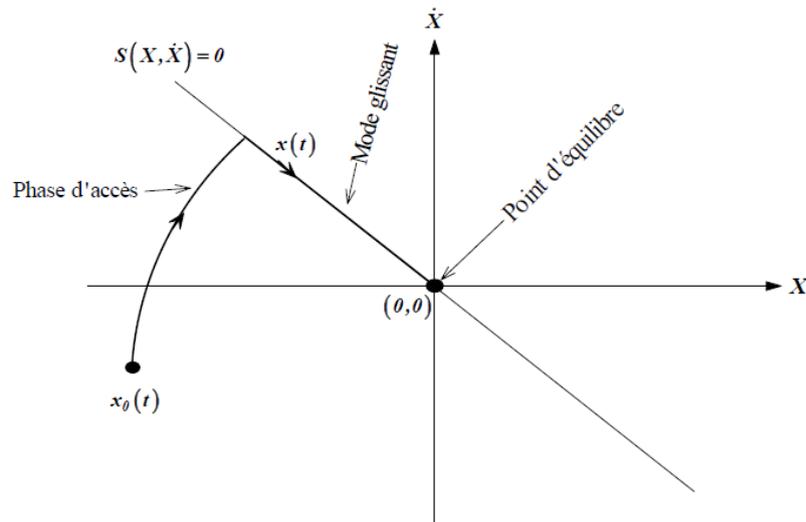


Figure 40 : Mode de fonctionnement dans le plan de phase

### III.1. Conception de la commande par mode de glissement

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes [4]:

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
- La détermination de la loi de commande.

#### III.1.1. Le choix de la surface :

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante [28] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t) u(t) \\ y = C^t + x, y \in \mathbb{R}^m \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande  $u(t)$ . Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur de référence  $x_{ref}$  plusieurs travaux proposent la forme générale suivante [28] :

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \lambda_x \right)^{r-1} + e(x) \quad (\text{IV.2})$$

Avec

$e(x)$  : L'écart de la variable à régler  $e(x) = x_{ref} - x$ .

$\lambda_x$  : Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

$r$  : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour  $r = 1$ ,  $S(x) = e(x)$

Pour  $r = 2$ ,  $S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$

Pour  $r = 3$ ,  $S(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ . Pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence [28].

### **III.1.2. Condition d'existence et de convergence**

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les Surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions, celles-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système [28].

### **III.1.3. Fonction directe de commutation**

Elle est proposée et étudiée par Emelyanov et Utkin. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\dot{S}(x) S(x) < 0 \quad (\text{IV.3})$$

### **III.1.4. Fonction de Lyapunov**

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive pour les variables d'état du Système. L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(x)$  pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence [28]. Nous définissons la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{IV.4})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (IV.5)$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative.

D'où la condition de convergence exprimée par :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (IV.6)$$

### III.1.5. Détermination de la loi de commande

Un vecteur de commande équivalent  $U_{eq}$  se définit comme étant les équations du régime glissant idéal. Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.1)

Le vecteur  $U$  est composé de deux grandeurs  $U_{eq}$  et  $U_n$  soit [28] :

$$U(t) = U_{eq} + U_n \quad (IV.7)$$

$U_{eq}$  : Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x)$ . La commande équivalente est déduite en considérant que la dérivée de la surface est nul  $\dot{S}(x) = 0$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \{f(x, t) + g(x, t)U_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)U_n\} \quad (IV.8)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où on déduit l'expression de la commande équivalente [28].

$$\begin{cases} U_{eq}(t) = \left\{ \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right\}^{-1} \cdot \left\{ -\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\} \right. \\ U_n = 0 \end{cases} \quad (IV.9)$$

Avec la condition d'existence :

$$\left\{ \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right\}^{-1} \neq 0 \quad (IV.10)$$

$U_n$ : est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence  $S(x)\dot{S}(x) < 0$ . Durant le mode de convergence et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (IV.8), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

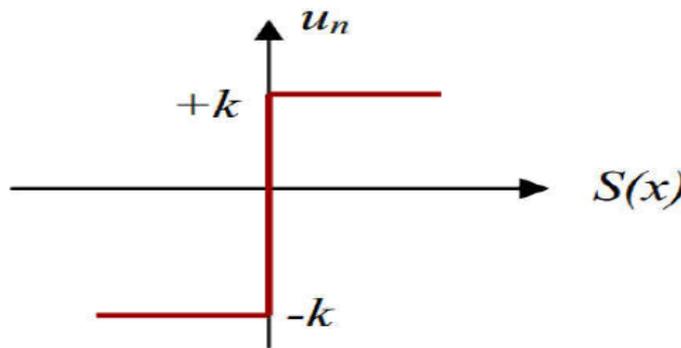
$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)U_n\} \quad (IV.11)$$

Le problème revient à trouver  $U_n$  tel que :

$$S(x) \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)U_n\} < 0 \quad (IV.12)$$

La solution la plus simple est de choisir  $U_n$  sous la forme de relais (Figure III.2). Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$U_n = K \text{sign}(S(x)) \quad (IV.13)$$



**Figure 41** : Représentation de la fonction « sign »

En remplaçant l'expression (IV.13) dans (IV.12), on obtient :

$$S(x) \dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) K |S(x)| < 0 \quad (IV.14)$$

Où le facteur  $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$  est toujours négatif et le gain  $K$  est choisi positif pour satisfaire la condition (IV.14)

#### IV. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant

Il y'a plusieurs avantages pour la commande par mode glissant : la précision, stabilité, simplicité, faible temps de réponse et la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de la simplification sur modèle des systèmes. Néanmoins, elle présente aussi des inconvénients car cette technique fait appel à un grand effort de commande, chose qui peut détériorer les organes de commande.

De plus, en réalité, on n'a pas le glissement idéal sur la surface mais des zigzags autour de celle-ci. Ce phénomène est appelé 'broutement' ou encore 'chattering', il engendre plusieurs effets indésirables sur la qualité et la réalisation de la commande et sur le système comme la figure (43) représente ce phénomène.

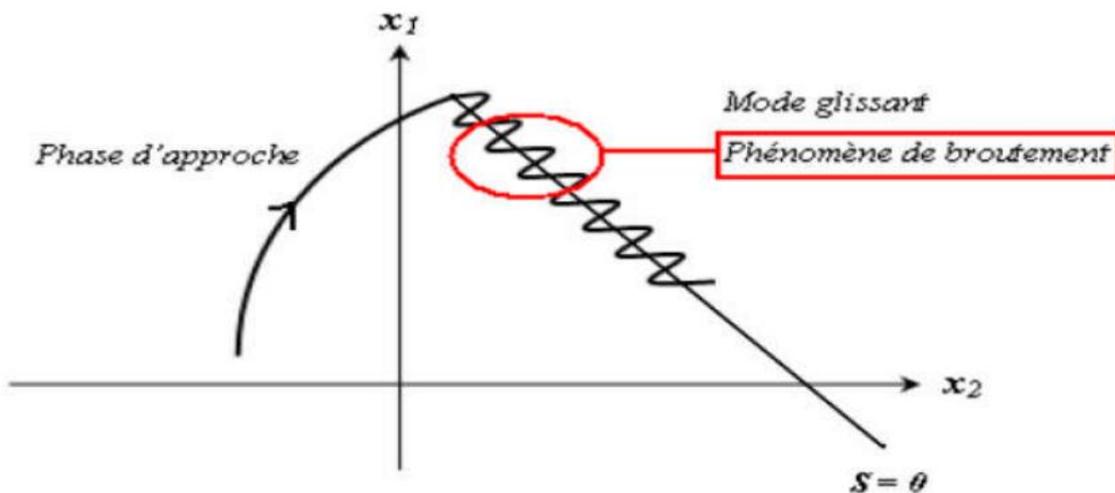


Figure 42 : Illustration du phénomène de broutement

Le phénomène de broutement est considéré comme un obstacle réel pour l'application de la commande par mode glissant, pour y remédier plusieurs solutions ont été proposées. On peut citer : La première c'est l'utilisation d'un observateur d'état asymptotique pour limiter la réticence (oscillations) [45]. La deuxième c'est l'utilisation d'algorithmes de commande par mode de glissement d'ordre supérieur, cette dernière solution a permis la réduction ou même l'atténuation du phénomène de Chattering tout en gardant les propriétés de robustesse et la convergence en temps fini ..., etc.

## V. Simulation de la commande de la MASDE

Pour la simulation, il suffit d'implanter le bloc FOC sous l'environnement Matlab/Simulink

### V.1 Schéma bloc

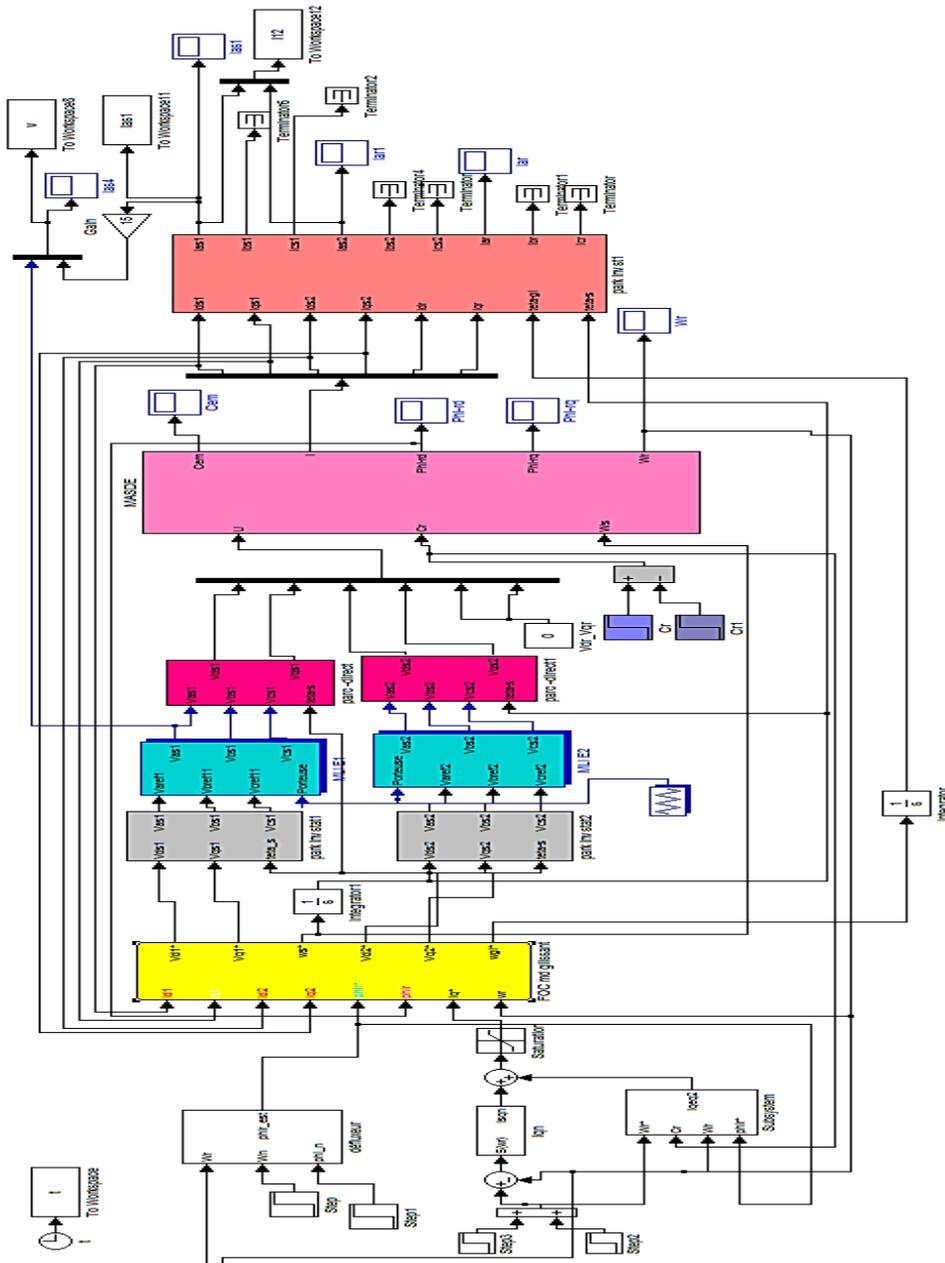


Figure 43 : Schéma bloc de la commande par mode de glissement de la machine asynchrone double étoile.

### V.2 Résultats de simulation

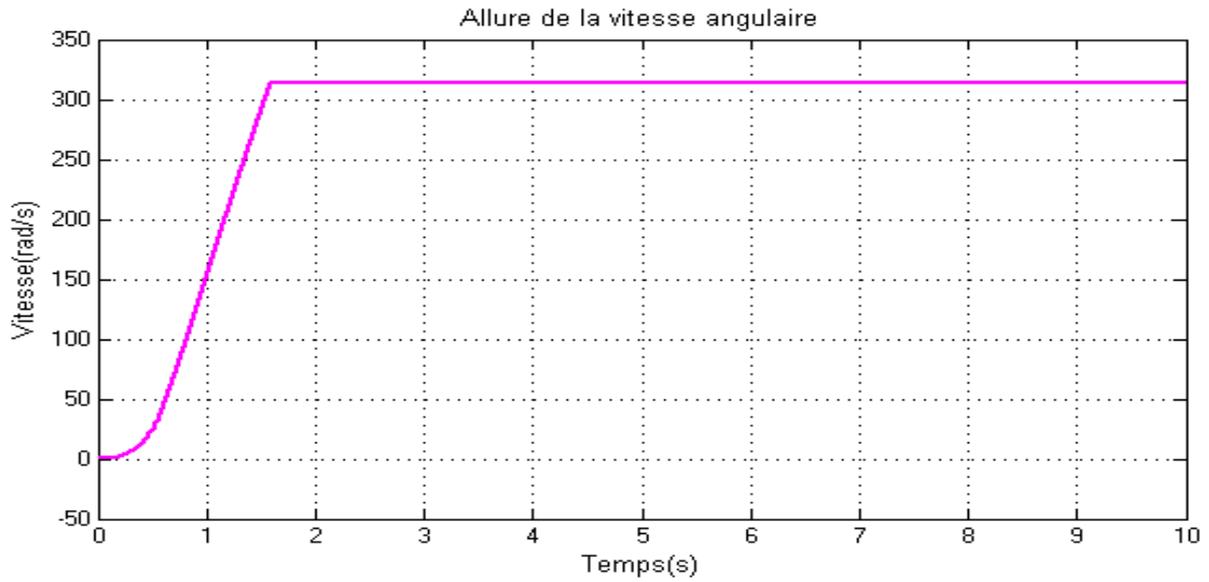


Figure 44 : courbe de la vitesse angulation en fonction du temps

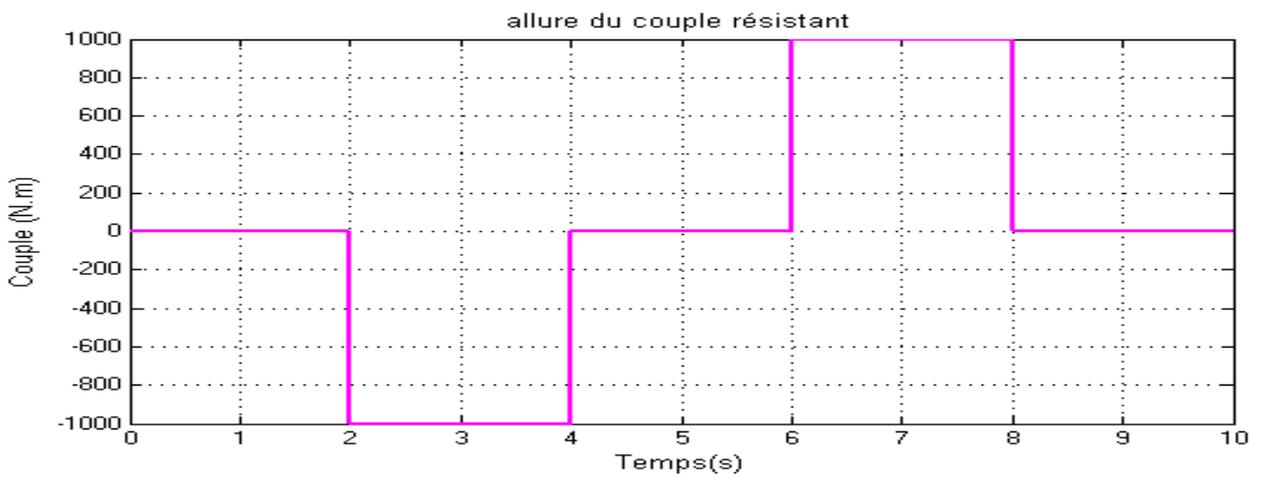


Figure 45 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant

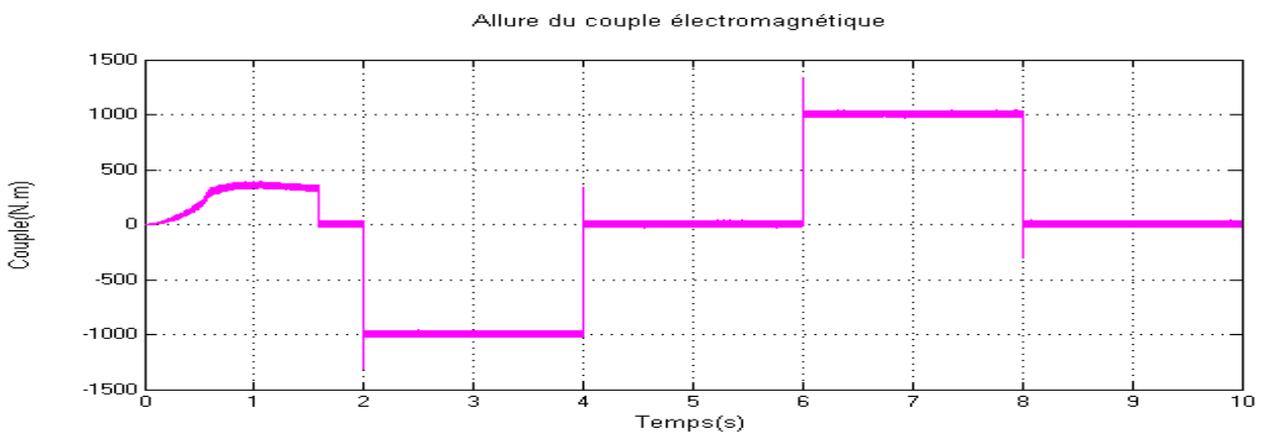


Figure 46 : Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps

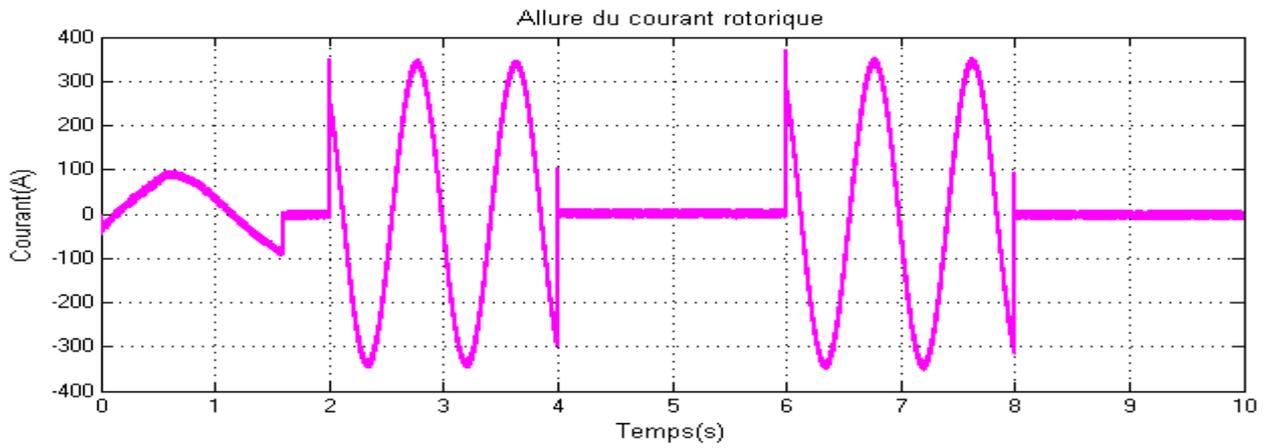


Figure 47 : Courbe de du courant rotorique en fonction du temps

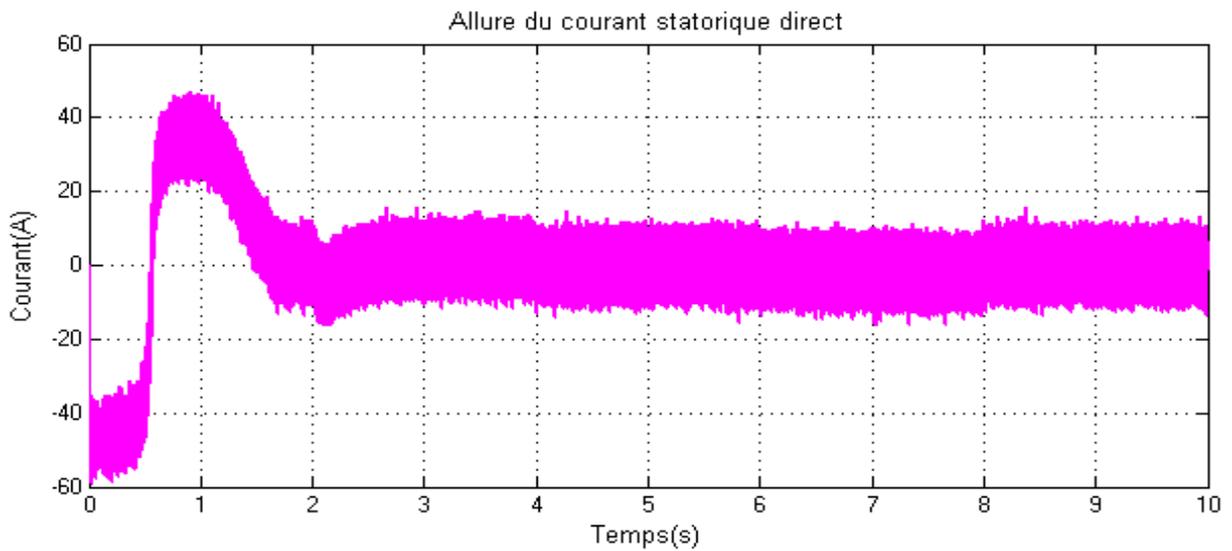


Figure 48 : Courbe de l'allure du courant statorique direct en fonction du temps

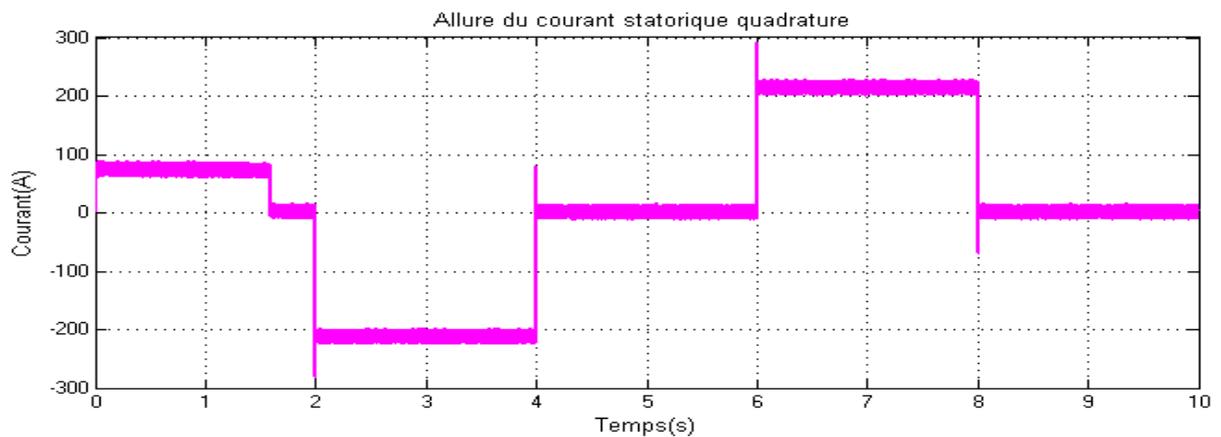


Figure 49 : Courbe de l'allure de courant statorique quadrature en fonction du temps

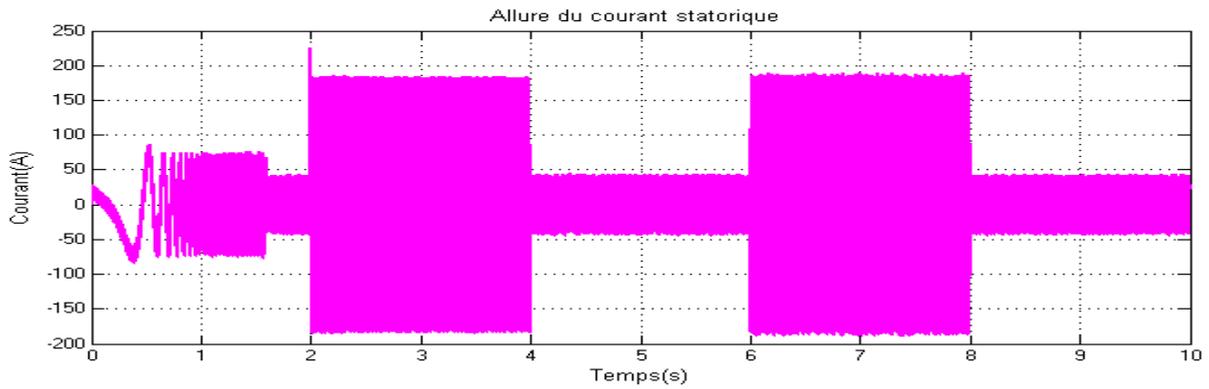


Figure 50 : Courbe de l'allure du courant statorique en fonction du temps

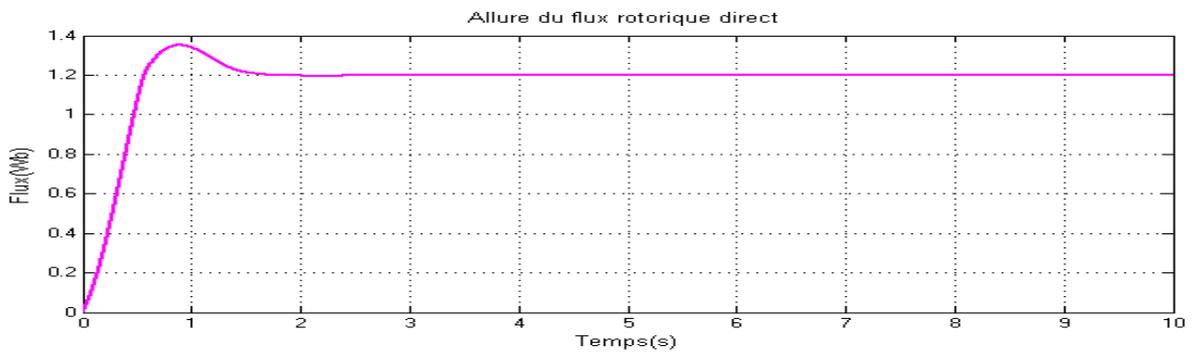


Figure 51 : Courbe de l'allure du flux rotorique en fonction du temps

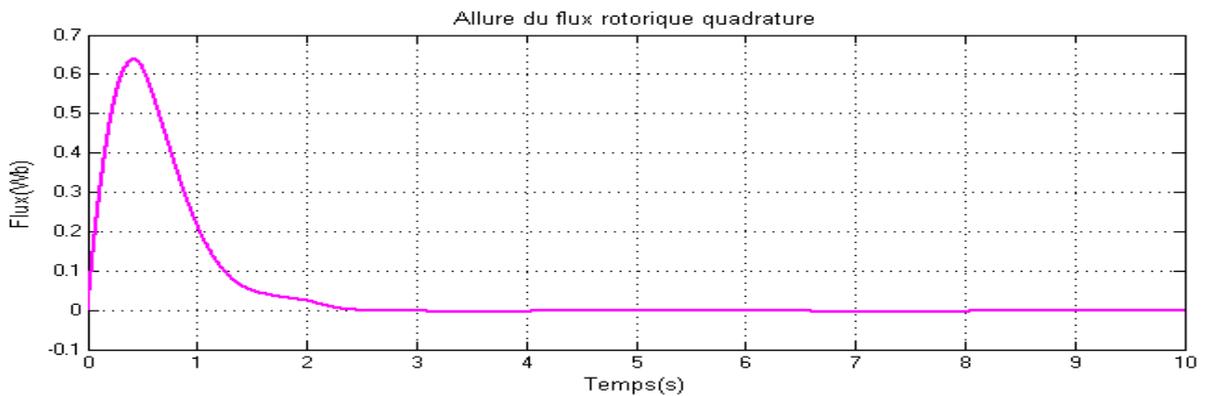


Figure 52 : Courbe de l'allure du flux rotorique en quadrature en fonction du temps

### V.3. Discussion des résultats

Les résultats de simulation de la commande par mode de glissement de la machine asynchrone double étoile sont illustrés par les figures ci-dessus :

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente linéairement en fonction de temps, et elle rejoint sa valeur de référence à  $t = 1.7s$  sans dépassement (figure 44). Le couple électromagnétique atteint une valeur importante au démarrage puis il suit le couple résistant (figure44).

Le courant en quadrature, initialement atteint 80A (figure 48), après il évolue identiquement au couple résistant.

Les courants statoriques directe présentent un courant d'appel d'environ 2.3 fois le courant nominal, par suite à partir de  $t = 1.7s$  ils diminuent d'une manière presque linéaire jusqu'à où il stabilise a une valeur. = 0.5A en (figure 47).

Le courant rotorique présente une valeur de 100 A au démarrage, puis à chaque fois qu'en applique un couple résistant on constate une augmentation du courant.

Le flux rotorique selon (d, q) présente au démarrage un pic de 1,3 Wb, ensuite ils se stabilisent à 1.2 Wb à partir de l'instant  $t=1.5$  (figure 50).

Le flux rotorique quadrature présente au démarrage un pic de 0,6 A, ensuite ils se stabilisent à 0 Wb (figure 51).

## **VI. Conclusion**

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande par mode de glissement sur la MASDE pour un véhicule électrique. L'objectif principal étant la régulation de la vitesse.

Dans ce contexte nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode de glissement, nous avons ensuite défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande puis nous avons appliqué cette commande de la MASDE, et enfin les résultats de simulation sont présentés et commentés

## **Conclusion générale**

Le principal objectif de ce travail est la commande la vitesse d'une machine asynchrone double étoile, dédiée à un véhicule électrique

Le premier chapitre rappelle un état de l'art sur les véhicules électrique ainsi leur fonctionnement et leurs différentes motorisations étant donné que la machine asynchrone double étoile est très avantageuse nous avons choisi de motoriser notre véhicule par cette dernière.

Afin de mieux maîtriser la machine asynchrone double étoile, le second chapitre est consacré à la modélisation des éléments de la chaîne de traction du véhicule électrique et plus spécialement de la MASDE en se basant sur le modèle équivalent de Park en tenant compte des hypothèses simplificatrices.

Le troisième chapitre présente la simulation de la batterie, du super condensateur, de l'onduleur et enfin de la MASDE et les résultats obtenus.

Le dernier chapitre est consacré à l'application de la commande par mode de glissement. Les résultats obtenus ont montré que cette technique de réglage apporte des améliorations remarquables. Car, les régulateurs par mode de glissement offrent de bonnes performances, et un rejet quasi-total aux perturbations.

### **Perspectives**

En perspectives, nous envisageons d'élargir ce travail, dans le but d'améliorer la commande de la machine asynchrone double étoile à base d'un onduleur trois niveau

Aussi nous souhaitons faire la commande de toute la chaîne de traction d'un véhicule électrique

## Annexes

### Paramètres utilisés

Tableau 1 : Eléments du cahier des charges d'un Véhicule électrique

Paramètres	Valeurs
Masse du véhicule	$m = 1300 \text{ kg}$
Rayon de la roue	$r = 0.32 \text{ m}$
Surface frontale du véhicule	$A_f = 2.6 \text{ m}^2$
Constante de la force de résistance due au déplacement	$f_{r0} = 0.01$
Densité de l'air	$\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$
Coefficients de traînée aérodynamique $C_d$	$C_d = 0.32$
Machine utilisée	MASDE

Tableau 2 : Paramètre de la machine asynchrone double étoile

Paramètres	Valeurs
Tension nominale	$U_n = 220/380 \text{ V}$
Courant nominale	$I_n = 90 \text{ A}$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Moment d'inertie	$J = 2.5 \text{ kg m}^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.04 \text{ N}_{ms}/\text{rad}$

<b>Fréquence nominale</b>	$F=50$ Hz
<b>Résistance rotorique</b>	$R_r=0.021$ $\Omega$
<b>Résistance des enroulements de l'étoile 1</b>	$R_{s1}=0.071$ $\Omega$
<b>Résistance des enroulements de l'étoile 2</b>	$R_{s1}=0.071$ $\Omega$
<b>Inductances de fuites des enroulements de l'étoile 1</b>	$L_{s1}=0.0007$ H
<b>Inductances de fuites des enroulements de l'étoile 2</b>	$L_{s2}=0.0007$ H
<b>Inductance rotorique</b>	$L_r=0.000335$ H
<b>Inductance mutuelle cyclique</b>	$L_m= 0.0151$ H

*Tableau 3 : Paramètres de la batterie*

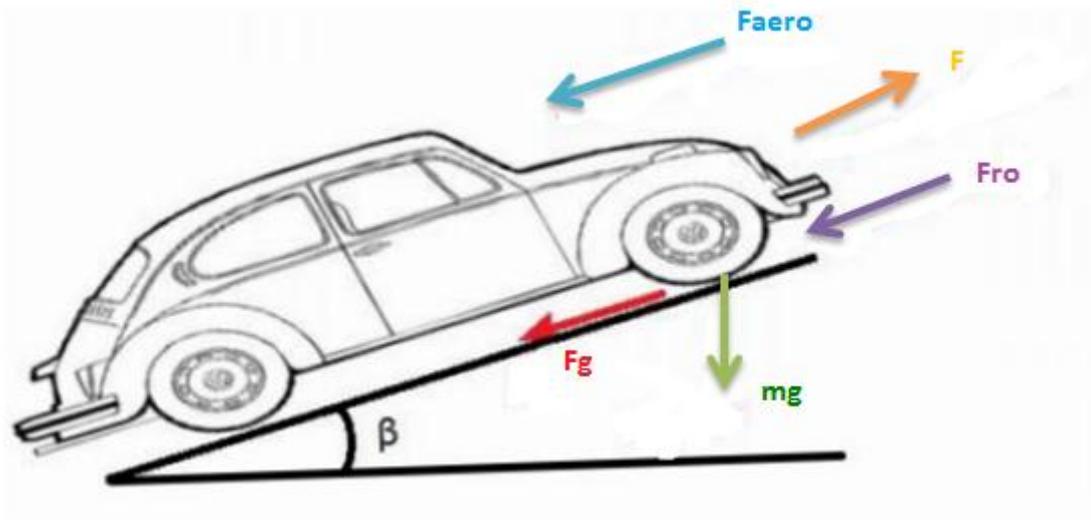
<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Courant</b>	300A
<b>Tension<sub>batt</sub></b>	500V
<b>Température</b>	25 °C

*Tableau 4 : Paramètres du super condensateur*

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Tension</b>	500V
<b>Résistance</b>	1mOhm
<b>Température</b>	25 °C

### **Etude dimensionnelle**

Le véhicule électrique est un système complexe constitué de composants très variés de nature différentes (mécanique, électrique, électromécanique...) en interaction son comportement est donc sensible à toute variation des caractéristiques de l'un des composant à travers ces interactions. Afin de pouvoir le modélisé un bilan des efforts appliqué doit être effectuer



**Figure 53:** Bilan des forces exercées sur un véhicule en mouvement

a) Force de résistance au roulement ( $F_{ro}$ ) due principalement à la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Elle est donnée par l'équation :

$$F_{ro} = mg * f_{ro} * \cos(\beta)$$

b) Force résistante à la pénétration dans l'air ( $F_{aero}$ ) engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carcasse du véhicule en se déplaçant. Son expression est :

$$F_{aero} = 1/2 * \rho_{air} * A_f * C_d * V_e^2$$

c) Force résistante due à la pente à gravir ( $F_g$ ) qui est proportionnelle à la masse  $m$  du véhicule et dépend de la pente de la route. Son expression est :

$$F_g = mg * \sin(\beta)$$

La force résistive totale est donnée par l'équation suivante :

$$F_r = F_g + F_{aero} + F_{ro}$$

L'équation du mouvement est donnée par :

$$m \frac{dV_e}{dt} = F - F_r$$

Dont F est la force de traction du véhicule électrique, elle est assurée par le moteur.

- ✓ Si  $F - F_r > 0$  le véhicule accélère
  
- ✓ Si  $F - F_r > 0 > 0$  le véhicule accélère

Le couple mécanique du véhicule électrique est donné par l'expression suivante :

$$T_r = F_r \frac{r}{G_r}$$

r : c'est le rayon de la roue et Gr le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe de rotation

## Bibliographie

[1]S.MILOUDI, A.DERRADJ et A.BOUHLAL, «Simulation numérique d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique», Mémoire Master, Université de M'Sila, 2011- 2012.

[2]VICTOR MESTER, « Conception Optimale Systémique des composants des chaînes de Tractions Electrique», Ecole centrale de Lille, 2007.

[3]Dictionnaire Français.

[4] M.TORREGROSSA, «Différence entre une voiture électrique, voiture hybride et voiture hydrogène» 1 Aout 2018.

[5]N.GUESSOURI ET R.HAMMADI, « Étude comparative entre influence des différents paramètres physique et la performance du véhicule électrique, modélisation et simulation», Mémoire Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.

[6]MESTRE V. «Etude et simulation d'un véhicule électrique à moteur synchrone mono source.» Thèse de doctorat, École centrale de Lille, (2007).

[7]ARIF A, « Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque. » Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra. (2013).

[8] ESPANET C. (1999), « Contribution à Modélisation et conception optimal de moteur sans balais à structure inversée application au moteur-roue.» Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.

[9]K. HOUACINE, « Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaîne de propulsion d'un véhicule électrique», Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, le 5 Juin 2016.

[10]C.DEPATURE, «Commande par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateur», Université du Québec, 23 Avril 2017.

[11] J-P FERRIEUX, « Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique», Thèse doctorat, Université de Grenoble, Août 2006

[12] P. Caillard, «Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique », Thèse doctorat, école centrale de Lille, Novembre 2015

[13] C. Lamy, J.-M. Leger, «Les piles à combustible; application au véhicule électrique» Journal de Physique IV Colloque, 1994, 04 (C1),

[14]G.ALCICEK, « Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique haute tension pour des

applications véhicule électrique », Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2014.

[15]B.SARRAZIN, «Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique», Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.

[16]H.BENARIBA, «Contribution à la commande d'un véhicule électrique», Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2018.

[17]S.BOULAKROUNE, «Commande à vitesse variable d'un moteur à Courant continue alimenté par hacheur Bidirectionnel en courant», Thèse de doctorat, Université d'Annaba Mokhtar Badji, Juin2018.

[18]W.BOUDJTAT et A.HIMOURA, «Etude et simulation d'une machine asynchrone alimenté par un onduleur de tension à commande MLI », Mémoire Master, Mokhtar Badji Université d'Annaba, Juin 2017.

[19]H. BENNANI, « Machine asynchrone à double alimentation Les lois de commande en régime permanent.», Thèse de doctorat, Université LAVAL QUÉBEC, Mai 2011.

[20]D.BOUAMRA et N.BEDDI, « Etude d'une machine asynchrone double étoile» l'Université d'EL OEUD, Mémoire Master, juin 2014.

[21]I.MARIF & H.ABDAT « La commande en vitesse d'un véhicule Electrique», Mémoire Master, Université de Tlemcen, 2019.

[22]Cours de l'université de SAIDA, Chapitre 2, «Modélisation des éléments de la chaine de traction d'un véhicule électrique».

[23]FELIX-ANTOINE LEBEL, «Méthode de dimensionnement et modélisation de batteries lithium-ion» Université de Sherbrooke (Québec), Canada, 28 Avril 2017.

[24] S.AZIB, A.A .ZAIDI, «Étude d'un Système de Stockage par un Supercondensateur», Mémoire Master, Université A.MIRA de BEJAIA, 2016,2017.

[25]N.RIZOUG. « Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance »,Thèse doctorat, Université de Lille I, 2006.

[26]Y.LAGGOUN et H.LIMANE, «Commande d'une machine asynchrone double étoile par logique floue», Mémoire Master, Université de Kasdi Merbah Ourgla, 2016/2017.

[27] Y.HADJOUTI et A. HAMBLI «Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques», Mémoire Master, l'Université Akli Mohand Oulhadj de BOUIRA, 2017.

[28]H.AMIMEUR, «Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement», Thèse de doctorat, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2008.

[29]Université A. Mira de Bejaia, Département d'Hydraulique Cours de Méthodes Numériques 2014/2015.

[30]B.BENBOUYA, D.OUABBAS, «Etude des éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone double étoile», Mémoire Master, Université A.MIRA de BEJAIA, 2018,2019.

[31]Laboratoire d'Etudes et de Modélisation en Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'ingénieur, Université de Jijel, B.P. 98, Ouled Aissa, 18000, Jijel, Algérie.

[32]C. FALLAHA, « Etude de la commande par mode de glissement sur les systèmes mono et multi variables », Thèse doctorat, Université de Québec, 20 Décembre 2006.

[33]N.MEKKI et M.GOUASMIA, «Commande en vitesse et en position d'une MSAP», Mémoire Master, Université de M'Sila, 2017.

[34]L.ABBACHE et L.BERKANI, « Commande par Mode de Glissement d'un Moteur Asynchrone double étoile », Mémoire Master, Université de Bejaia, 2013.