



Véhicule Electrique



PFE

Adnane JAOUÏ / Smain LABDOUNI

Pierre DELARUE / Arnaud CHIELENS

2014/2015

Sommaire

I.	Introduction	2
II.	Véhicule électrique	3
III.	Configuration de notre véhicule	3
IV.	Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents	4
V.	Modélisation des pertes dans la machine	5
VI.	Système étudié et sa représentation par REM	7
VII.	Modélisation avec considération des pertes	7
1.	Modélisation de la batterie Lithium Fer Phosphate :	8
2.	Modélisation du convertisseur :	10
VIII.	Influence de la commande pour utilisation optimale de l'énergie.....	12
1.	Construction de la Structure Maximale de Commande :	12
2.	Optimisation par l'influence de divers correcteurs	13
IX.	Résultat des simulations	15
X.	Conclusion.....	17
XI.	Annexe.....	18

I. Introduction

Le projet de fin d'étude est un projet complet en situation professionnelle qui marque la fin - des études dans une école d'ingénieurs. Il a pour but de permettre à l'étudiant de démontrer ses compétences au travers d'un travail de longue durée et de mettre en pratique, une dernière fois dans le cadre académique, les enseignements qu'il a reçus et ainsi de développer l'autonomie et la responsabilité des étudiants, à créer une dynamique de groupe et l'esprit d'un travail collectif. Ce travail est conclu par une soutenance et une rédaction de rapport, support du travail et des conclusions réalisés par les étudiants.

La flambée des cours du pétrole que nous avons connue au cours de l'été 2008, la raréfaction des réserves, les normes environnementales appliquées à l'automobile de plus en plus contraignantes, les problèmes de réchauffement climatique, sont autant d'éléments qui ont mis en évidence les problèmes liés à l'usage intensif des véhicules à moteur thermique.

Notre projet est un projet SECMA qui a été proposé à l'école en 2008. Il s'agit de transformer un véhicule thermique en véhicule électrique. La voiture électrique reste la meilleure alternative pour les véhicules thermiques. Elle permet, bien qu'ayant un problème d'autonomie, une solution très intéressante, dans des cadres urbains ou extra-urbains de faible distances. Elle présente des performances dynamiques équivalentes aux véhicules actuels ce qui est un plus pour le consommateur.

Du fait de la charge de travail, notre projet est la continuité d'un travail de plusieurs groupes qui ont participé à son avancement. Notre but est de rendre le véhicule fonctionnel.

Lors de la première partie du projet de fin d'étude, nous avons étudiés les travaux précédemment réalisés sur le véhicule, nous avons rédigé des fiches de synthèse permettant la bonne compréhension du fonctionnement du véhicule. Par la suite, nous avons alors adopté une stratégie afin de déterminer la source d'une erreur lors de la mise en marche du véhicule. Nous nous sommes aperçu qu'un faux contact était présent sur le câble reliant la box au variateur. Nous avons donc commandé un connecteur afin de remplacer ce dernier. En attendant la réception de la commande, nous avons travaillé sur la modélisation du véhicule à l'aide de la REM (Représentation Energétique Macroscopique) sous Matlab.

II. Véhicule électrique

Les avantages d'un véhicule électrique sont des émissions nulles sur son lieu de fonctionnement (typiquement, en ville), et un meilleur rendement énergétique par rapport à une voiture conventionnelle. Au niveau de la commande, un véhicule électrique permet un meilleur contrôle des performances. Son principal inconvénient se trouve au niveau de l'autonomie, en effet, les performances des véhicules actuels se trouvent très limités en termes d'autonomie.

III. Configuration de notre véhicule

Notre chaîne de traction du véhicule se décompose en trois sous-systèmes : La propulsion électrique, la source énergétique et les éléments auxiliaires. La propulsion électrique regroupe le contrôleur, les convertisseurs d'électronique de puissance, le moteur électrique, la transmission mécanique et les roues. La source énergétique est composée des batteries de traction, du système de stockage rapide et du chargeur. Les éléments auxiliaires se composent de la direction assistée, du système de refroidissement, du système de climatisation, etc...

Le fonctionnement de la chaîne de traction peut être résumé ainsi : les informations provenant de l'accélérateur et de la pédale de frein sont transmises au contrôleur; le contrôleur transmet les signaux convenables aux convertisseurs électroniques de puissance, ce qui permet de régler le flux de puissance entre le moteur électrique et la source énergétique. Par exemple, en freinant, le moteur électrique fonctionne en générateur : une partie de l'énergie du freinage est ainsi régénérée et peut être stockée par des batteries ou des super condensateurs, tandis que l'autre partie est consommée par le freinage mécanique.

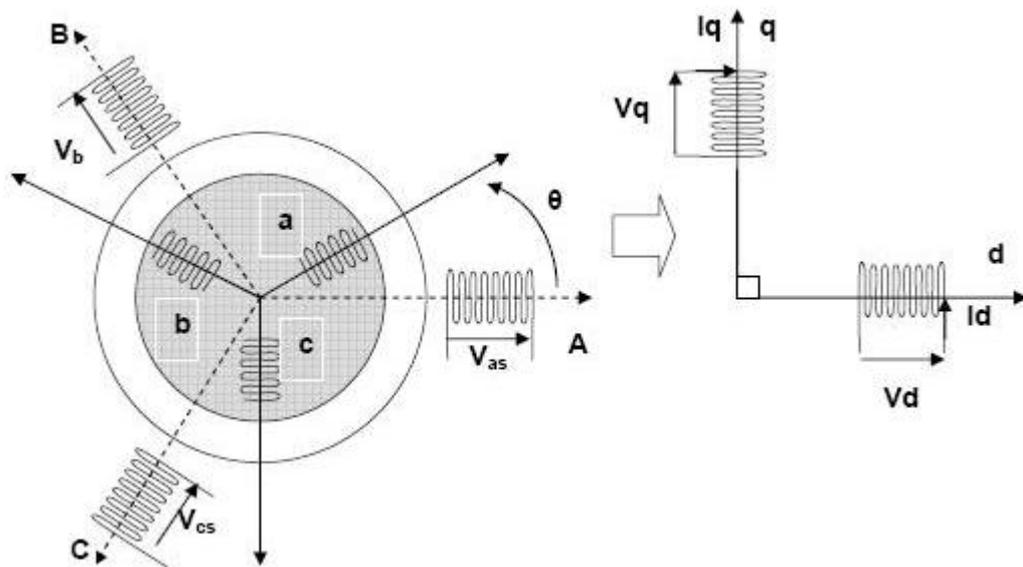
Dans notre cas nous utilisons une configuration avec un moteur électrique, réducteur fixe et différentiel, cette configuration a comme avantage de réduire le poids et la taille de la transmission mécanique, de plus, cela simplifie également la commande.

IV. Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents

Le très bon rendement ainsi que la puissance massique d'une machine synchrone en font le moteur idéal pour un véhicule électrique. Pour réaliser une commande vectorielle optimale en fonction du rendement, il faut d'abord construire un modèle de Park. Dans notre cas nous prendrons en compte les pertes Joule, les pertes mécaniques, les pertes fer et le phénomène de saturation.

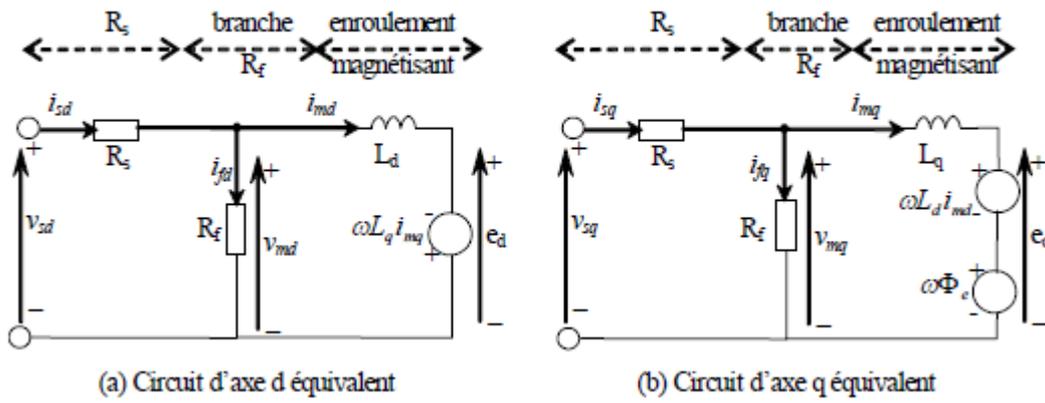
Modèle de Park

Pour simplifier le modèle dynamique des machines à courant alternatif, on réalise un changement de repère. Cette manipulation consiste à transformer les trois bobines statoriques déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor. Ces deux bobines d et q produirait le même effet que les trois bobines réelles fixes. Cela nous permet d'avoir un modèle relativement simple de la machine.



Repère initial (s1,s2,s3) du stator et repère (d,q) de Park

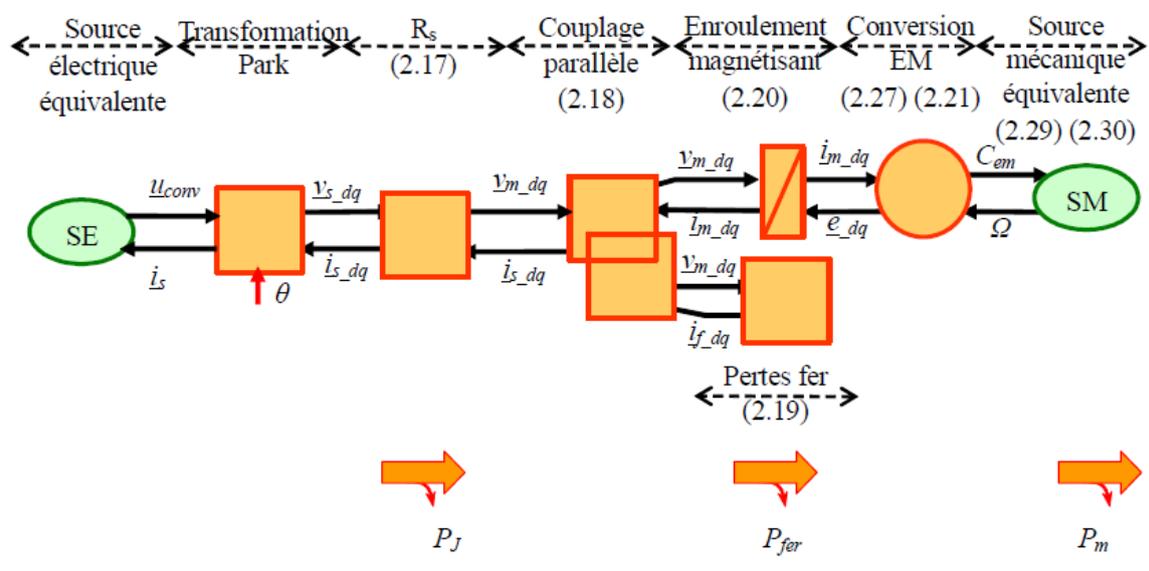
Concernant la modélisation des pertes fer, nous choisissons de mettre une résistance R_f en parallèle du circuit équivalent (voir schéma ci-dessous).



(a) Circuit d'axe d équivalent (b) Circuit d'axe q équivalent

Circuits équivalents avec résistance de perte fer en parallèle

Nous pouvons maintenant modéliser la MSAP sous forme de REM :



MSAP avec résistance équivalente de pertes fer en parallèle représentée par REM

V. Modélisation des pertes dans la machine

$$P = Vd \cdot Id + Vq \cdot Iq \quad \text{(En régime permanent)}$$

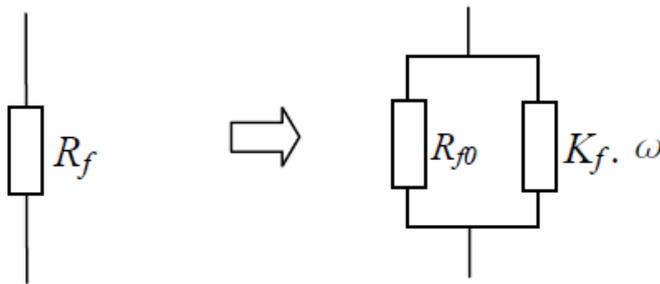
$$= \underbrace{R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2)}_{P_J} + \underbrace{\frac{\omega^2}{R_f} (\Phi_d^2 + \Phi_q^2)}_{P_{fer}} + \underbrace{p i_{mq} \{ \Phi_e + (L_d - L_q) i_{md} \}}_{P_{em}} \Omega$$

Concernant les pertes fer, elles sont composées des pertes Foucault et des pertes hystérésis. Les pertes fers peuvent donc se décomposer en deux parties :

$$P_{fer} = \frac{\omega^2}{R_f} (\Phi_d^2 + \Phi_q^2)$$

$$= \underbrace{\frac{\omega^2 (\Phi_d^2 + \Phi_q^2)}{R_{f0}}}_{P_{fer_F}} + \underbrace{\frac{\omega (\Phi_d^2 + \Phi_q^2)}{K_f}}_{P_{fer_h}}$$

Les pertes fer seront modélisées de la manière suivante :



Résistance équivalente de perte fer

La résistance R_f est équivalente à deux résistances R_{f0} et $K_f \cdot \omega$ en parallèle.

Concernant la puissance électromagnétique P_{em} , elle représente la somme des pertes mécanique P_m et de la puissance utile P_u :

$$P_{em} = C_{em} \Omega = P_m + P_u$$

Avec $C_{em} = C_r + C_p = J \frac{d}{dt} \Omega$ (C_p représente le couple de perte)

Donc les pertes mécaniques s'écrivent : $P_m = C_p * \Omega$

VI. Système étudié et sa représentation par REM

Nous allons faire la REM (Représentation Energétique Macroscopique) de notre véhicule SECMA, d'une configuration monomoteur avec réducteur fixe qui est la plus adaptée aux impératifs industriels et commerciaux. Notre source d'énergie est un ensemble de batterie Lithium Fer Phosphate qui sont moins dangereuses que les batteries lithium Ion. Elles ont une durée de vie plus longue et aussi un meilleur rapport énergie massique. Le convertisseur triphasé est constitué de 3 modules IGBT 600V-400A : c'est notre variateur. Le moteur électrique est une machine synchrone à aimant permanent. Nous pouvons présenter ce système globalement par Représentation Energétique macroscopique (REM) :

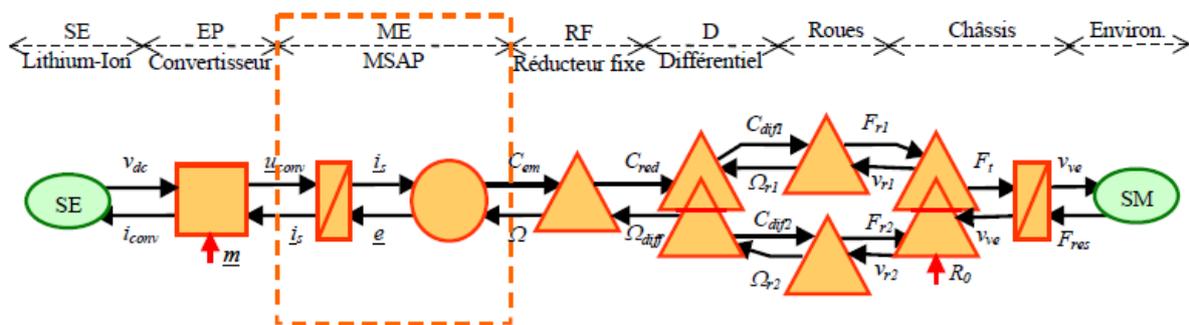


Figure 1.10 Présentation du système par REM

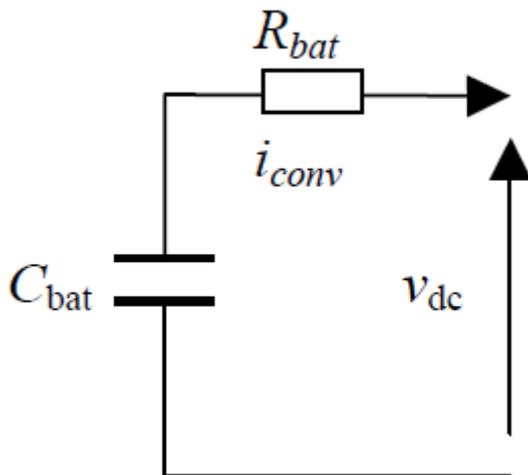
Par la suite, nous allons détailler la modélisation de ce système en prenant en compte les pertes dans chaque sous-système

VII. Modélisation avec considération des pertes

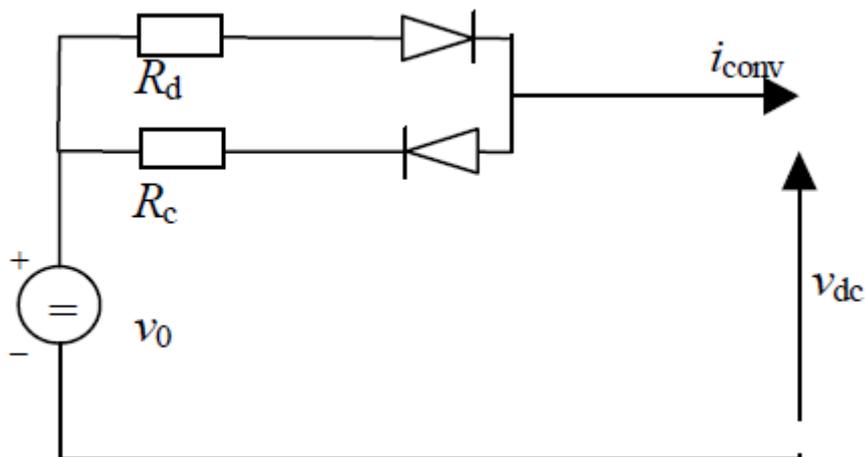
Dans ce chapitre, nous allons modéliser en détail élément par élément le véhicule. Premièrement nous présentons une modélisation de la Source Electrique (SE), ici une batterie Lithium Fer Phosphate. Par la suite nous proposons un modèle de convertisseur qui prend en compte l'ensemble des pertes en commutation et en conduction. Après nous décrivons un modèle de Park d'une Machine Synchrone à Aimants Permanent (MSAP) et nous considérons les pertes Joule, les pertes fers, les pertes mécaniques et le phénomène de saturation. La dernière partie porte sur la modélisation de la traction mécanique, c'est-à-dire : le réducteur fixe (RF), le différentiel (D), les deux roues motrices, le châssis et l'environnement mécanique.

1. Modélisation de la batterie Lithium Fer Phosphate :

Afin de modéliser notre batterie, nous allons la modéliser selon un schéma électrique équivalent où les pertes sont représentées par des résistances équivalentes. Le modèle le plus simple est composé d'un condensateur équivalent C_{bat} et d'une résistance équivalente R_{bat} en série. V_{dc} est la tension de sortie d'une batterie. i_{conv} est le courant de charge d'une batterie.



Nous n'avons pas le même modèle car le rendement de la batterie diffère en charge et en décharge. Nous pouvons modéliser les pertes de charge/décharge par deux résistances et des diodes pour séparer les cas charge/décharge, avec R_c et R_d résistance de charge et de décharge.



$$V_{dc} = R \cdot i_{conv} + V_0$$

Si batterie en charge $R=R_c$, si batterie en décharge $R=R_d$

En ce qui concerne la tension de la batterie, nous avons une valeur de 57,6 V et pour les résistances de charge et de décharge, elles peuvent être estimées par les caractéristiques fournies par des constructeurs de batteries.

,Model	SJLFP130A
,Cell Dimensions (mm)	178x56 x 278
,Nominal Capacity (Ah)	130
,Nominal Voltage (V)	3.2
,Impedance at 1kHz (mΩ)	<0.6
,Cell Weight (kg)	4.3±0.1
,Specific Energy (Wh/kg)	>100
,Standard Charge/Discharge Rate	0.3C
,Cut-off Charge Voltage (V)	3.65
,Cut-off Discharge Voltage (V)	2.5
,Cycle Life (0.3C, 80% Retention)	>2000
,Max. Discharge Rate	3C
,Max. Charge Rate	1C
,Pulse Max. Discharge Rate (10s)	10C
,Pulse Max. Charge Rate (10s)	7C
,Operating Temperature (°C)	0-45 for charge, -25-55 for discharge
,Storage Temperature (°C)	0-45
(%),Self-discharge Rate/Month	<3%

Comme nous pouvons remarquer dans les caractéristiques de notre batterie, nous avons un taux de décharge de 3C et un taux de charge de 1C. Pour pouvoir vous expliquer ça, nous allons prendre un exemple : Pour une batterie 1.6 Ah, C = 1.6A. Un taux de charge de C/2 aura besoin de 2h alors qu'un taux de charge de 2C aura besoin de 30min pour charger complètement la batterie à partir d'un état vide. A partir de la courbe de décharge, la tension par élément décroît de 0.1V pour un courant de 100A. Cela permet d'estimer la résistance interne de décharge à environ $R_d = 0.1/100 = 1 \text{ m}\Omega$. Ce qui nous permet de déduire la résistance de charge qui sera 3 fois supérieur (1C) : $R_c = 3 \text{ m}\Omega$.

Notre véhicule embarque une batterie composée de 18 cellules interconnectées en série. Ce qui nous permet de délivrer une tension au niveau du variateur de 57,6 V ($3.2 * 18 = 57,6V$)

D'autre part la capacité totale de la batterie est de 130 Ah soit 7.5 Kwh ($130*57.6$)

Donc la résistance de charge et de décharge totale de la batterie est

$$R_{ct} = R_c * 18$$

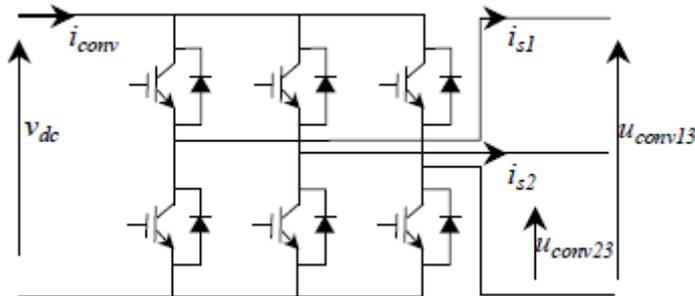
$$R_{dt} = R_d * 18$$

Les pertes dans la batterie sont calculées par :

$$P_b = R_t i_{conv}^2$$

2. Modélisation du convertisseur :

En ce qui concerne la modélisation du convertisseur, qui est dans notre cas un onduleur triphasé, nous allons construire un modèle de convertisseur électronique de puissance qui prend en compte les pertes.



Les pertes peuvent se décomposer en deux parties dans un convertisseur d'énergie électrique fonctionnant en commutation forcée : les pertes en conduction et les pertes en commutation. Les pertes en conduction dépendent des chutes de tension aux bornes des composants et des courants les traversant pendant une certaine durée dépendant du rapport cyclique. Les pertes en commutation dépendent de la fréquence de découpage du convertisseur.

Les pertes dépendent principalement de la tension de sortie, du courant de sortie, de la fréquence et du déphasage entre ces signaux de sortie, pour une oscillation approximativement sinusoïdale à une fréquence de modulation constante.

Sous l'hypothèse que les courants alternatifs sont sinusoïdaux, nous avons :

$$I_s = 0, P_{conv_1b} = 0$$

$$\text{Sinon } P_{conv_1b} = f_1(V_{dc}, f_{mod})I_s^2 + f_2(V_{dc}, f_{mod})I_s + f_3(V_{dc}, f_{mod})$$

P_{conv_1b} sont les pertes de convertisseur dans un bras. Si la stratégie de modulation est symétrique, les pertes de trois bras P_{conv} sont :

$$P_{conv} = 3 * P_{conv_1b}$$

f_1 , f_2 et f_3 sont des coefficients en fonction de la tension de bus continu v_{dc} et de la fréquence de modulation f_{mod} . Pour une tension de bus continu v_{dc} donnée et une fréquence de modulation f_{mod} fixe, les coefficients f_1 , f_2 et f_3 sont constants. Mais dans une situation réelle, la tension d'entrée v_{dc} du convertisseur délivrée par les batteries n'est pas constante. La relation générale de f_i (f_1 , f_2 ou f_3) est :

$$f_i = a_{1_i} + a_{2_i} f_{mod} + a_{3_i} V_{dc} + a_{4_i} f_{mod}^2 + a_{5_i} V_{dc}^2 + a_{6_i} f_{mod} V_{dc}$$

I_s est la valeur efficace du courant alternatif pendant une période, cette valeur peut varier avec la demande de charge. Pendant une période des courants alternatifs, I_s peut être calculée par :

$$I_s = 1/\sqrt{3} \sqrt{i\alpha^2 + i\beta^2}$$

Les courants $i\alpha$ et $i\beta$ sont obtenues par la matrice Concordia : i_{s1}

$$\begin{pmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{pmatrix}$$

Les coefficients $a_{1_i}, a_{2_i}, a_{3_i}, a_{4_i}, a_{5_i}, a_{6_i}$ sont écrits par la matrice \hat{a}_i comme :

$$\hat{a}_i = [a_{1_i}, a_{2_i}, a_{3_i}, a_{4_i}, a_{5_i}, a_{6_i}]$$

La relation entre la tension de bus continu V_{dc} et les tensions alternatives peut être exprimée par :

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} U_{conv12} \\ U_{conv23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{31} \\ C_{21} & -C_{23} \end{bmatrix} V_{dc} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} V_{dc} = \underline{m} V_{dc}$$

Les termes C_{ij} sont les fonctions de connexion des interrupteurs et \underline{m} est le vecteur de modulation. Ce modèle moyen peut être construit par le bilan de puissance. La puissance instantanée du côté du bus continu p_{dc} doit être la même que du côté alternatif p_s plus les pertes.

$$p_{dc} = p_s + p_{conv}$$

$$\begin{aligned} V_{dc} i_{dc} &= v_{conv1} i_{s1} + v_{conv2} i_{s2} + v_{conv3} i_{s3} + p_{conv} \\ &= v_{conv1} i_{s1} + v_{conv2} i_{s2} + v_{conv3} (-i_{s1} - i_{s2}) + p_{conv} \quad \text{avec 3 phases équilibrées} \\ &= (v_{conv1} - v_{conv3}) i_{s1} + (v_{conv2} - v_{conv3}) i_{s2} + p_{conv} \\ &= u_{conv13} i_{s1} + u_{conv23} i_{s2} + p_{conv} \\ &= \underline{m}^t v_{dc} i_s + p_{conv} \end{aligned}$$

On introduit un courant fictive i_p qui est associé aux pertes de convertisseur :

$$I_p = p_{conv} / V_{dc}$$

VIII. Influence de la commande pour utilisation optimale de l'énergie

Dans ce chapitre, nous discutons un type de commande par la méthode d'inversion menant à la Structure Maximale de Commande (SMC). Cette méthode s'obtient par inversion, pas à pas, du système décomposé en sous-systèmes élémentaires. L'obtention de la structure nécessite trois étapes :

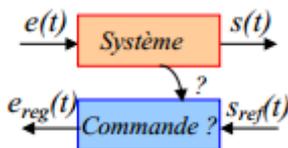
1. Décomposition en sous-systèmes élémentaires,
2. Détermination de la chaîne de réglage,
3. Inversion de cette chaîne selon les règles énoncées.

On considère dans un premier temps que toute variable est mesurable. On obtient alors une structure de commande qui nécessite l'accès à l'ensemble des grandeurs et qui demande un nombre maximal de capteurs.

Dans la première partie, nous allons parler de la construction d'une structure de commande. Nous allons présenter par la suite les contraintes de la commande. Puis, nous allons discuter de la détermination des références des courants, la commande MLI vectorielle et l'influence de divers correcteurs. Enfin, nous montrons nos résultats de simulation.

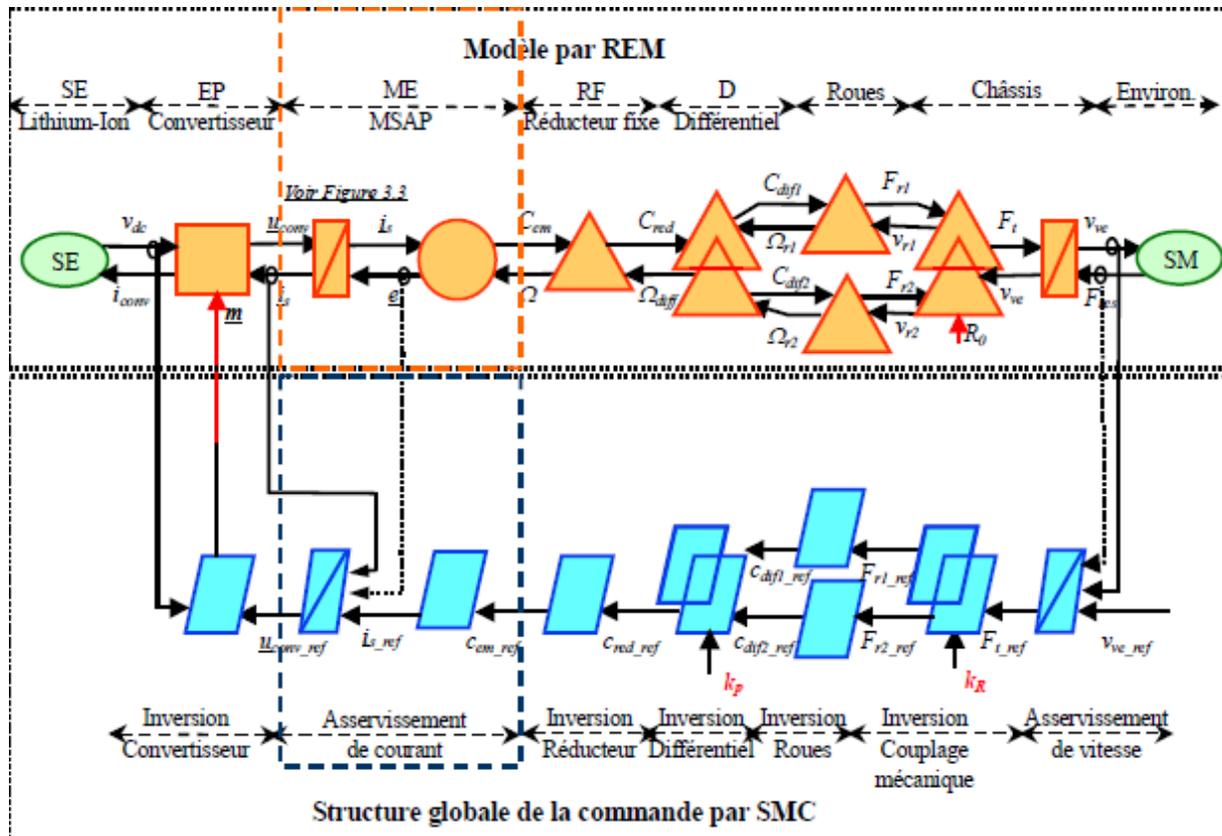
1. Construction de la Structure Maximale de Commande :

Comme nous l'avons cité dans le chapitre précédent, nous avons besoin d'inverser un modèle réalisé par REM afin de réaliser une commande SMC. Nous allons commencer par modéliser un modèle sans perte qui sera plus simple à réaliser. Après nous allons passer au modèle avec pertes qui servira à évaluer différentes possibilités sur cette commande.



Si on inverse la chaîne de réglage : $\underline{m} \rightarrow \underline{u}_{conv} \rightarrow \dot{i}_s \rightarrow C_{em} \rightarrow C_{red} \rightarrow C_{dif1}(C_{dif2}) \rightarrow F_{r1}(F_{r2}) \rightarrow F_t \rightarrow v_{ve}$

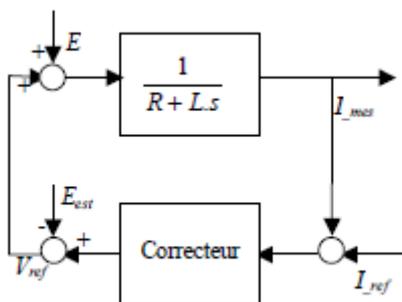
On obtient la chaîne de commande : $v_{ve_ref} \rightarrow F_{t_ref} \rightarrow F_{r1_ref}(F_{r2_ref}) \rightarrow C_{dif1_ref}(C_{dif2_ref}) \rightarrow C_{red_ref} \rightarrow C_{em_ref} \rightarrow \dot{i}_{s_ref} \rightarrow \underline{u}_{conv_ref} \rightarrow \underline{m}$



Les éléments d'accumulation d'énergie, qui ne sont pas inversables physiquement, sont assurés par un asservissement (correcteur).

2. Optimisation par l'influence de divers correcteurs

Dans notre système, nous avons utilisé deux asservissements (correcteurs). Nous allons comparer les correcteurs P (Proportionnel), PI (Proportionnel Intégral) et IP par leur réponse à un échelon et leur réponse à une rampe avec un système simple : un système monophasé du 1^{ère} ordre RL (une résistance R et une inductance cyclique L en série) avec une perturbation E :



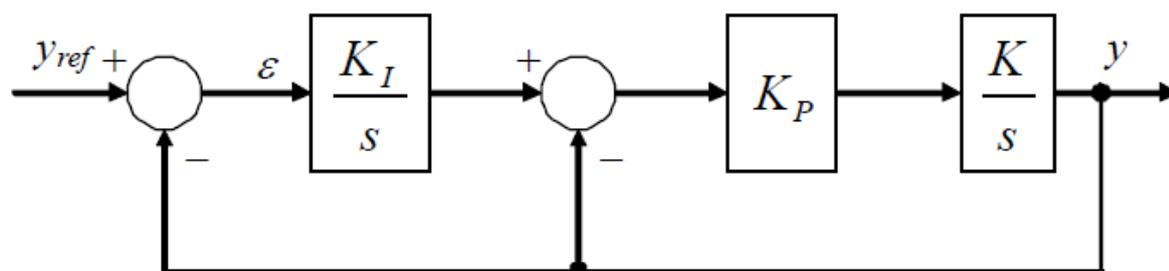
On obtient le tableau suivant :

Correcteur	Réponse à un échelon
P	erreur statique non nulle
PI	dépassements
IP	erreur statique nulle sans dépassements

Comme on a une erreur statique non nulle au niveau du correcteur P, nous allons garder que les correcteurs PI et IP pour la simulation et nous allons les comparer.

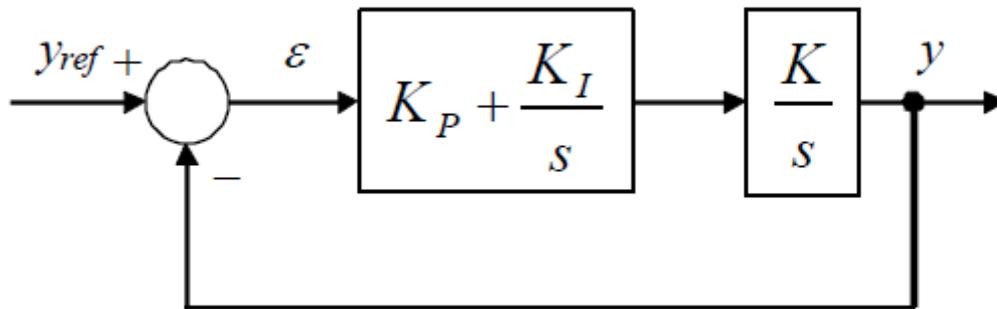
Régulateur de courant de type IP

Le correcteur intégral proportionnel IP est essentiellement différent du correcteur Pi par le fait qu'il ne présente pas de zéro dans la fonction de transfert en boucle fermée, ainsi sa sortie ne présentera pas de discontinuité lors de l'application d'une consigne de type échelon. Le schéma bloc de la régulation de courant incluant le correcteur IP est illustrée par la figure suivante :



Régulateur de courant de type PI

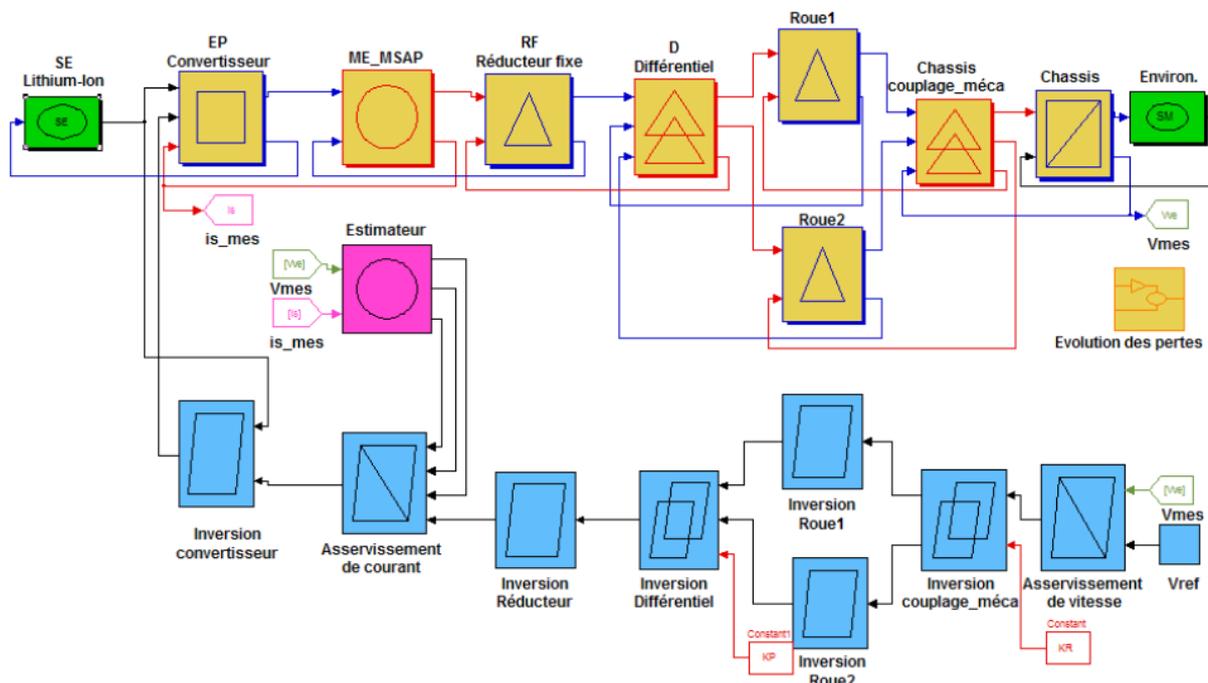
Le schéma de régulation de courant par un correcteur de type PI est illustré par la figure suivante :



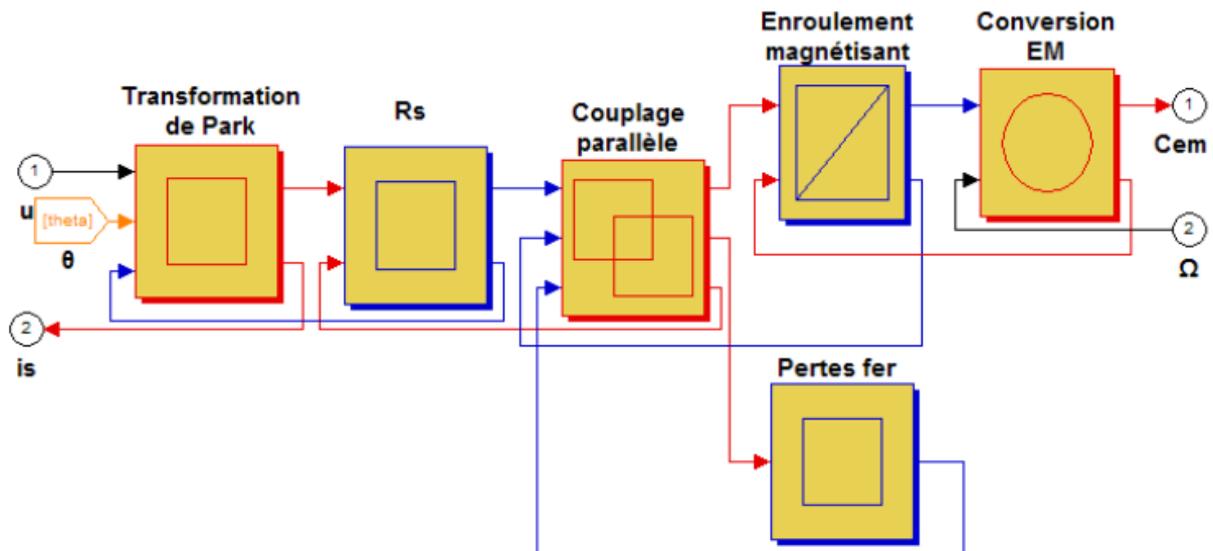
L'objectif du régulateur PI est de combiner les actions d'un proportionnelle et un intégrale. Le proportionnelle va multiplier le signal d'erreur par la constante du proportionnel K_p , qui sera le gain du régulateur. L'objectif est de réduire l'erreur rapidement, mais elle n'élimine pas l'erreur d'état stationnaire. Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire le contrôleur intégré, qui permettra de réduire l'erreur d'état stable en intégrant le signal d'erreur.

Il est nécessaire de régler le régulateur PI, en sélectionnant les valeurs de K_p et K_i . Pour ce faire, la première étape consiste à obtenir la fonction de transfert de la boucle entière (même méthode que l'IP contrôleur).

IX. Résultat des simulations

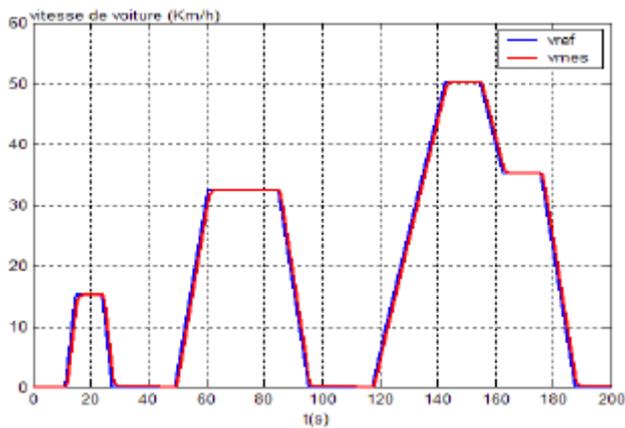


Simulation sous Matlab Simulink du modèle avec les pertes et avec la commande



Simulation sous Matlab Simulink du bloc MSAP avec pertes

Pour la simulation nous avons utilisé le cycle urbain européen ECE15 appelé également UDC (Urban Driving Cycle). Ce cycle dure 200 secondes et comprend trois phases d'accélération et quatre phases de décélération. Il est utilisé pour la mesure des polluants et des consommations sur tous types de véhicules. Nous constatons que la vitesse de la voiture suit bien le cycle.

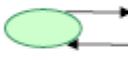
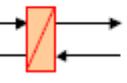
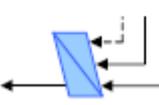
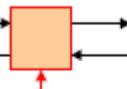
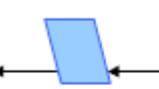
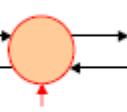
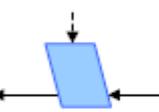
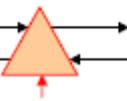
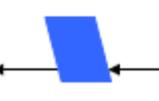


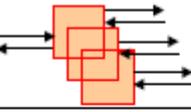
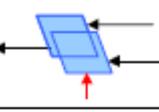
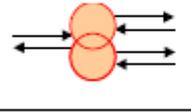
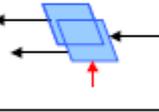
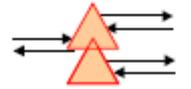
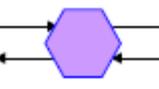
X. Conclusion

Face à une constante évolution de la pollution atmosphérique, des répercussions sur la santé de l'homme ainsi que sur l'environnement constituent un facteur à prendre en compte. De plus une consommation abondante des énergies fossiles nous a poussés à concevoir un concept innovant en termes de pollution et de consommation qui soit le plus adapté pour répondre à ces attentes. Ce dernier est : les technologies électriques.

Ingénieurs et constructeurs ont développé les systèmes électriques par le biais d'un moteur électrique. Cette technologie a permis de répondre à certains problèmes que pose la voiture traditionnelle, comme les émissions de gaz, la nuisance sonore, la consommation... Pour faire face à ces problèmes écologiques, des normes sévères ont été établies. Les véhicules électriques appartiennent donc aux classes de machines non polluantes, ils répondent donc à ces principes. Le véhicule électrique fait ses preuves en milieu urbain mais est un inconvénient sur les longs trajets.

XI. Annexe

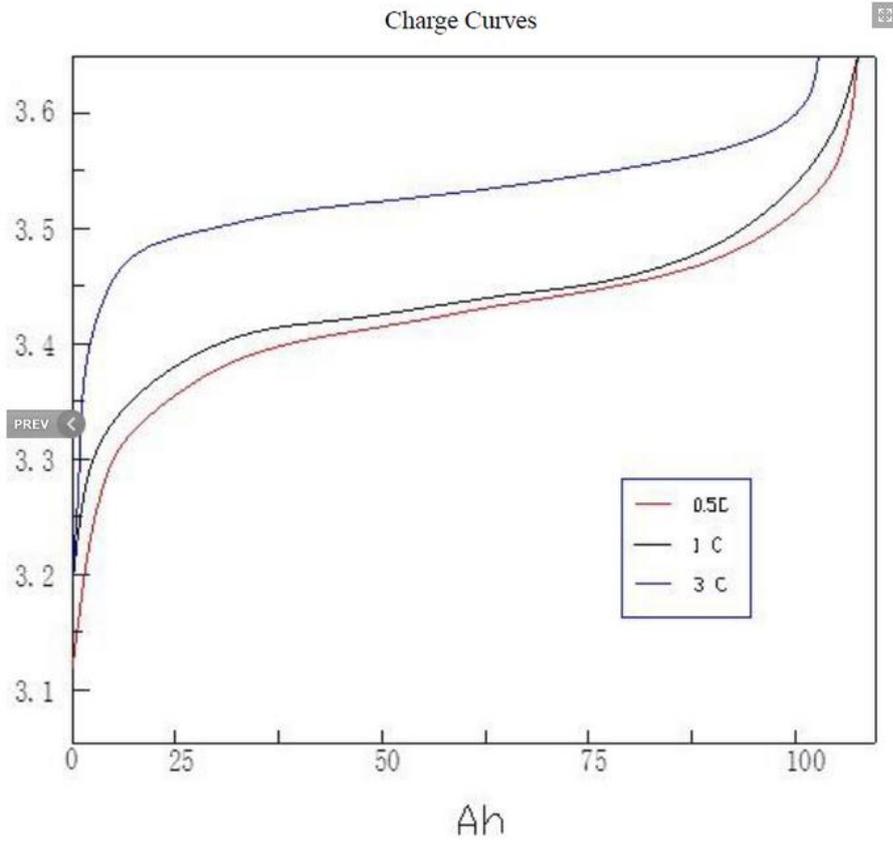
REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE (REM)			
La REM est une extension du GIC, basé sur le principe d'action-réaction.			
	variables d'action et de réaction		Source d'énergie
	accumulateur d'énergie		inversion avec asservissement
	convertisseur électrique		inversion directe (sans asservissement)
	convertisseur électromécanique		inversion directe avec rejet de perturbation
	convertisseur mécanique		bloc de stratégie

	couplage électrique (double)		inversion d'un couplage amont (pondération)
	couplage électromécanique (simple)		inversion d'un couplage aval (répartition)
	couplage mécanique		modèle ou estimateur (quelle que soit la forme)

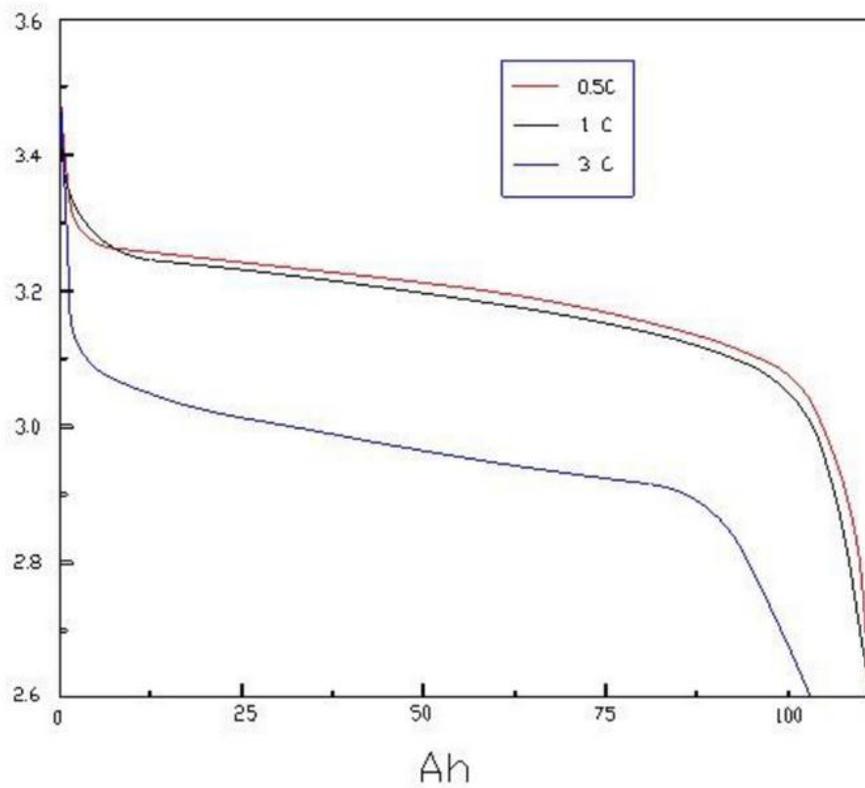
Fréquence de modulation f_{mod} (kHz)	20	Inductance cyclique non saturée L_d, L_q (mH)	0.047
Flux rotorique Φ_e (Nm/A)	0.08	Nombre de paires de pôles p	4
Résistance statorique R_s	0.014	Rapport de réduction K_r	7.2
Rayon des roues R_{roue} (m)	0.27	Gravité g (Nm/kg)	0.98
Largeur du véhicule l (m)	1.4	Masse du véhicule M (kg)	500
Masse volumique de l'air ρ_{air} (kg/m ³)	1.223	Vitesse maximale de la voiture (km/h)	100
Coefficient de pénétration dans l'air C_x	0.33	Puissance maximale P_{max} (kW)	24.8
Puissance nominale P_n (kw)	8.6	Couple du réducteur maximum (N.m)	79

	Symbole	Descriptions	Symbole	Descriptions
Batterie	v_D	Tension en circuit ouvert	v_{dc}	Tension de bus continu
	R_p, R_d	Résistance équivalente en charge et en décharge pour une unité de base	R_{cr}, R_{dt}	Résistance équivalente totale en charge et en décharge
	i_{conv}	Courant de bus continu	P_b	Pertes de batterie
Convertisseur Triphasé	I_s	Valeur efficace du courant alternatif	i_α, i_β	Courants transformés par la matrice Concordia
	f_{mod}	Fréquence de modulation	f_l (f_1, f_2 ou f_s)	coefficients de pertes d'un convertisseur (ces sont des fonctions)
	\hat{a}_l	Matrice des coefficients de f_l	P_{conv}	Pertes des 3 bras d'un convertisseur
MSAP	L_d	Inductance cyclique longitudinale	L_q	Inductance cyclique transversale
	Φ_d, Φ_q	Flux direct et en quadrature	C_{em}	Couple électromagnétique
	Φ_e	Flux rotorique	C_p	Couple de pertes mécaniques
	v_{sd}, v_{sq}	Tension directe et en quadrature	C_r	Couple résistant
	i_{sd}, i_{sq}	Courants composants des axes d et q	p	Nombre de paires de pôles
	i_{fd}, i_{fq}	Courants composants de pertes fers des axes d et q	ω	Pulsation électrique $\Omega = p \Omega$
	i_{md}, i_{mq}	Courants composants magnétisants des axes d et q	Ω	Vitesse de rotation du rotor
	R_s	Résistance statorique	P_J	Pertes Joule
	R_f	Résistance équivalente de pertes fers	P_{fer}	Pertes fers
	R_{fp}, K_f	Coefficients de pertes fers	P_m	Pertes mécaniques
	a_{mb}, a_{ml}	Coefficient de pertes mécaniques	J	Inertie esquivant
Traction Mécanique	L_θ	Inductance non saturée	K_s	Coefficient de saturation
	C_{nd}	Couple de réducteur	Ω_{df}	Vitesse de rotation entre le réducteur et le différentiel
	k_{nd}	Rapport de réduction	C_f	couple de frottement interne du différentiel
	$C_{d(1)}, C_{d(2)}$	Couples de différentiel des roues 1 et 2	C_{d1}, C_{d2}	Couple de pertes différentielles
	Ω_{r1}, Ω_{r2}	Vitesses de rotation des roues 1 et 2	a_d	Coefficient de pertes de différentiel.

	$P_{r1,2}, P_{r1,2r}$	Pertes de différentiel	F_{r1}, F_{r2}	Forces de traction des roues 1 et 2
	v_{r1}, v_{r2}	Vitesses des roues 1 et 2	r	Rayon des roues
	F_t	Force de traction totale du véhicule	F_{res}	Force de résistance d'environnement
	v_{ve}	Vitesse du véhicule.	M	Masse du véhicule
	F_a	Force de résistance aérodynamique	ρ_{air}	Masse volumique de l'air
	S_f	Section frontale du véhicule	C_x	Coefficient de pénétration dans l'air
	F_{fr}	Force de résistance de roulement	F_p	Force de pesanteur
	g	Gravité	λ	Pente de la route



Courbe de charge de la batterie



Courbe de décharge de la batterie

Bibliographie :

[http://eric.semail.free.fr/SEMAIL WEB/congres/CN5c.pdf](http://eric.semail.free.fr/SEMAIL_WEB/congres/CN5c.pdf)

<http://www.enim.fr/mosim2010/articles/104.pdf>

<http://www.Futura-sciences.com>