

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

École Nationale Polytechnique  
Département Électrotechnique



Projet de Fin d'Étude  
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en  
Électrotechnique  
Thème

---

Étude de la commande de la chaîne de  
traction du tramway d'Alger

---

Proposé et dirigé par :  
Pr E.M. BERKOUK

Réalisé par :  
BENHAMIDA Mohammed Ali  
CHERFA Brahim

---

Promotion Juin 2013

E.N.P- 10, Avenue Hassan Badi, 16200 El Harrach, Alger.

## ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة حول طريقة التحكم المباشر في العزم الكهرومغناطيسي للمحركات الغير متزامنة ذوات قفص السنجاب المستعملة في تراموي الجزائر. بعد التذكير حول القطارات الكهربائية، درسنا طريقة التحكم المباشر في العزم الكهرومغناطيسي على آلة صغيرة ٣ كيلوواط، ثم قدرنا القوى الميكانيكية التي تعارض حركة التراموي من اجل تطبيق التحكم المباشر في العزم الكهرومغناطيسي على محركات تراموي الجزائر. إقترحنا حلين للتحسين. الأول للحد من وتيرة التحول و الثانية للفرق في السرعة.

كلمات مفتاحية : المحرك الغير متزامن، تراموي الجزائر، تقدير الجهد

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la commande directe du couple DTC appliquée aux machines asynchrones à cage d'écureuil du tramway d'Alger. Après avoir abordé la traction électrique, nous avons étudié la commande directe du couple sur une petite machine de 3 kW, puis nous avons estimé les efforts mécaniques qui s'opposent au mouvement du tramway afin de pouvoir appliquer la commande directe du couple DTC sur les moteurs du tramway. Enfin nous avons proposé deux solutions : la première pour réduire la fréquence de commutation en utilisant les vecteurs de tension nuls et la deuxième concerne la correction des vitesses des roues motrices lors des courbures par la commande sur un onduleur à cinq bras.

Mots clés : DTC, Moteur asynchrone, Tramway d'Alger, estimation d'effort, Traction électrique, commande multi-machine, onduleur à cinq bras.

## Abstract

This thesis focuses on the study of direct torque control DTC applied to induction motors with squirrel-cage of the Algiers tramway. After having discussed about the electric traction, we studied the direct torque control of a small machine 3 kW, then we estimated the mechanical forces that oppose the motion of the tram in order to apply direct torque control DTC on tram engines.

Finally, we have proposed two solutions : one to reduce the switching frequency using zero voltage vectors and the second concerns the differential speed of a five arms inverter.

Key words : DTC induction motor, Algiers Tramway, estimate effort, multi-machine control, five arms inverter.

# Liste des symboles

$\alpha$	L'angle d'inclinaison de la pente
$\eta_g$	Rendement du réducteur
$\Gamma_1$	Couple de la partie rapide du réducteur
$\Gamma_2$	Couple de la partie lente du réducteur
$\Gamma_e$	Couple au niveau de l'essieu
$\Gamma_m$	Couple au niveau du moteur
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique
$\Omega_1$	Vitesse de la partie rapide du réducteur
$\Omega_2$	Vitesse de la partie lente du réducteur
$\Omega_e$	Vitesse de rotation de l'essieu
$\Omega_m$	Vitesse de rotation du moteur
$\omega_r$	Pulsation rotorique
$\omega_s$	Pulsation rotorique
$\phi_{s\alpha}$	Flux statorique suivant l'axe $\alpha$
$\phi_{s\beta}$	Flux statorique suivant l'axe $\beta$
$\phi_s$	Module du flux statorique
$\theta_s$	L'angle entre l'axe $\alpha$ et le stator
$F_a$	Force d'arrachement
$F_c$	Force due aux courbures
$F_d$	Force due aux déclivités
$F_f$	Force de frottement
$F_r$	Force de traction fournie par un seul moteur
$F_t$	Force traction totale fournie par les moteurs

$F_{res}$	Force s'opposant au mouvement du tramway
$g$	Accélération de la pesanteur
$J_1$	Moment d'inertie vu par la partie rapide du réducteur
$J_2$	Moment d'inertie vu par la partie lente du réducteur
$J_c$	Moment d'inertie corrigé du moteur
$J_m$	Moment d'inertie du moteur
$J_r$	Moment d'inertie de l'essieu et du réducteur au niveau de la roue
$k_e$	Coefficient qui tient compte de l'écartement de la voie
$k_g$	Rapport de réduction
$k_t$	Coefficient qui tient compte du type de train
$M$	Masse du Tramway chargé
$M_i$	Masse d'inertie du Tramway
$M_v$	Masse du Tramway vide
$M_p$	Masse des personnes à bord du Tramway
$n_e$	Nombre d'essieu dans le tramway
$n_m$	Nombre d'essieu motorisé
$r$	Rayon de la roue
$r_v$	Rayon de courbure
$V_r$	Vitesse de translation de la roue
$V_t$	Vitesse de translation du tramway
$V_v$	Vitesse du vent
$C_e$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant
$f$	Coefficient de frottement
$I_{\alpha_r}$	Courant rotorique suivant l'axe $\alpha$
$I_{\alpha_s}$	Courant statorique suivant l'axe $\alpha$
$I_{\beta_r}$	Courant rotorique suivant l'axe $\beta$
$I_{\beta_s}$	Courant statorique suivant l'axe $\beta$
$J$	Moment d'inertie

$L_r$	Inductance cyclique rotorique
$L_s$	Inductance cyclique statorique
$M$	Mutuelle inductance stator-rotor
$p$	Nombre de paires de pôles
$R_r$	Résistance rotorique
$R_s$	Résistance statorique
$V_{\alpha_s}$	Tension statorique suivant l'axe $\alpha$
$V_{\beta_s}$	Tension statorique suivant l'axe $\beta$

# Liste des Acronymes

**HVDC** High Voltage Direct Current

**IGBT** Insulated Gate Bipolar Transistor

**MLI** Modulation de Largeur d'Impulsion

**MOSFET** Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor

**DTC** Direct Torque Control

**PI** Régulateur de type proportionnel intégral

**SVM** Space Vector Modulation

**AGV** Automotrice à Grande Vitesse

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>6</b>
<b>Table des figures</b>	<b>9</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>11</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>12</b>
<b>1 Traction électrique</b>	<b>13</b>
Introduction . . . . .	13
1.1 Généralités . . . . .	13
1.1.1 La tension d'alimentation . . . . .	14
1.1.2 Le moteur de traction . . . . .	15
1.1.3 Types d'exploitation . . . . .	17
1.2 Contraintes mécaniques . . . . .	18
1.2.1 Adhérence . . . . .	18
1.2.2 Gabarit . . . . .	19
1.2.3 Les efforts . . . . .	19
1.3 Tramway . . . . .	19
1.3.1 Historique . . . . .	19
1.3.2 Poste d'alimentation . . . . .	20
1.3.3 Transmission de l'énergie vers le tramway . . . . .	21
1.3.4 Équipements de traction . . . . .	22
1.4 Commande des moteurs asynchrones . . . . .	22
1.4.1 Commande scalaire . . . . .	22
1.4.2 Commande vectorielle . . . . .	22
1.4.3 Commande directe du couple . . . . .	23
Conclusion . . . . .	23
<b>2 Commande directe du couple</b>	<b>24</b>
Introduction . . . . .	24
2.1 Principe de la commande directe du couple . . . . .	25
2.1.1 Contrôle du flux statorique . . . . .	26

2.1.2	Contrôle du couple électromagnétique . . . . .	27
2.1.3	Détermination de la région et estimation du couple et du flux statorique . . . . .	28
2.1.4	Réglage du flux statorique et du couple électromagnétique . . . . .	29
2.2	Simulation sur MATLAB . . . . .	31
2.2.1	Interprétation des résultats . . . . .	35
2.3	Influence des bandes d'hystérésis sur la fréquence de commutation . . . . .	36
	Conclusion . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Application au tramway d'Alger</b>	<b>38</b>
	Introduction . . . . .	38
3.1	Présentation du tramway d'Alger . . . . .	38
3.1.1	Présentation du réseau d'alimentation . . . . .	38
3.1.2	Présentation du matériel roulant . . . . .	39
3.2	Partie mécanique . . . . .	40
3.2.1	Effort de résistance à l'avancement . . . . .	40
3.2.2	Correction de l'inertie . . . . .	42
3.3	Partie électrique . . . . .	43
3.3.1	Choix de la commande . . . . .	43
3.3.2	Choix du régulateur de vitesse . . . . .	44
3.3.3	Filtre d'entrée . . . . .	45
3.3.4	Bloc de defluxage . . . . .	45
3.4	Limitation de la tension du bus continu . . . . .	46
3.5	Application . . . . .	46
3.5.1	Simulation sur Matlab . . . . .	47
3.5.2	Interprétations des résultats . . . . .	54
	Conclusion . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Amélioration de la commande</b>	<b>56</b>
	Introduction . . . . .	56
4.1	Commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux . . . . .	56
4.1.1	Principe . . . . .	56
4.1.2	Simulation sur Matlab . . . . .	58
4.2	Annulation du différentiel de vitesse mécanique . . . . .	67
4.3	Structure mono-convertisseur multi-machines . . . . .	69
4.3.1	Principe . . . . .	69
4.3.2	Simulation sur MATLAB . . . . .	70
	Conclusion . . . . .	77



<b>Conclusion générale</b>	<b>78</b>
Conclusion . . . . .	78
Perspectives . . . . .	78
<b>Bibliographie</b>	<b>80</b>
<b>A Paramètres de la Machine 1</b>	<b>81</b>
<b>B Paramètres du Moteur de traction</b>	<b>82</b>
<b>C Modélisation de la machine asynchrone</b>	<b>83</b>
C.1 Modèle d'état dans un repère lié au stator . . . . .	83
C.1.1 Équations électriques . . . . .	83
C.1.2 Équations mécaniques . . . . .	84
<b>D Transformée de Concordia</b>	<b>85</b>
D.1 Passage d'un repère biphasé vers un repère triphasé . . . . .	85
D.2 Passage d'un repère triphasé vers un repère biphasé . . . . .	85

# Table des figures

1.1	Historique des technologies utilisées en traction électrique . . . . .	13
1.2	Électrification en Europe . . . . .	15
1.3	Schéma d'un Moteur Direct . . . . .	16
1.4	Moteur à aimants permanents de l'AGV . . . . .	17
1.5	Gabarit du tramway . . . . .	19
1.6	Schéma simplifié d'une sous-station . . . . .	20
1.7	Coupe d'un fil trolley en cuivre, section de 150 [mm <sup>2</sup> ], pour ligne de tramway [10] . . . . .	21
1.8	Systèmes d'alimentation par le sol . . . . .	21
2.1	Principe de base de la commande directe du couple . . . . .	25
2.2	Principe de la DTC . . . . .	25
2.3	Comparateur à hystérésis et évolution du vecteur flux statorique . . . . .	26
2.4	Comparateur à hystérésis à deux niveaux contrôlant le couple . . . . .	27
2.5	Évolution du couple électromagnétique en fonction du vecteur appliqué . . . . .	29
2.6	Découpage du plan $\alpha$ - $\beta$ en six secteurs . . . . .	30
2.7	Couple électromagnétique . . . . .	32
2.8	Loupe sur le couple électromagnétique . . . . .	32
2.9	Courants statoriques . . . . .	33
2.10	Loupe sur les courants statoriques . . . . .	33
2.11	Flux statorique . . . . .	34
2.12	Module du flux statorique . . . . .	34
2.13	Loupe sur module du flux statorique . . . . .	35
2.14	Loupe sur l'état de l'interrupteur $S_a$ . . . . .	35
3.1	Schéma de principe de la circulation entre les sous stations et les rames . . . . .	39
3.2	Schéma du Citadis 402 . . . . .	39
3.3	Schéma représentant la bogie ARPEGE . . . . .	40
3.4	Schéma Onduleur tramway . . . . .	40
3.5	Schéma simplifié d'un réducteur de vitesse . . . . .	42
3.6	Schéma de régulation . . . . .	44
3.7	Réponse indicielle du système de régulation . . . . .	45

3.8	Bloc de defluxage . . . . .	46
3.9	Structure globale de la commande . . . . .	47
3.10	Vitesses de rotation . . . . .	49
3.11	Loupe sur les vitesses de rotation . . . . .	49
3.12	État de l'interrupteur $S_a$ . . . . .	50
3.13	Courant absorbé par l'onduleur . . . . .	50
3.14	Couple électromagnétique . . . . .	51
3.15	Courants statoriques . . . . .	52
3.16	Module du flux statorique . . . . .	53
3.17	Tensions aux bornes de la capacité d'entrée et aux bornes la résistance de freinage . . . . .	54
4.1	Comparateur à hystérésis à trois niveaux contrôlant le couple électromagnétique . . . . .	57
4.2	Couple électromagnétique . . . . .	59
4.3	Loupe sur le couple électromagnétique . . . . .	60
4.4	Courants statoriques . . . . .	61
4.5	Loupe sur les courants statoriques . . . . .	62
4.6	État de l'interrupteur $S_a$ . . . . .	63
4.7	Tension de la phase $a$ . . . . .	64
4.8	Module du flux statorique . . . . .	65
4.9	Loupe sur le module du flux statorique . . . . .	66
4.10	Modèle de trajectoire . . . . .	68
4.11	Structure mono-convertisseur multi-machines . . . . .	69
4.12	Courant absorbé par le bras commun . . . . .	70
4.13	Courants statoriques . . . . .	71
4.14	Loupe sur les courants statoriques . . . . .	72
4.15	Vitesse de rotation . . . . .	73
4.16	Couple électromagnétique . . . . .	74
4.17	loupe sur le couple électromagnétique . . . . .	75
4.18	loupe sur le module du flux statorique . . . . .	76
4.19	Loupe sur le courant absorbé par le bras commun . . . . .	77

# Liste des tableaux

2.1	Position du vecteur flux statorique . . . . .	28
2.2	Table de commutation de la commande directe du couple . . . . .	31
2.3	Valeurs imposées dans la simulation . . . . .	31
2.4	Influences des largeurs des bandes d’hystérésis sur la fréquence de commutation . . . . .	36
3.1	Coefficients de la force de frottement . . . . .	41
3.2	Conditions de simulation . . . . .	48
4.1	Nouvelle table de commutation . . . . .	57
4.2	Valeurs imposées dans la simulation . . . . .	58
4.3	Influences des largeurs des bandes d’hystérésis sur la fréquence de commutation . . . . .	58
4.4	Données de Référence de la simulation . . . . .	70

# Introduction générale

L'aménagement d'une grande ville, voire d'une capitale comme Alger, nécessite des plans et des infrastructures pour répondre aux différents besoins sociaux, économiques, environnementaux et culturels. Ceci offre non seulement le bien être à ses habitants, mais aussi une vitrine moderne au pays. Parmi les domaines les plus importants à accomplir : le transport.

Le transport nécessite une coordination entre les différents moyens utilisés (taxi, bus, train, tramway...). Parmi ces infrastructures, le tramway se positionne comme une excellente solution au regard du prix d'investissement et d'entretien, mais aussi d'un point environnemental et énergétique.

Le maintien du bon fonctionnement de ce moyen de transport nécessite la collaboration de plusieurs disciplines; telles que la mécanique, l'électronique, l'automatique, le génie civil et l'électrotechnique.

Notre étude portera sur la thématique : la commande de la chaîne de traction du tramway d'Alger. Il s'agit d'appliquer une loi de commande définie pour les moteurs asynchrones et de l'adapter pour la traction électrique.

Afin de rendre notre étude la plus réaliste possible, nous avons pris en considération tous les paramètres fournis par l'entreprise Métro d'Alger. De plus, nous avons utilisé des lois empiriques pour mieux refléter l'impact de la partie mécanique.

Dans notre rapport, nous aborderons dans le premier chapitre l'histoire de la traction électrique et son évolution, ainsi que le tramway et les différents types de commande des moteurs asynchrones. Dans le second chapitre, nous traiterons la commande directe du couple, sa réalisation, ainsi que ses avantages. Nous appliquerons cette commande sur les moteurs de traction du tramway d'Alger dans le troisième chapitre. Nous commencerons tout d'abord par une présentation du tramway Alger suivie par les lois mécaniques nécessaires pour la modélisation. Enfin, dans le dernier chapitre, nous proposerons trois solutions pour améliorer la structure de commande. Nous concluons notre rapport par une synthèse et des perspectives.

# Chapitre 1

## Traction électrique

### Introduction

Dans ce premier chapitre, Nous présenterons tout d'abord l'évolution de la traction électrique à travers l'histoire, en distinguant les différents moteur, tension d'alimentation et les types d'exploitation. Puis nous introduirons certaines contraintes mécaniques rencontrées dans le domaine de la traction électrique. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous aborderons le tramway et son système d'alimentation. Avant de conclure ce chapitre, nous traiterons les différents types de commande des moteurs asynchrones.

### 1.1 Généralités

La traction électrique a vu le jour en 1879, Werner von Siemens met en œuvre la première locomotive électrique entraînée par un moteur série de 4 [kW] [1]. Elle s'est imposée au début dans le transport urbain où la puissance demandée est relativement modeste, mais très vite elle a pu concurrencer les locomotives à vapeur dans la grande traction, ainsi on a atteint en 1903 la vitesse 203 [km/h]. Depuis ce domaine ne cesse de se développer grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la commande, comme le montre la figure 1.1.

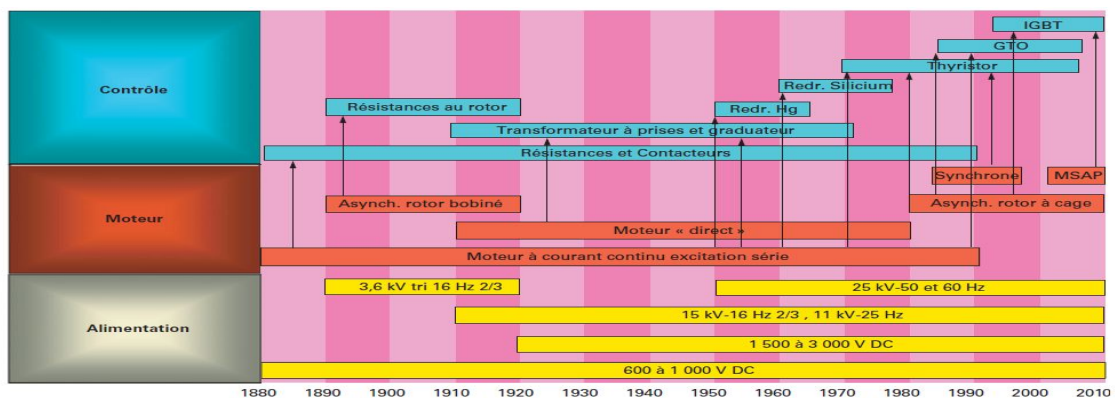


FIGURE 1.1 – Historique des technologies utilisées en traction électrique [2]

Un système de traction électrique est caractérisé par :

- La tension d'alimentation.
- Le moteur de traction.
- Les types d'exploitation.

### 1.1.1 La tension d'alimentation

La tension d'alimentation d'une ligne de traction électrique est généralement d'ordre historique, mais dépend aussi de la puissance utilisée. Il faut noter aussi que le développement des convertisseurs statiques a permis l'interconnexion des différents réseaux d'alimentations. On distingue donc les tensions d'alimentations suivantes :

- Tension continue.
- Tension monophasée à fréquence spéciale.
- Tension monophasée à fréquence industrielle.
- Tension triphasée à fréquence industrielle.

#### Tension continue

Les premiers systèmes d'alimentation étaient en tension continue, car on maîtrisait le moteur à courant continu. Ce type de tension présente l'avantage de ne pas engendrer des pertes inductives, mais nécessite beaucoup de sous-stations d'alimentation afin de parer à la chute de tension.

Elle est utilisée dans la petite traction, généralement 750 [V] pour le transport urbain (métro, tramway), car elle nécessite moins de dispositifs d'isolement. Mais aussi dans le transport suburbain, et même dans la grande traction dans certains pays (train à grande vitesse en Italie).

#### Tension monophasée à fréquence spéciale

Elle a fait son apparition au début de 20<sup>ème</sup> siècle sous l'impulsion des travaux d'Emil Huber-stockar, et de Behn Eschenburg. Le réseau d'alimentation a ses propres centrales de production qui fournissent une fréquence de  $16^{3/2}$  [Hz] en Europe, et 25 [Hz] au États-Unis. Il n'y a eu aucune nouvelle électrification lors des 30 dernières années suivant l'adoption de ce type de tension [3].

#### Tension monophasée à fréquence industrielle

Elle a fait son apparition en Hongrie 1932, puis en Allemagne 1935, mais il a fallu attendre la fin de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale pour avoir des résultats concluants (France 1950). Depuis elle n'a cessée de se développer surtout pour la grande traction, où les tensions peuvent atteindre 50 [kV].

## Tension triphasée à fréquence industrielle

Elle a été utilisée au nord de l'Italie, car elle a pour avantage d'assurer la stabilité de marche aux moteurs asynchrones triphasés à cette époque. Mais l'inconvénient de ce type de tension est qu'il nécessite de la transporter sur trois conducteurs, ces derniers présentent des difficultés de croisement des phases [4]. Cette technologie a fini par être abandonnée.

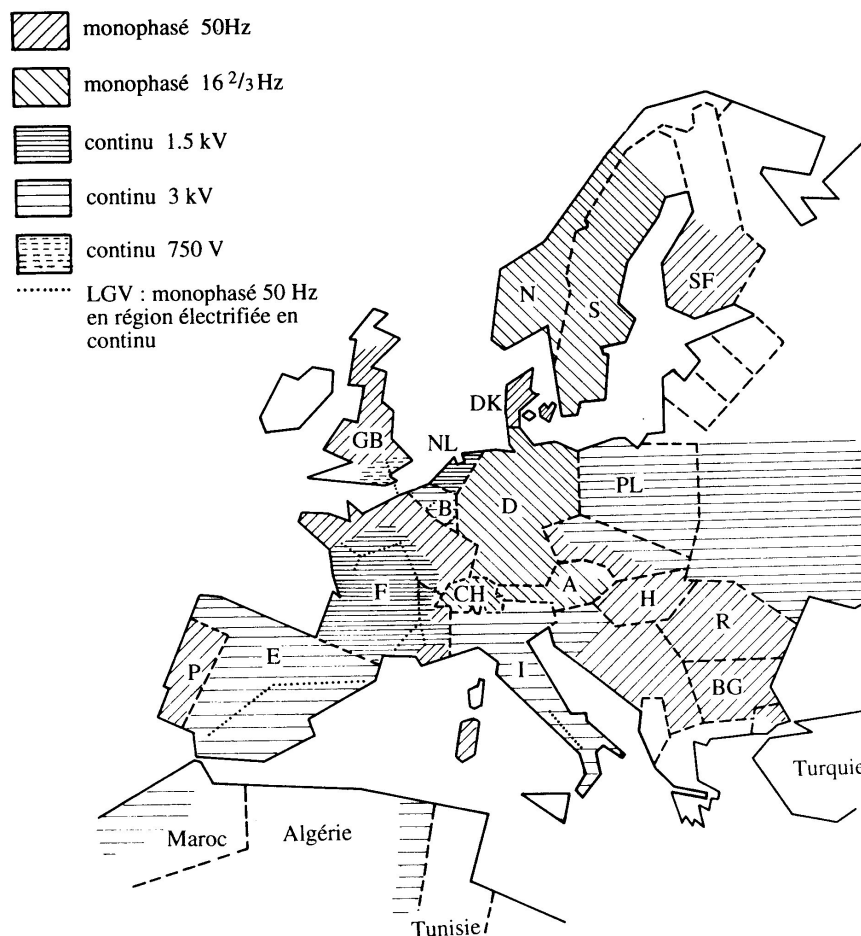


FIGURE 1.2 – Électrification en Europe [3]

### 1.1.2 Le moteur de traction

#### Moteur à courant continu

Les premières applications de la traction électrique étaient destinées au transport urbain. Elle utilise des moteurs à courant continu à collecteur à excitation série, car ce type de moteur présente l'avantage de fournir un couple de démarrage élevé mais aussi car c'était la machine qu'on maîtrisait le mieux, dont la commande est facile. Ce type de



moteur n'a été abandonné qu'à partir de 1990 avec le développement de l'électronique de puissance.

### Moteur direct

C'est un moteur à collecteur à excitation série alimenté par un réseau monophasé. Il se différencie du moteur à courant continu par [3] :

- Le circuit magnétique est en tôles empilées, afin de réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis.
- Un nombre de pôles plus élevé, car la puissance par pôle ne peut atteindre celle d'un moteur à courant continu de même puissance, ceci est dû au fait qu'on a diminué le flux par pôle afin de diminuer la tension de commutation
- Un enroulement de compensation est indispensable pour compenser au moins partiellement la chute de tension inductive.
- Pour améliorer la commutation, on place un shunt ohmique en parallèle avec l'enroulement de commutation

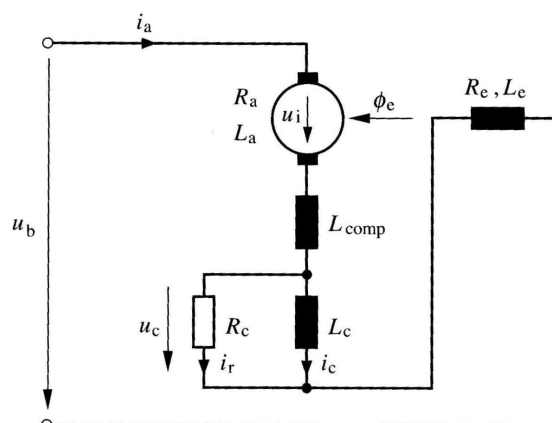


FIGURE 1.3 – Schéma d'un Moteur Direct [3]

### Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone à rotor bobiné a été utilisé vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle sur les lignes triphasées, il présentait des qualités de robustesse et de simplicité, que le moteur à collecteur n'avait pas, mais avait pas mal d'inconvénients à cause desquels il a été abandonné. Ce n'est qu'avec le développement de l'électronique de puissance, et des nouvelles techniques de commande, qu'on a utilisé à nouveau le moteur asynchrone mais à cage d'écurie, celui-ci vient remplacer tous les moteurs à collecteur.

## Moteur synchrone autopiloté

Le moteur synchrone autopiloté se caractérise par la possibilité de faire varier la puissance réactive absorbée, ou fournie à l'alimentation. Ajoutant à cela qu'après les premiers instants du démarrage du moteur, l'onduleur fonctionne en commutation naturelle. En traction ferroviaire, les contraintes de masse et de volume ne favorisent pas l'utilisation du moteur synchrone à rotor bobiné pour des puissances nominales inférieures à 1000 [kW] [5], car le dimensionnement du rotor ne varie pas proportionnellement à la puissance du moteur. Il s'avère que ces moteurs équipent seulement des locomotives de grande puissance, et des motrices TGV.

## Moteur synchrone à aimants permanents

Ce type de moteur est utilisé dans certaines applications nécessitant une puissance massique élevée, où les performances exigées sont élevées. On citera l'exemple du AGV d'Alstom qui a battu le record du monde de vitesse le 3 avril 2007, en atteignant une vitesse de 574.8km/h [6], le moteur utilisé développe plus de 800 [kW] pour 768 [kg], comme le montre figure 1.4, soit moins 1 [kg/kW]. Alors qu'au début de la traction électrique, le moteur à courant continu affichait un peu moins de 3 [kg/kW] [2].

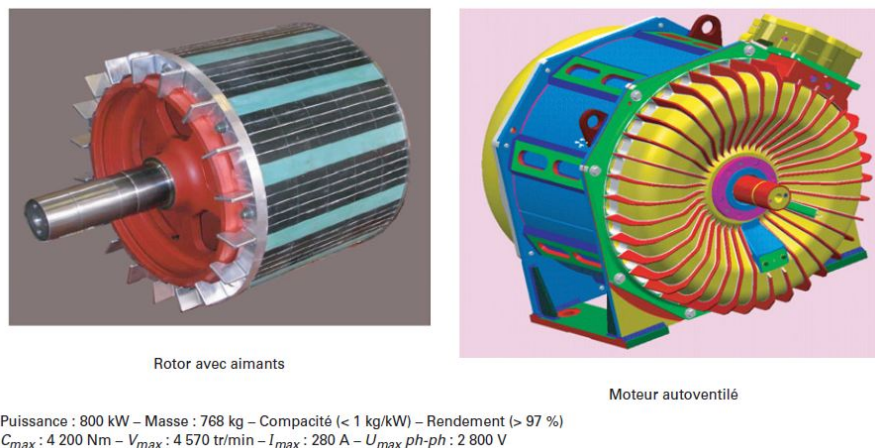


FIGURE 1.4 – Moteur à aimants permanents de l'AGV [2]

### 1.1.3 Types d'exploitation

Compte tenu de la clientèle ferroviaire, trois catégories principales d'exploitation se partagent le trafic [7].

#### Grande ligne

C'est le cas le plus général des liaisons entre centres : villes, ports, centres d'activités. La caractéristique d'une telle exploitation est la variété des circulations, et l'hétérogénéité des vitesses de circulation. On distingue :

- Trains rapides sans arrêt
- Trains inter-villes.
- Trains de Fret.

Il se pose alors le problème des conflits de circulation sur une même voie, entraînant des dépassements avec arrêts, des « creux de trafic », etc. L'organisation de l'exploitation impose de prévoir un graphique des circulations regroupant au mieux les types de trains sous forme de sillons : passagers de jour, fret de nuit, inter-villes en heure de pointe, etc. Le trafic et l'exploitation qui en résulte sur les lignes à grande vitesse se rangent dans cette catégorie, même si la plupart des trains circulent à des vitesses homogènes. En effet, la très forte densité de circulation et la diversité des provenances et destinations la rendent particulièrement délicates (plus de 250 circulations quotidiennes sur la portion nord de la ligne à grande vitesse Paris Sud-Est).

### **Banlieue**

Ce type d'exploitation s'exerce très fréquemment sur des lignes dédiées, excluant tout autre trafic. Le problème à résoudre est celui des heures de pointe, avec les aléas que peuvent engendrer les flux considérables de passagers : difficultés d'entrées et sorties, accidents.

### **Urbain**

C'est le cas des réseaux de métropolitains et de tramways. Les circulations sont parfaitement homogènes en termes de vitesse et de points d'arrêt. Seuls les aléas dûs aux pannes ou aux passagers peuvent générer des situations dégradées. En conséquence, les marges de régularité sont intégrées dans le temps d'arrêt en station, alors que le temps de parcours est en marche tendue.

## **1.2 Contraintes mécaniques**

### **1.2.1 Adhérence**

Elle représente le phénomène physique permettant la transmission d'un effort tangentiel, de traction ou de freinage, juste avant le glissement franc. Elle est définie par le rapport de l'effort tangentiel maximal à la charge supportée par la roue. Elle dépend de [8] :

- L'état des surfaces en contact.
- La variation de la charge sur l'essieu.
- La vitesse.

D'où le sablage des voies par les locomotives afin d'augmenter l'adhérence.

## 1.2.2 Gabarit

Les infrastructures ferroviaires : voies, ouvrages d'art, terminaux, déterminent l'enveloppe géométrique, appelée gabarit. ce dernier impose les dimensions et le volume. Le gabarit électrique intègre par ailleurs les distances d'isolement nécessaire par rapport aux obstacles sur la voie, comme le montre la figure 1.5.

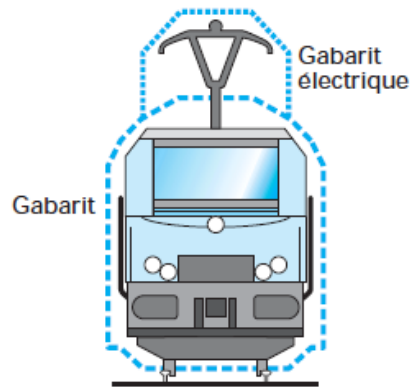


FIGURE 1.5 – Gabarit du tramway [7]

## 1.2.3 Les efforts

Ils représentent les forces subies par le convoi et qui pour la plupart s'opposent au mouvement. Ces forces sont :

- Force due aux frottements : dans les paliers, roue-rail et aérodynamique (n'est pas pris en considération pour une vitesse inférieure à 50 [km/h])
- Force due aux déclivités.
- Force due aux courbures.
- Force d'arrachement.

Ces forces sont empiriques. On détaillera leurs expressions pour le tramway dans le chapitre 3.

## 1.3 Tramway

### 1.3.1 Historique

Le mot Tramway désigne une voie ferrée formée de deux rails parallèles sur lesquels circulent des véhicules à roues en acier, effectuant un service urbain de transport de voyageurs. Puis, par extension, le véhicule de transport à traction électrique circulant sur ces rails, souvent noyés dans la chaussée et guidé par elles.

Né aux États-Unis dans les années 1830, le tramway fut à son origine une hippomobile sur rails. Le premier tramway électrique conçu par W. Siemens date de 1881. Ce domaine se

développe un peu partout dans le monde, mais commence à décliner avec la démocratisation des voitures, Ce qui a amené en 1930 au États-unis à la constitution d'un groupe de travail, qui a aboutie à la création de la motrice PCC [9], qui détient le record absolu du plus grand nombre de tramways, issus d'une même technologie.

Malgré l'amélioration continue du tramway et avec tout ses avantages, il a été abandonné après la 2<sup>eme</sup> guerre mondiale dans plusieurs grandes villes du monde occidental au profit des voitures. Ce n'est qu'après le choc pétrolier et l'apparition des problèmes de pollution, d'énergie et surtout devant la saturation des villes qu'on est revenue à ce moyen de transport, qu'on introduit aujourd'hui dans l'aménagement des moyennes et grandes villes modernes.

### 1.3.2 Poste d'alimentation

Il permet d'alimenter la plupart des tramways avec une tension de 750 [V] continue. On privilégie aujourd'hui la construction de petites sous-stations de 800 à 1000 [kW], espacées entre elles de 2 à 2,5 [km] [10]

Comme le montre la figure 1.6, une sous-stations est constituée de :

- un transformateur principale qui va abaisser la tension de 10, 20 ou 30 [kV] vers 585 V suivant le réseau disponible près du poste, et un 2<sup>eme</sup> transformateur abaisseur qui fournit une tension de sortie 380 [V] afin d'alimenter les auxiliaires.
- Un groupe redresseur de 750 [V] et 1200 [A] continus.
- Dispositifs de protection, cellule d'arrivée...
- Un groupe onduleur dans le cas ou le réseau permet la récupération de l'énergie lors du freinage.

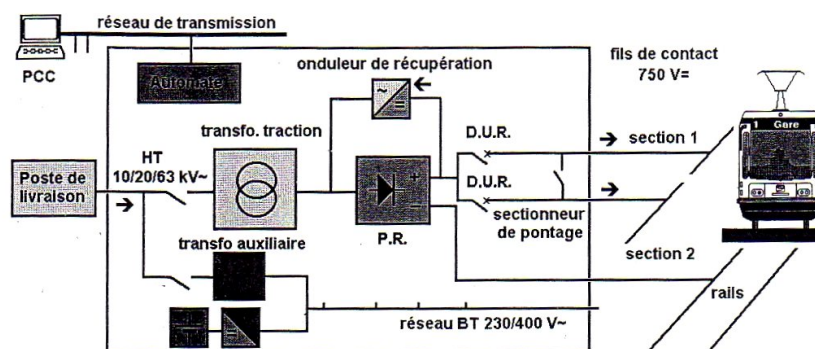


FIGURE 1.6 – Schéma simplifié d'une sous-station

Il existe un autre système, appelé HVDC, qui consiste à transmettre l'énergie en haute tension sous le sol afin d'alimenter des postes de conversion continue-continue (hacheur), qui alimenteront le réseau du tramway. C'est un système multi-convertisseurs, contrairement au système présenté précédemment, qui est un système multi-sources.

### 1.3.3 Transmission de l'énergie vers le tramway

À La sortie des postes, le tramway est alimenté en générale avec une ligne aérienne qui est la technologie la moins chère, la plus simple et la plus fiable. Elle est constituée d'un fil en cuivre électrolytique, dont la section varie entre 102 à 150 [mm<sup>2</sup>]. Ce fil est de forme ovale et comporte dans sa partie supérieure un talon permettant au fil d'être pris dans une pince de suspension (voir figure 1.7).

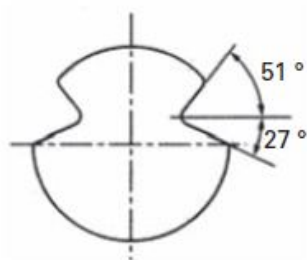
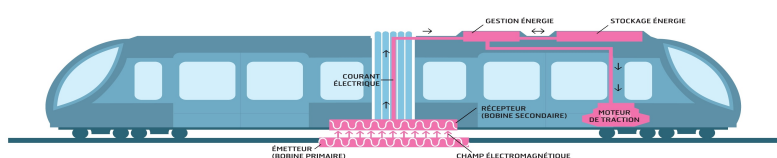
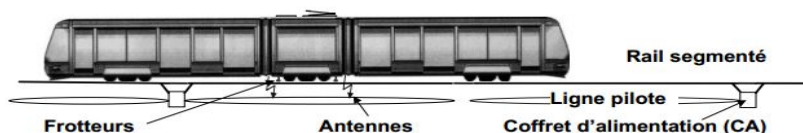


FIGURE 1.7 – Coupe d'un fil trolley en cuivre, section de 150 [mm<sup>2</sup>], pour ligne de tramway [10]

D'autres systèmes de transmission existent par le sol. Le principe consiste à poser dans l'axe de la voie une suite de sections isolées électriquement entre elles et par rapport au sol. Quand le tramway couvre une section donnée, elle sera alimentée et donc alimentera le tramway, soit par des frotteur, comme le montre la figure 1.8b, soit par effet inductif, comme le montre la figure 1.8a. Ce système de transmission est utilisé dans certains partie du trajet où l'utilisation des câbles aériens n'est pas possible.



(a) Par effet inductif



(b) Par frotteur

FIGURE 1.8 – Systèmes d'alimentation par le sol

Certains tramways embarquent aussi des batteries, afin de ne pas utiliser un système d'alimentation par le sol, mais aussi pour stocker de l'énergie lors du freinage. Ceci permet de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le rendement de l'installation.

### 1.3.4 Équipements de traction

Jusqu'au début des années 1990, le moteur à courant continu à excitation série était la machine de traction par excellence, en plus de sa commande qui était facile, sa caractéristique effort-vitesse le rendait favorable pour la traction électrique. Mais avait comme inconvénients son poids et le coût de l'entretien élevé dû au collecteur. Il a fallu attendre l'évolution des composants de l'électronique de puissance (la sortie de l'IGBT), ainsi que les nouvelles techniques de commande, pour voir le moteur asynchrone supplanter le moteur à courant continu.

## 1.4 Commande des moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone présente plusieurs type de commandes, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Parmi ces techniques on citera :

- Commande scalaire.
- Commande vectorielle.
- Commande directe du couple.

### 1.4.1 Commande scalaire

Consiste à garder le rapport  $V/f$  constant. Cette technique a été largement utilisée dans l'industrie, car elle se base sur le modèle statique ce qui fait qu'elle est simple à implanter, mais n'est pas adaptée à un fonctionnement dynamique comme la traction.

### 1.4.2 Commande vectorielle

Elle a été introduite par les travaux de Blaschke 1972. Mais il n'a pas pu la réaliser à l'époque, car elle nécessite beaucoup de calculs en temps réel. Il a fallu donc attendre des avancés en micro-électronique pour la réalisée. Cette commande consiste à ramener l'expression du couple de la machine asynchrone à celui de la machine à courant continu en orientant le flux sur l'axe directe. Il existe deux variantes :

#### Commande Directe

La commande vectorielle directe nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase. Le vecteur flux est mesuré directement par des capteurs, dont la réalisation pratique est délicate (précision médiocre, filtrage du signal mesuré, coût élevé, largeur de l'entrefer ...). Ces capteurs sont donc proscrits. On a alors recours à des techniques d'estimation ou d'observation du flux à partir des grandeurs mesurables.

## Commande Indirecte

Dans cette méthode, le flux n'est ni mesuré ni reconstruit. La phase du flux rotorique est estimée à partir d'une relation donnant la vitesse du glissement. En revanche, l'inconvénient de l'estimation indirecte du flux est que sa précision est affectée par la variation de la résistance rotorique due à la variation de la température, ainsi qu'à la saturation dans le régime transitoire. Il apparaît d'emblée que toute erreur relative sur la valeur de la constante de temps rotorique  $T_r$  se répercute directement sur les grandeurs estimées.

### 1.4.3 Commande directe du couple

Elle a été initiée dans la deuxième moitié des années 1980 par Takahashi et Depenbrock comme concurrentielle des méthodes classiques qui sont basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions (MLI), et sur un découplage du flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique. Par opposition, ces deux stratégies de commande (commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple) ont le même objectif, de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, où le courant et le flux sont naturellement découplés et peuvent être commandés indépendamment.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une façon générale la traction électrique et le tramway, sans pour autant entrer dans les détails, car ce sujet reste très vaste et englobe plusieurs domaines du génie électrique et du génie mécanique.



# Chapitre 2

## Commande directe du couple

### Introduction

Dans ce chapitre nous aborderons la commande directe du couple (DTC), nous illustrerons son principe à travers des différentes équations, pour terminer ce chapitre une simulation sur Matlab sera réalisée.

La commande directe du couple est apparue dans la deuxième moitié des années 80 comme concurrentielle des méthodes classiques, basées sur l'alimentation par modulation de largeur d'impulsions MLI et sur le découplage du flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique. Ces dernières sont conçues au début pour des onduleurs à deux niveaux[11].

La commande directe du couple électromagnétique est caractérisée par les avantages suivants[12] :

- Elle ne nécessite pas un capteur mécanique.
- Elle est robuste contre les variations paramétriques de la machine
- Une dynamique plus rapide du couple et du flux

elle représente cependant les inconvénients suivants[12] :

- Une fréquence de commutation variable.
- Les ondulations du couple et du flux électromagnétique autour de la bande d'hystérésis.
- En basse vitesse le flux est difficile à contrôler.

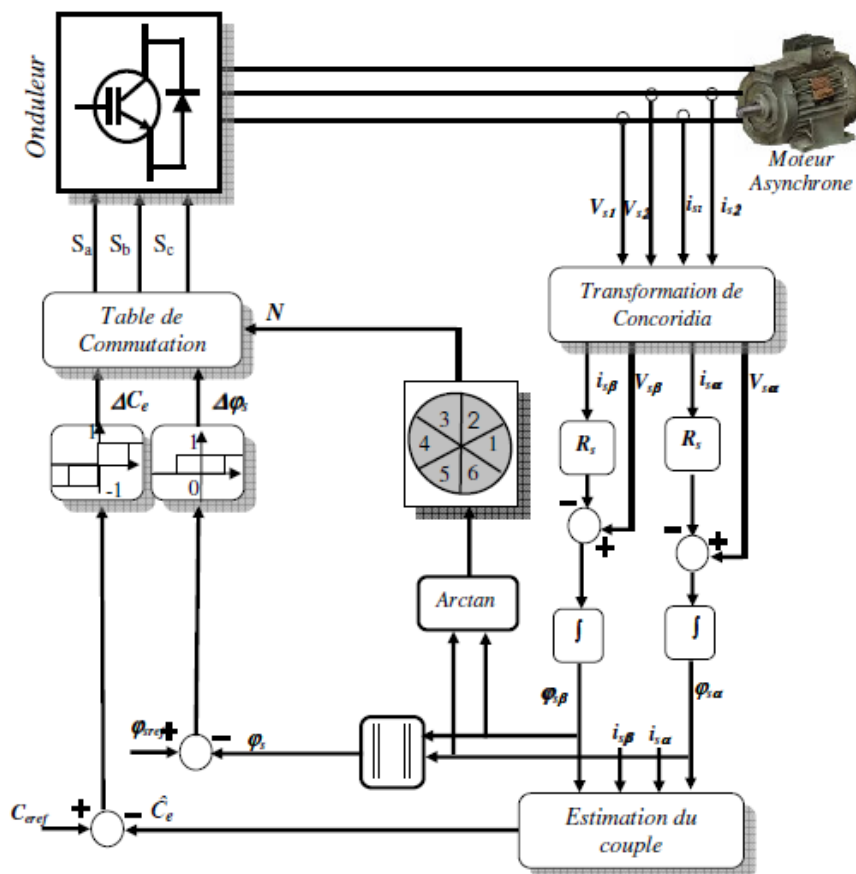


FIGURE 2.1 – Principe de base de la commande directe du couple

## 2.1 Principe de la commande directe du couple

Le principe, illustré par les figures 2.2 et 2.1, consiste à imposer un vecteur de tension à l'onduleur suivant la région du flux statorique et les états des comparateurs à hystérésis, du flux et du couple, dont la fonction est de contrôler l'état du système[12].

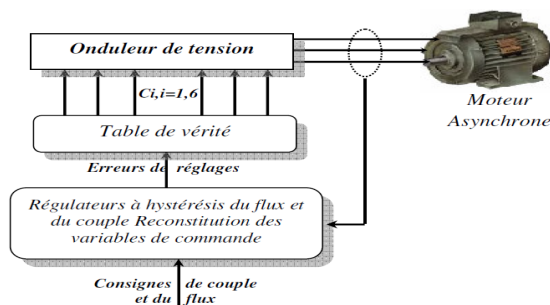


FIGURE 2.2 – Principe de la DTC

### 2.1.1 Contrôle du flux statorique

Si on se place dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  lié au stator le flux statorique s'écrit de la façon suivante :

$$\phi_s = \int_0^t V_s - R_s I_s dt \quad (2.1)$$

La figure 2.3b montre que l'application du vecteur  $V_3$  dans un secteur précis permet d'agir sur l'amplitude du flux et du couple : la composante radiale agit sur le module du flux et la composante tangentielle agit sur la position du flux. En sélectionnant pas à pas le vecteur approprié, on peut imposer une trajectoire au flux statorique. Cette dernière offre une bonne dynamique à la machine[12].

Pour réaliser cette fonction, on peut utiliser un comparateur à hystérésis comme le montre la figure 2.3a

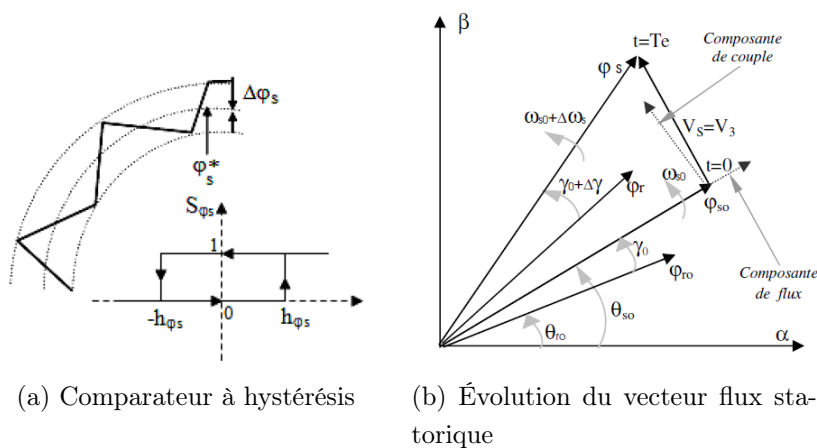


FIGURE 2.3 – Comparateur à hystérésis et évolution du vecteur flux statorique

Et on écrit alors :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{si } \Delta\phi_s > h_{\phi_s} & \Rightarrow S_{\phi_s} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s \leq h_{\phi_s} \text{ et } \Delta\dot{\phi}_s > 0 & \Rightarrow S_{\phi_s} = 0 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s \leq h_{\phi_s} \text{ et } \Delta\dot{\phi}_s < 0 & \Rightarrow S_{\phi_s} = 1 \\ \text{si } \Delta\phi_s < -h_{\phi_s} & \Rightarrow S_{\phi_s} = 0 \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Le comparateur génère deux sorties<sup>1</sup> :

- $S_{\phi_s} = 1$  : si l'amplitude du flux statorique doit augmenter.
- $S_{\phi_s} = 0$  : si l'amplitude du flux statorique doit diminuer.

1. Il faut noter que le vecteur du flux statorique doit tourner, donc il doit suivre une couronne circulaire

### 2.1.2 Contrôle du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique dans un repère lié au stator  $\alpha$ - $\beta$  est la suivante :

$$C_e = \frac{pM}{\sigma L_s L_r} \phi_s \phi_r \sin(\gamma) \quad (2.3)$$

Avec :  $\gamma$  la différence entre les deux angles statorique et rotorique respectivement.

Si on applique un vecteur de tension non nul, actif, et en supposant que le flux statorique suit sa référence, on modifie les positions et les vitesses des flux statorique et rotorique suivant le système d'équations 2.4 [12].

$$\begin{cases} C_e = \frac{pM}{\sigma L_s L_r} \phi_s^* \phi_r \sin(\gamma) \\ \overline{\phi}_s(t + \Delta t) = \phi_s^* e^{j(\theta_s + \Delta\theta_s)} \\ \overline{\phi}_r(t + \Delta t) = (\phi_r + \Delta\phi_r) e^{j(\theta_r + \Delta\theta_r)} \\ \Delta\theta_s = (\omega_s + \Delta\omega_s)\Delta t \end{cases} \quad (2.4)$$

Avec  $\Delta\omega_s$  est la variation de la vitesse du vecteur de flux statorique.

L'évolution du flux rotorique est lente par rapport à celle du flux statorique[12], on aura alors :

$$\begin{cases} \Delta\phi_s \approx 0 \\ \Delta\phi_r \approx 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Donc le couple électromagnétique devient à l'instant  $(t + \Delta t)$  :

$$C_e = \frac{pM}{\sigma L_s L_r} \phi_s^* \phi_r \sin(\gamma + \Delta\gamma) \quad (2.6)$$

On peut donc conclure que le contrôle du couple électromagnétique dépend du contrôle de la rotation du flux statorique[12]. En utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux<sup>2</sup>, on peut corriger le couple électromagnétique, ce comparateur donne deux sorties  $S_{C_e} = 1$  pour augmenter le couple et  $S_{C_e} = -1$  pour le diminuer, il est modélisé par le système d'équations 2.7 et représenté par la figure 2.4

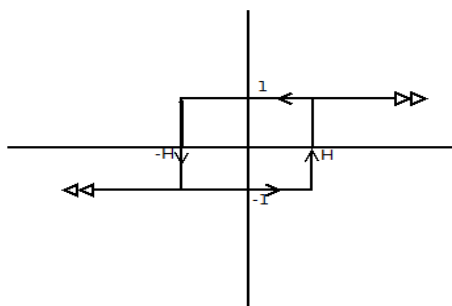


FIGURE 2.4 – Comparateur à hystérésis à deux niveaux contrôlant le couple

2. un comparateur à trois niveaux sera utilisé dans la partie amélioration de la commande directe du couple

$$\begin{cases} \Delta C_e > h_c \Rightarrow S_{C_e} = 1 \\ \Delta C_e < -h_c \Rightarrow S_{C_e} = -1 \end{cases} \quad (2.7)$$

### 2.1.3 Détermination de la région et estimation du couple et du flux statorique

#### Détermination de la région et estimation du flux statorique

À partir des composantes biphasées  $V_{s\alpha-\beta}$  et  $I_{s\alpha-\beta}$  on peut estimer le module et la région du flux statorique :

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha} = \int_0^t V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} dt \\ \phi_{s\beta} = \int_0^t V_{s\beta} - R_s I_{s\beta} dt \\ \phi_s = \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \end{cases} \quad (2.8)$$

les tensions biphasées  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$  sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux tensions triphasées  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$ .

Les courants biphasés  $I_{s\alpha}$  et  $I_{s\beta}$  sont obtenus par l'application de la transformation de Concordia aux courants triphasés  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ .

À partir des deux composantes  $\phi_{s\alpha}$  et  $\phi_{s\beta}$  on peut déterminer la région du flux statorique, donc l'angle, suivant le tableau 2.1 :

Conditions		$\theta_s$
$\phi_{s\alpha} > 0$	$\phi_{s\beta} > 0$	$\arctan\left(\frac{\phi_{s\alpha}}{\phi_{s\beta}}\right)$
$\phi_{s\alpha} > 0$	$\phi_{s\beta} < 0$	$\arctan\left(\frac{\phi_{s\alpha}}{\phi_{s\beta}}\right) + 2\pi$
$\phi_{s\alpha} < 0$		$\arctan\left(\frac{\phi_{s\alpha}}{\phi_{s\beta}}\right) + \pi$
$\phi_{s\alpha} = 0$	$\phi_{s\beta} \leq 0$	$\frac{3\pi}{2}$
$\phi_{s\alpha} = 0$	$\phi_{s\beta} \geq 0$	$\frac{\pi}{2}$

TABLE 2.1 – Position du vecteur flux statorique

#### Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir des courants mesurés et du flux statorique estimé suivant la relation 2.9

$$C_e = p(\phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (2.9)$$

### 2.1.4 Réglage du flux statorique et du couple électromagnétique

Pour notre cas, nous ne traiterons que la commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux, nous n'appliquerons donc que des vecteurs actifs sur notre machine<sup>3</sup>.

Après avoir estimé le module du flux statorique et déterminé sa région, il faut connaître le vecteur approprié à appliquer c'est à dire la table de commutation.

Suivant la figure 2.5 le choix du vecteur peut soit augmenter le flux ou le diminuer.

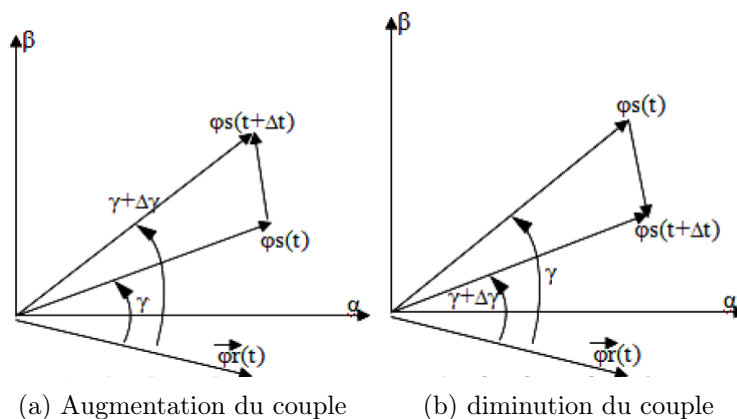
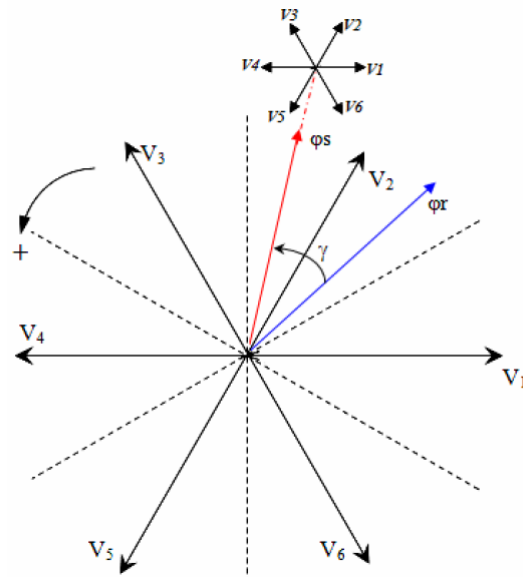


FIGURE 2.5 – Évolution du couple électromagnétique en fonction du vecteur appliqué

On remarque que dans la figure 2.5a l'application d'un certain vecteur dans une certaine région conduit à l'augmentation de l'angle  $\gamma$ . Cette dernière action provoque l'augmentation du couple électromagnétique. De même, la figure 2.5b montre que l'application d'un autre vecteur de tension dans la même région conduit à la diminution de l'angle  $\gamma$  donc la diminution du couple électromagnétique.

On donnera un exemple à partir de la figure 2.6 pour mieux expliquer le principe.

3. Pour la DTC à trois niveaux l'application du vecteur tension nul 111 ou 000 est nécessaire

FIGURE 2.6 – Découpage du plan  $\alpha$ - $\beta$  en six secteurs

Supposons, à titre d'exemple, que le vecteur flux statorique se trouve dans le secteur angulaire  $\theta(2)$  : son angle est compris entre  $30^\circ$  et  $90^\circ$ . D'après les règles de comportement du vecteur flux statorique, l'application des vecteurs tension  $V_1, V_2$  et  $V_3$  contribue à son augmentation, tandis que les vecteurs  $V_4, V_5$  et  $V_6$  contribuent à sa diminution [12].

D'autre part, d'après les règles de comportement du couple,  $V_3$  et  $V_4$  amènent à son augmentation tandis que  $V_1$  et  $V_6$  contribuent à sa diminution, les vecteurs  $V_2$  et  $V_5$  engendrent une faible variation [12].

Donc si on veut par exemple augmenter le flux et le couple électromagnétique, le vecteur  $V_3$  est le seul à pouvoir le faire. Si on veut par contre diminuer le couple tout en augmentant le flux, le vecteur  $V_1$  doit être appliqué.

D'une manière générale, si on se trouve dans le secteur  $k$  :

- pour augmenter l'amplitude du flux statorique on peut appliquer  $V_k, V_{k+1}$  ou  $V_{k-1}$
- pour diminuer l'amplitude du flux statorique on peut appliquer  $V_{k+3}, V_{k+2}$  ou  $V_{k-2}$

La table 2.2 représente les configurations possibles des interrupteurs selon la position du flux statorique et les sorties obtenues par les deux comparateurs à hystérésis.

$\Delta\phi_s$	$\Delta C_e$	Région					
		1	2	3	4	5	6
1	1	$V_2$ 1,1,0	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1	$V_5$ 0,0,1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0
	-1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0	$V_2$ 1,1,0	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1	$V_5$ 0,0,1
0	1	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1	$V_5$ 0,0,1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0	$V_2$ 1,1,0
	-1	$V_5$ 0,0,1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0	$V_2$ 1,1,0	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1

TABLE 2.2 – Table de commutation de la commande directe du couple

## 2.2 Simulation sur MATLAB

L'interface Simulink de MATLAB est un outil puissant permettant de simuler la commande directe du couple d'une machine asynchrone<sup>4</sup>, les valeurs de référence sont données dans le tableau 4.2.

Temps [s]	0 - 0.5	0.5 - 1
$H_{C_e}$ [Nm]	$0.3 \simeq 1.5\% C_n$	
$H_{\phi_s}$ [Wb]	$0.02 \simeq 3\% \phi_n$	
$C_{ref}$ [Nm]	20	5
$\phi_{ref}$ [Wb]	0.7	

TABLE 2.3 – Valeurs imposées dans la simulation

---

4. la simulation a été faite en utilisant les paramètres de la machine 1



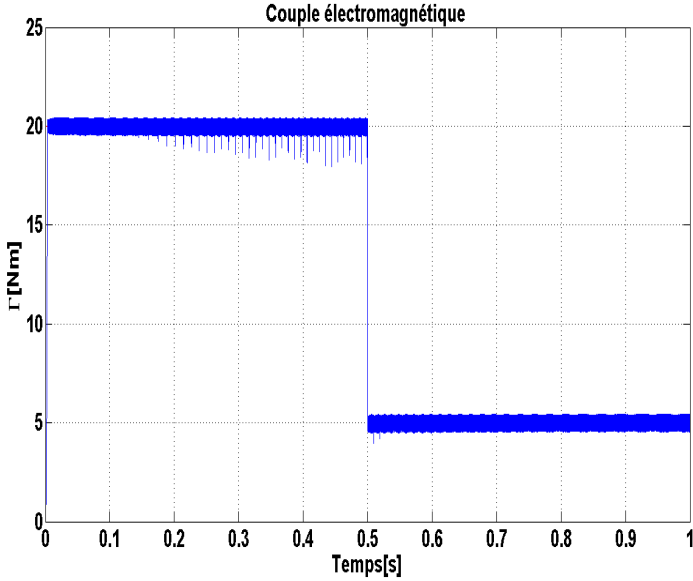


FIGURE 2.7 – Couple électromagnétique

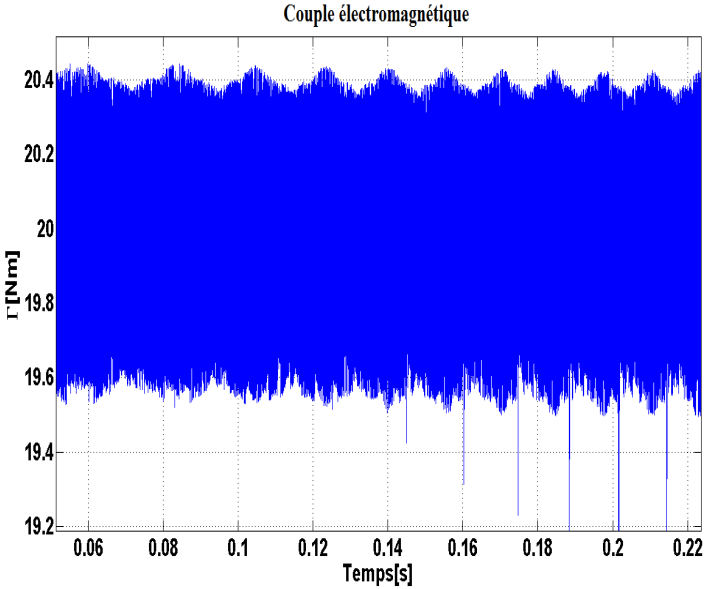


FIGURE 2.8 – Loupe sur le couple électromagnétique

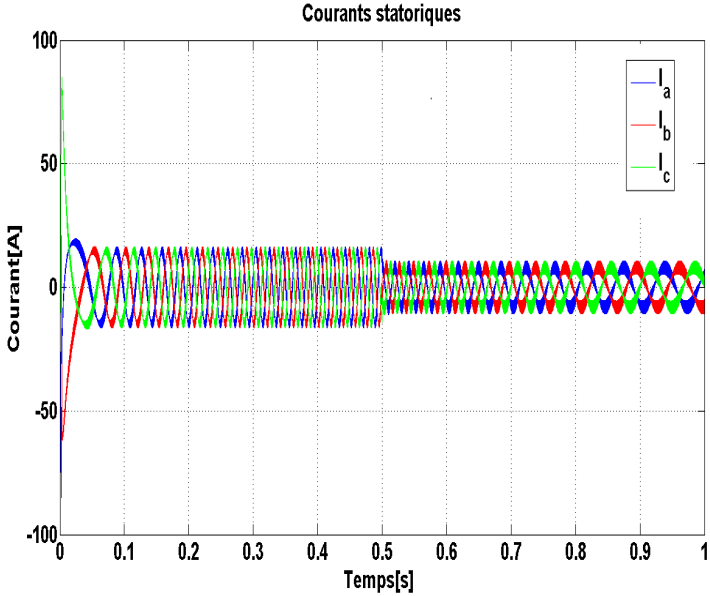


FIGURE 2.9 – Courants statoriques

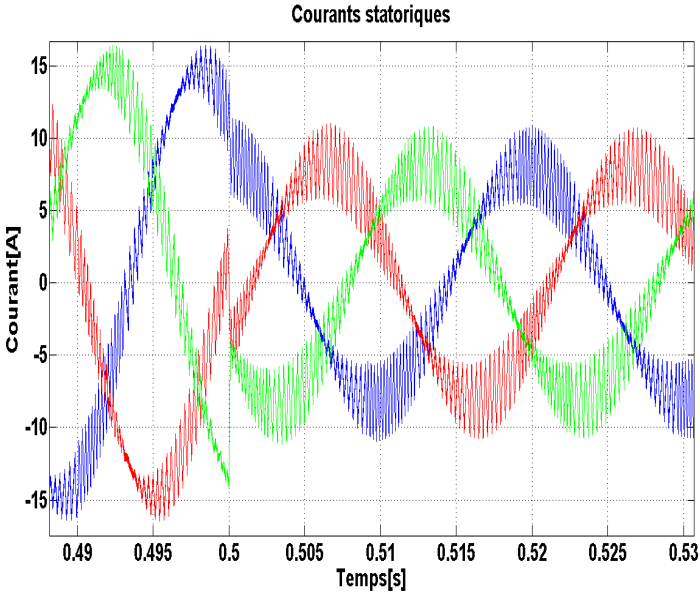


FIGURE 2.10 – Loupe sur les courants statoriques

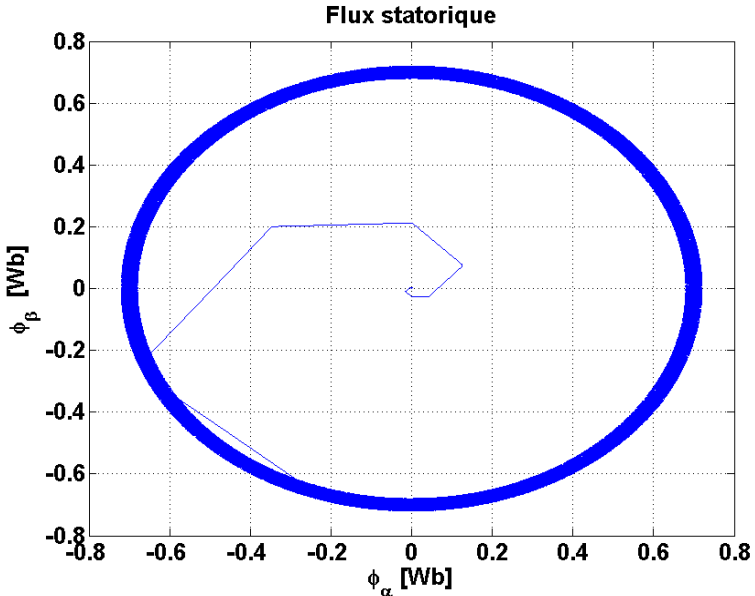


FIGURE 2.11 – Flux statorique

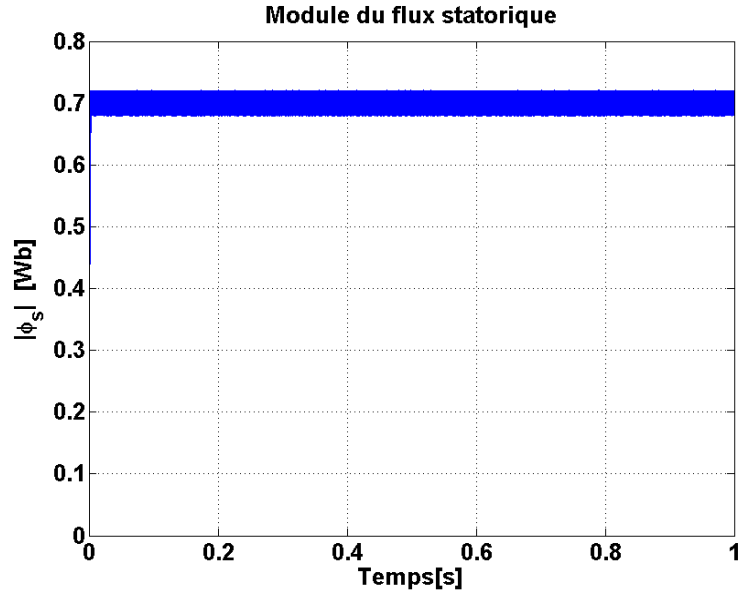


FIGURE 2.12 – Module du flux statorique

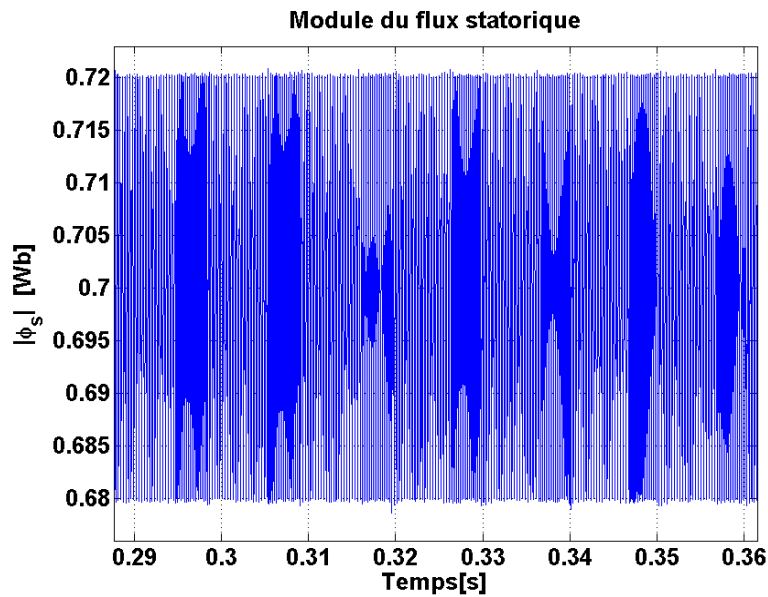
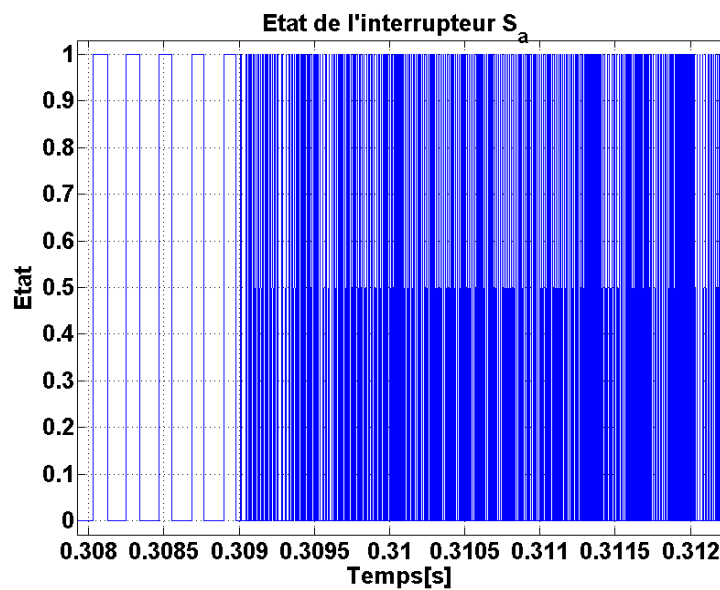


FIGURE 2.13 – Loupe sur module du flux statorique

FIGURE 2.14 – Loupe sur l'état de l'interrupteur  $S_a$ 

### 2.2.1 Interprétation des résultats

D'après les figures 2.7 et 2.8, nous remarquons que le couple électromagnétique suit sa référence plus ou moins la valeur injectée dans le comparateur à hystérésis<sup>5</sup>.

De la figure 2.9, nous remarquons que les courants statoriques ont une allure sinusoïdale bruitée. La diminution de l'amplitude du courant observée dans la figure 2.10 au moment

5. Les pics au delà de la valeur injectée dans le comparateur à hystérésis sont dûs aux moments de comparaison du couple avec sa valeur référence qui sont synchronisés avec la période d'échantillonnage qui représente dans notre cas le pas de simulation

$t=0.5\text{sec}$  est justifiée par la diminution du couple référence.

D'après les figures 2.11 , 2.12 et 2.13, nous remarquons que le flux statorique a une trajectoire circulaire et suit sa référence plus ou moins la valeur injectée dans le comparateur à hystérésis. De la figure 2.14, nous remarquons que la fréquence de commutation de l'interrupteur  $S_a$ <sup>6</sup> est variable et élevée, cette dernière a une valeur moyenne de l'ordre de 100kHz.

## 2.3 Influence des bandes d'hystérésis sur la fréquence de commutation

Pour voir l'influence des largeurs des bandes d'hystérésis, nous allons réaliser des simulations avec des différentes valeurs de largeurs de bandes pour les comparateurs à hystérésis contrôlant le couple et le flux.

Le tableau 4.3 récapitule les résultats obtenus pour des différentes simulations

$H_{C_e}$ [Nm]	$H\phi$ [Wb]	Fréquence de commutation [kHz]
0.3	0.02	100
	0.04	100
	0.06	100
0.6	0.02	60
	0.04	58
	0.06	57
0.9	0.02	42
	0.04	40
	0.06	39

TABLE 2.4 – Influences des largeurs des bandes d'hystérésis sur la fréquence de commutation

Nous remarquons que la largeur de la bande du comparateur à hystérésis contrôlant le couple influe largement sur la fréquence de commutation.

L'augmentation de la largeur de la bande du comparateur à d'hystérésis contrôlant le couple engendre une large diminution de la fréquence de commutation. Pour une augmentation de la largeur de 100% on obtient une diminution de la fréquence de commutation de l'ordre de 40%. Or l'augmentation de la largeur de la bande du comparateur à d'hystérésis contrôlant le flux engendre une diminution négligeable de la fréquence de commutation. Pour une augmentation de la largeur de 100% on obtient une diminution de la fréquence de commutation de l'ordre de 5%.

6.  $S_a$  est l'interrupteur de la partie supérieure du bras<sub>a</sub> alimentant la phase<sub>a</sub>

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu le principe de la commande directe du couple d'une machine asynchrone qui donne une bonne dynamique du couple électromagnétique et qui ne nécessite aucun capteur de position ou de vitesse. Les grandeurs étant estimées à partir des courants et des tensions biphasés.

Dans cette partie, nous avons considéré des interrupteurs idéaux et des paramètres fixes de la machine ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Un des points négatifs dans cette commande est la fréquence de commutation variable et relativement grande de 30kHz à 100kHz. Elle dépend énormément de la largeur de bande du comparateur à hystérésis du couple.

Dans cette partie nous n'avons appliqué que des vecteurs actifs sur la machine, vecteurs non nuls, ce qui justifie la fréquence élevée de commutation. Pour la diminuer, une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux du couple électromagnétique sera étudiée dans le chapitre 4. Cette dernière permettra la diminution de la fréquence de commutation car il y aura des périodes où les interrupteurs seront mis hors service.

# Chapitre 3

## Application au tramway d'Alger

### Introduction

Lors du dernier chapitre nous avons présentée et simulé la commande directe du couple sur une petite machine. de plus, nous avons exposé ses avantages. Ces derniers nous ont poussé à l'appliquer dans ce chapitre pour la commande du tramway. Mais avant, nous commencerons par présenter le tramway d'Alger, et son système d'alimentation ainsi que les équations mécaniques nécessaires lors de l'application.

### 3.1 Présentation du tramway d'Alger

Le tramway d'Alger est un système de transport en commun desservant l'agglomération d'Alger depuis l'année 2012. Il comprend actuellement une ligne de 16,2 km et 28 stations, allant de Bordj el Kiffan jusqu'à la station multimodale des fustillés et offrant ainsi une interconnexion avec les autres moyens de transport (métro, bus, taxi, téléphérique).

#### 3.1.1 Présentation du réseau d'alimentation

Le réseau du tramway d'Alger est alimenté en énergie électrique à partir du réseau haute tension 10[kV] alternatif de SONELGAZ. L'ensemble du système d'alimentation est conçu pour que les tramways continuent à fonctionner même avec une sous-station hors service, c'est-à-dire en régime dégradé. Ce réseau contient onze sous-stations réparties et espacées entre elles par des distances bien déterminées. Cette répartition est commandée par l'obligation de fournir aux rames la puissance demandée avec des chutes de tension acceptables. Les sous-stations sont alimentées en 10 [kV] car elle sont implantées dans des régions desservies par le réseau 10[kV] de SONELGAZ. L'alimentation des rames est assurée à partir des groupes redresseurs.

Comme le montre la figure 3.1, le circuit électrique qui relie les rames aux groupes redresseurs est formé par :

- La ligne aérienne pour la liaison positive.
- Les rails pour la liaison de retour.

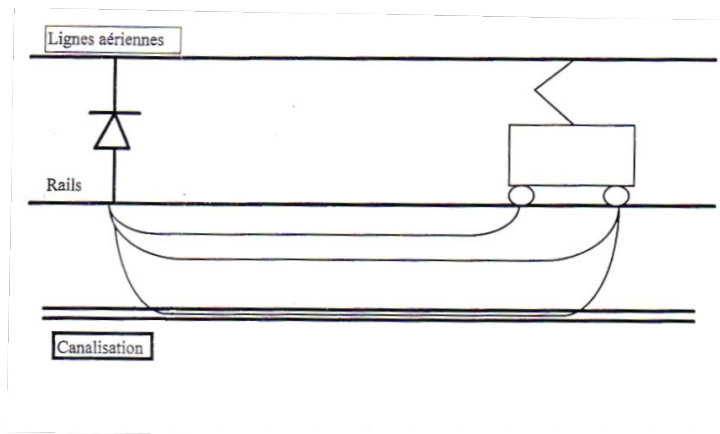


FIGURE 3.1 – Schéma de principe de la circulation entre les sous stations et les rames

### 3.1.2 Présentation du matériel roulant

La ligne d'Alger est desservie par un tramway Citadis 402 construit par Alstom. Ce tramway est de type à plancher bas intégral, ce qui assure la pleine accessibilité aux personnes à mobilité réduite.

Comme le montre la figure 3.2, le tramway d'Alger comporte les modules suivants :

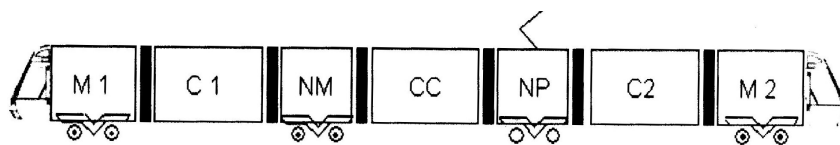


FIGURE 3.2 – Schéma du Citadis 402

- Deux cabines motrices (M1 et M2)
- Une nacelle porteuse (NP)
- Une nacelle motorisée (NM)
- Trois caisses suspendues (C1, C2 et CC)

Le tramway repose sur 4 bogies (M1, M2, NP et NM), où chaque bogie représente un chariot situé sous un véhicule ferroviaire sur lequel sont fixés deux essieux. Il est mobile par rapport au châssis, ce qui lui permet de s'orienter convenablement dans les courbes.

Comme le montre la figure 3.3, les bogies sous les caisses (M1, NM et M2) sont motorisés, chacun d'eux est équipé de deux moteurs asynchrones à cage d'écureuil dont la puissance nominale est de 120 [kW]. Leur rôle est de fournir l'effort de traction, alors que le bogie NP, fournis le tramway en énergie électrique grâce au pantographe.



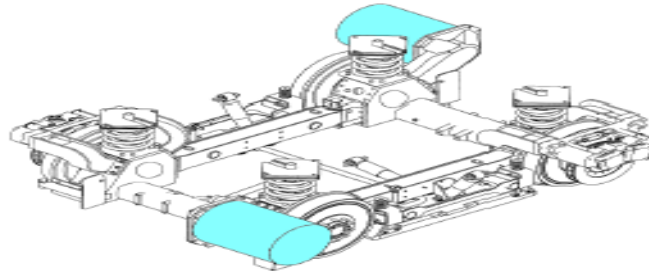


FIGURE 3.3 – Schéma représentant la bogie ARPEGE [13]

Les moteurs de chaque bogie sont alimentés et commandés à partir d'un onduleur à trois bras, comme le montre la figure 3.4, dont les interrupteurs sont à base d'IGBT, c'est un transistor bipolaire à porte isolée, associant les avantages des transistors bipolaires comme : la tensions et les courants de fonctionnement relativement élevés, et ceux des transistors MOSFET comme : la rapidité des commutations et une faible énergie de commande.

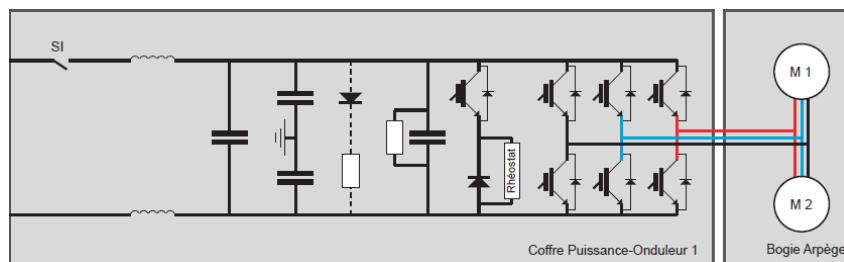


FIGURE 3.4 – Schéma Onduleur tramway

## 3.2 Partie mécanique

### 3.2.1 Effort de résistance à l'avancement

Pour s'approcher plus de la réalité, nous donnerons dans cette partie des équations empiriques des forces qui s'opposent au mouvement du tramway [3].

La force résistante est calculée à partir de la somme des quatre forces suivantes :

- Force de frottement
- Force d'arrachement
- Force due aux déclivités
- Force due aux courbures

$$F_{res} = F_f + F_a + F_d + F_c \quad (3.1)$$

### Force de frottement

Elle a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont abouti à des formules empiriques. Nous prendrons celle de Strahl [3] :

$$F_f = (2.5 + (k_t(V_t + V_v)^2) 10^{-3})Mg 10^{-3}[N] \quad (3.2)$$

Avec :

- $k_t = 4.2[s^2/m^2]$  coefficient qui tient compte du type de train.
- $V_v$  vitesse de vent que nous prendrons égale à 4(m/s).

Une autre formule empirique peut être utilisée [13] :

$$F_f = A + BV_t + CV_t^2 \quad (3.3)$$

Avec :

- A : force représentant les frottements secs
- B : coefficient qui prend en considération l'état de surface de la voie
- C : coefficient représentant les frottements aérodynamiques

Pour le Citadis 402 les coefficients A, B et C sont donnés dans le tableau 3.1 [13]

A	B	C
1552	40.32	8.0248

TABLE 3.1 – Coefficients de la force de frottement

### Force d'arrachement

Elle n'apparaît qu'aux très basses vitesses. Nous supposons qu'elle va décroître d'une façon linéaire avant de s'annuler pour une vitesse de 1 m/s.

$$\begin{cases} F_a = 7.5 * 10^{-3} Mg[N] \\ M = M_{vide} + M_p \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec :

- $M_{vide} = 54967[kg]$
- $M_p = N_{Personnes} * 70[kg]$

On estime que le poids moyen de chaque passager est égal à 70 [kg].

### Force due aux déclivités

Elle représente la force tangentielle à la voie

$$F_d = Mgsin(\alpha)[N] \quad (3.5)$$

Avec

- $\alpha$  : Représente l'angle d'inclinaison de la pente, défini positif lorsque le train gravit la ligne et négatif lorsqu'il la descend.

### Force due aux courbures

Elle dépend du rayon de courbure et de l'écartement de la voie.

$$F_c = \frac{k_e}{r_v} 10^{-3} Mg [N] \quad (3.6)$$

Avec

- $k_e$  : Représente le coefficient d'écartement, il est égal à 80 [m] pour un écartement de 1435 [mm] [13]

### 3.2.2 Correction de l'inertie

Dans cette section, nous allons corriger le moment d'inertie appliqué au moteur. On considère le réducteur de la figure 3.5 constitué de deux parties. La première en bleu représente la partie rapide, qui est accouplée au moteur et une deuxième partie en rouge, qui représente la partie lente connectée à la roue.

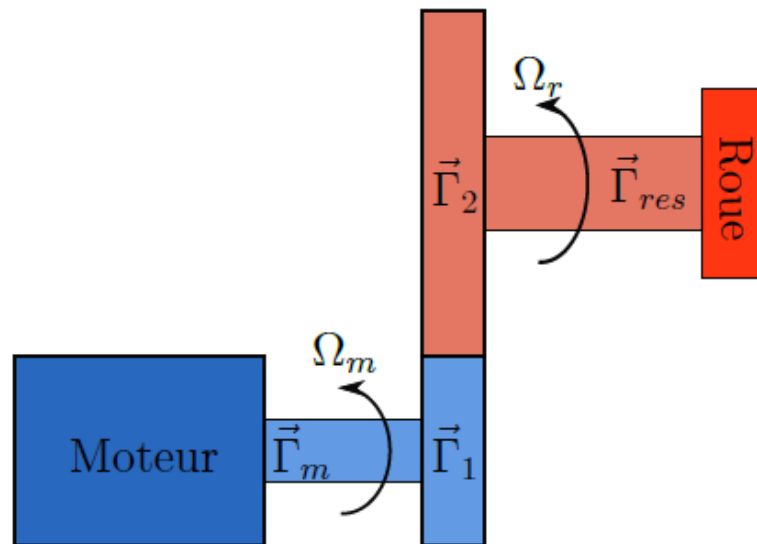


FIGURE 3.5 – Schéma simplifié d'un réducteur de vitesse [13]

Nous avons les équations suivantes, qui décrivent la transmission d'effort à travers le réducteur :

$$\begin{cases} \Omega_1 = \Omega_2 k_g \\ \Gamma_1 = \Gamma_2 \frac{\eta_g}{k_g} \\ J_1 \dot{\Omega}_1 = \Gamma_1 \\ J_2 \dot{\Omega}_2 = \Gamma_2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Avec

- $\Omega_1$  Vitesse de la partie rapide.
- $\Gamma_1$  Couple de la partie rapide.

- $J_1$  Moment d'inertie vu par la partie rapide.
- $\Omega_2$  Vitesse de la partie lente.
- $\Gamma_1$  Couple de la partie lente.
- $J_1$  Moment d'inertie vu par la partie lente.

On peut écrire aussi :

$$J_1 = \frac{\Gamma_1}{\dot{\Omega}_1} = \frac{\Gamma_1 k_g}{\dot{\Omega}_2} = \frac{\Gamma_2 k_g^2}{\eta_g \dot{\Omega}_2} = J_2 \frac{k_g^2}{\eta_g} \quad (3.8)$$

Nous retiendrons donc le résultat suivant, pour passé de la partie rapide à la partie lente :

$$J_1 = J_2 \frac{k_g^2}{\eta_g} \quad (3.9)$$

Sachant que le tramway d'Alger qui est un Citadis 402 est constitué de 8 essieux, dont 6 motorisés et connaissant la masse d'inertie, nous appliquerons l'équation trouvée plus haut 3.9 pour ramener le moment d'inertie du moteur au niveau de la roue, afin de calculer le moment d'inertie de l'essieu.

Nous avons :

$$8J_r + 6 \frac{\eta_g J_m}{k_g^2} = M_i r^2 \quad (3.10)$$

Avec :

- $M_i=4000$  [kg] Masse d'inertie totale.
- $r=0.28$  [m] Rayon de la roue mi-usée.
- $k_g = 1/6.88$  rapport de réduction.
- $\eta_g = 0.96$  rendement du réducteur.

Après calcul nous trouvons au niveau la roue que :

$$J_r = 20.78[kg.m^2] \quad (3.11)$$

Et donc

$$J_m + J_r = 45.33[kg.m^2] \quad (3.12)$$

En ramenant cette valeur au niveau du moteur, nous aurons le moment d'inertie corrigé, que nous appliquerons par la suite lors des simulations :

$$J_c = 0.95[kg.m^2] \quad (3.13)$$

## 3.3 Partie électrique

### 3.3.1 Choix de la commande

Nous avons choisi la commande directe du couple pour contrôler la vitesse des moteurs de traction, elle représente plusieurs avantages, elle ne nécessite aucun capteur mécanique et ne dépend pas des variations des paramètres du rotor.

### 3.3.2 Choix du régulateur de vitesse

Dans notre cas nous utiliserons un régulateur de type PI, nous supposons que le retard imposé par les interrupteurs est nul, leurs fonction de transfert est donc unitaire.

Un régulateur de type PI est modélisé par sa fonction de transfert :

$$F_{reg}(s) = \frac{k_i s + 1}{s} k_p \quad (3.14)$$

Le régulateur a pour entrée l'erreur de vitesse<sup>1</sup> et pour sortie le couple de référence, comme le montre la figure 3.6. Il faut donc chercher la fonction de transfert entre la vitesse de rotation et le couple électromagnétique. On écrit :

$$\frac{C_e - C_r}{Js + f} = \Omega \quad (3.15)$$

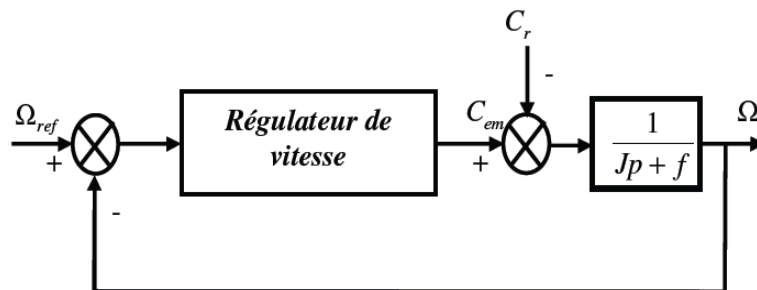


FIGURE 3.6 – Schéma de régulation

Le couple résistant est une perturbation dans ce système, qu'on va supposer nul pour déterminer les paramètres du régulateur en boucle fermée. On écrit alors :

$$F_{tbf} = \frac{\left(\frac{k_i s + 1}{s} k_p\right) \left(\frac{1}{Js + f}\right)}{1 + \left(\frac{k_i s + 1}{s} k_p\right) \left(\frac{1}{Js + f}\right)} \quad (3.16)$$

Un système du deuxième ordre fortement amorti offre une réponse rapide et stable et on choisit :

- Pour les moteurs de traction :
  - $k_i = J \frac{30}{f}$
  - $k_p = 2 \frac{k_i}{10^6}$
- Pour la machine de simulation :
  - $k_i = J \frac{30}{f}$
  - $k_p = \frac{k_i}{2000}$

1. C'est la différence entre la vitesse de référence et la vitesse réelle du moteur

La figure 3.7 représente la réponse indicielle du système de régulation <sup>2</sup>

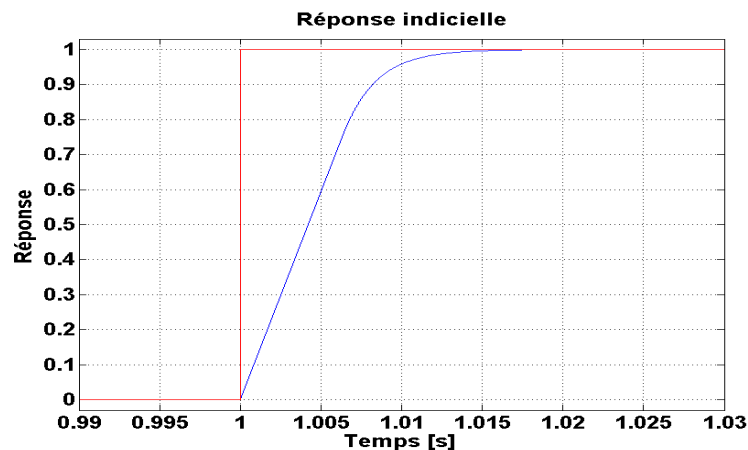


FIGURE 3.7 – Réponse indicielle du système de régulation

De la figure 3.7 on remarque que la réponse à un échelon est rapide, stable et sans aucun dépassement.

### 3.3.3 Filtre d'entrée

Le rôle du filtre d'entrée est d'atténuer les harmoniques envoyés par l'onduleur vers le bus continu, une inductance mise en série permet de lisser le courant absorbé par l'onduleur et une capacité mise en parallèle permet de limiter les ondulations de la tension d'alimentation. La fréquence de coupure de ce filtre est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = F_{coupure} \quad (3.17)$$

Nous avons choisit une fréquence de coupure de l'ordre de 15Hz, une capacité de 10mF et une inductance de 10mH.

### 3.3.4 Bloc de defluxage

Le bloc de defluxage permet de donner le flux de référence suivant la vitesse de rotation du moteur, en cas de survitesse le flux de référence doit diminuer, par rapport au flux max de la machine, qui va limiter le couple max de la machine donc on aura un fonctionnement à puissance constante.

Si la valeur absolue de la vitesse de rotation du moteur est inférieure à la vitesse nominale le flux de référence est égale au flux max ce qui permet d'obtenir un couple nominal pour avoir des meilleurs dynamiques. Le bloc de defluxage est modélisé par le système

2. la simulation a été faite pour un  $J=0.95$  et  $f=0.005$  ;

d'équations suivant et représenté par la figure 3.8

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } |\Omega| \geq \Omega_{nominale} \\ \quad \phi_{référence} = \frac{\Omega_{nominale}}{\Omega} \phi_{max} \\ \text{Si } non \\ \quad \phi_{référence} = \phi_{max} \end{array} \right. \quad (3.18)$$

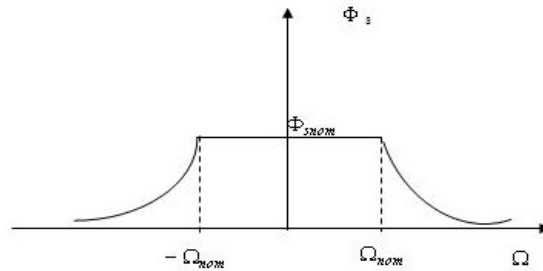


FIGURE 3.8 – Bloc de defluxage

### 3.4 Limitation de la tension du bus continu

Pour borner la tension du bus continu, deux limiteurs<sup>3</sup> sont intégrés dans la commande, comme le montre la figure 3.4 :

- Écrêtage par hacheur : le système est constitué d'un hacheur mis en série avec une résistance, il est commandé par la sortie d'un comparateur à hystérésis. Si la tension atteint la valeur supérieure limite, le hacheur est en état de conduction, alors la capacité d'entrée se décharge dans la résistance et la tension du bus continu diminue, en dessous de la valeur inférieure limite le hacheur est en état d'ouverture.
- Écrêtage par diode : le système constitué d'une diode mise en série avec une résistance. Si la tension du bus continu dépasse une autre borne supérieure, la diode se met en conduction, la capacité se décharge maintenant sur deux résistances<sup>4</sup>, ce qui permet une autre limitation de la tension du bus continu.

### 3.5 Application

La vitesse du tramway est imposée par les moteurs de traction, pour arriver à la réguler il faut connaître les variables d'état du système, dans notre cas les tensions et les courants biphasés, il faut donc deux capteurs de tension et deux autres de courant<sup>5</sup>, puis à travers la transformée de Concordia on génère les courants et les tensions biphasés.

3. Les deux limiteurs sont mis en parallèle avec la capacité d'entrée

4. La résistance mise en série avec le hacheur et celle mise en série avec la diode

5. On suppose qu'on a un système triphasé équilibré donc on peut calculer la troisième composante

Connaissant les tensions et les courants biphasés, on peut alors estimer le flux statorique et calculer sa position, en utilisant les composantes biphasées du flux et des courants statoriques on peut générer le couple électromagnétique, puis en passant par l'équation mécanique on peut estimer la vitesse de rotation.

Le couple résistant est estimé à partir de nombre de personne à bord, le rayon de courbure en cas de virage, l'angle de la pente et la vitesse de rotation.

Le couple de référence est imposé par le régulateur de vitesse et le flux de référence est calculé par la fonction de defluxage.

La figure 3.9 représente la structure globale de la commande.

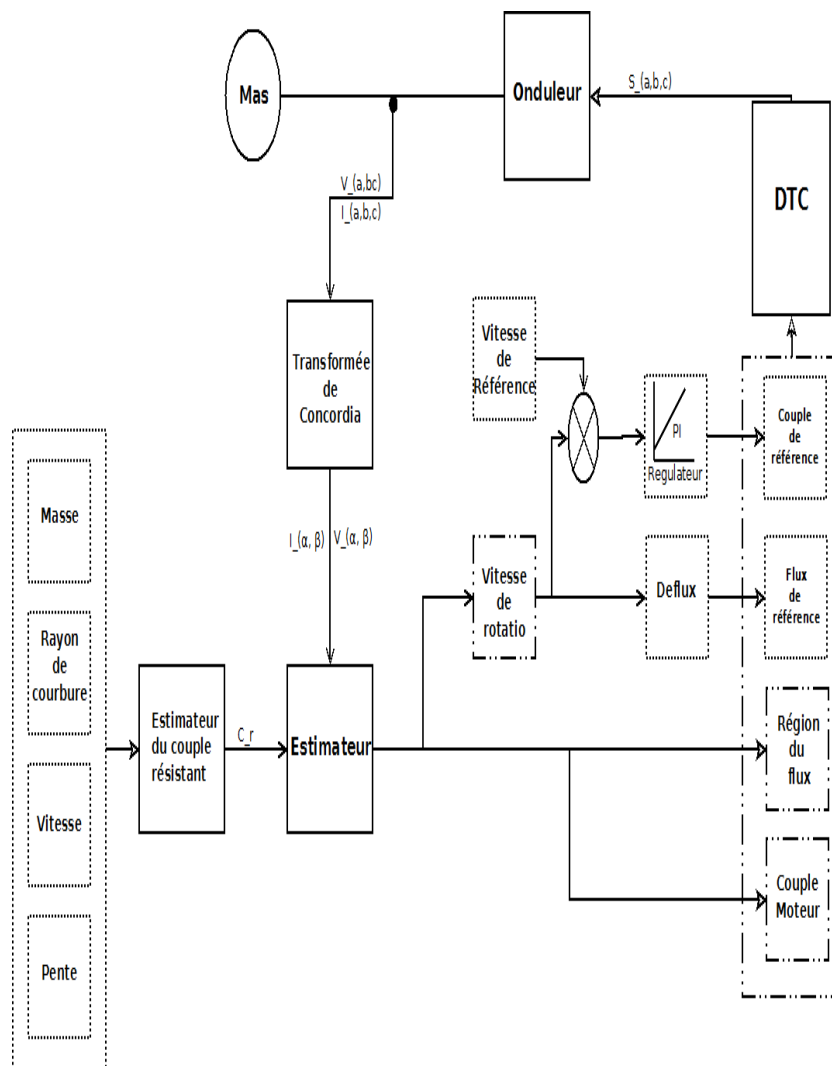


FIGURE 3.9 – Structure globale de la commande

### 3.5.1 Simulation sur Matlab

Nous avons réalisé une simulation caractérisée par les conditions représentées par le tableau 3.2



Temps [s]	0 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 4
Pente [°]	0		1.5	0	-1.5		0
Nombre de personnes à bord	302			250			
Rayon de courbure [m]	$\infty$	100/t-0.5	100/-t+1.5	$\infty$	100/t-2	100/t+3	$\infty$
Flux de référence [Wb]	1.3						
Vitesse du tramway [km/h]	$\Omega=20*t$		$\Omega=-40*t+60$	0	$\Omega=20*t-40$		$\Omega=-20*t+80$
Vitesse de rotation des moteurs [tr/min]	$\Omega=65*20*t$		$\Omega=65*(-40*t+60)$	0	$\Omega=65*(20*t-40)$		$\Omega=65*(-20*t+80)$

TABLE 3.2 – Conditions de simulation

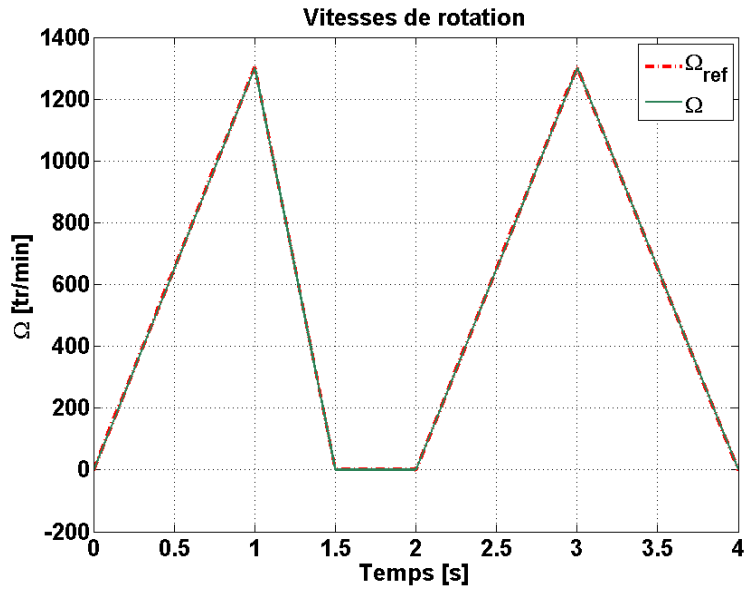


FIGURE 3.10 – Vitesses de rotation

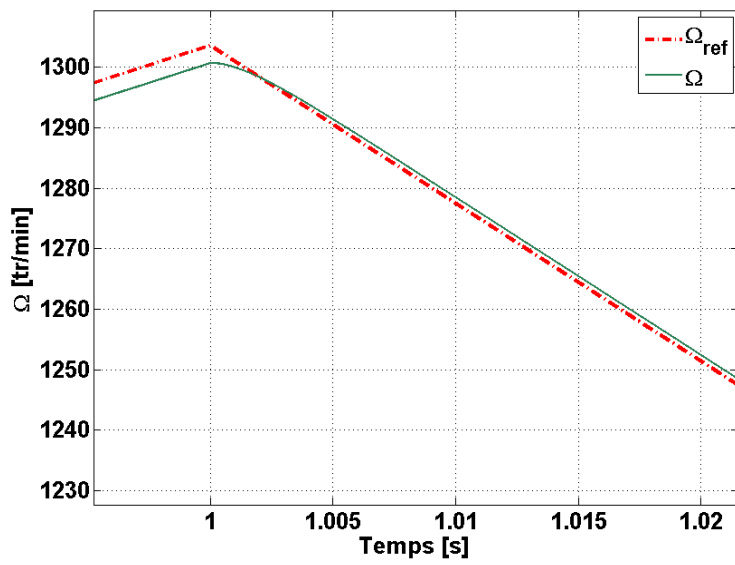


FIGURE 3.11 – Loupe sur les vitesses de rotation

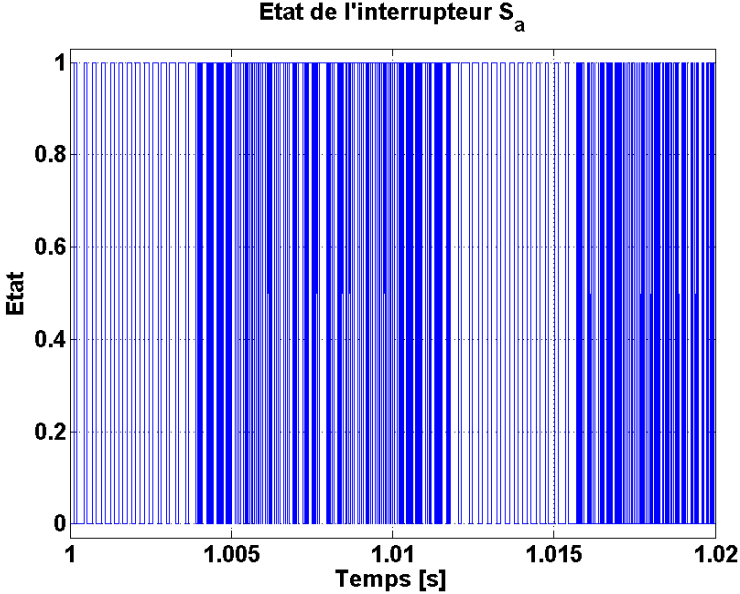


FIGURE 3.12 – État de l'interrupteur  $S_a$

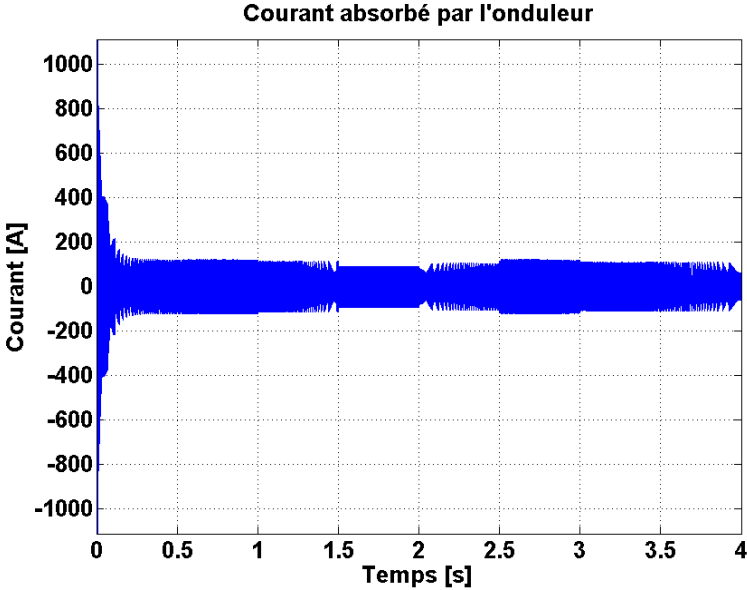
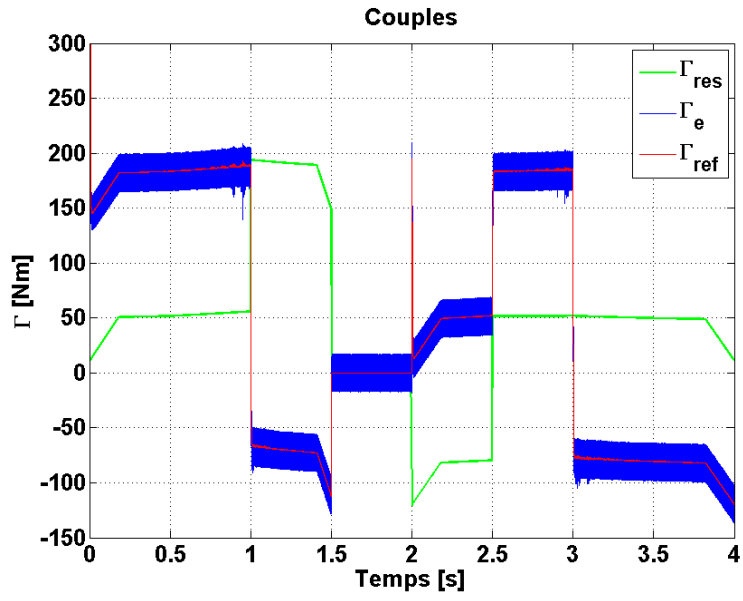
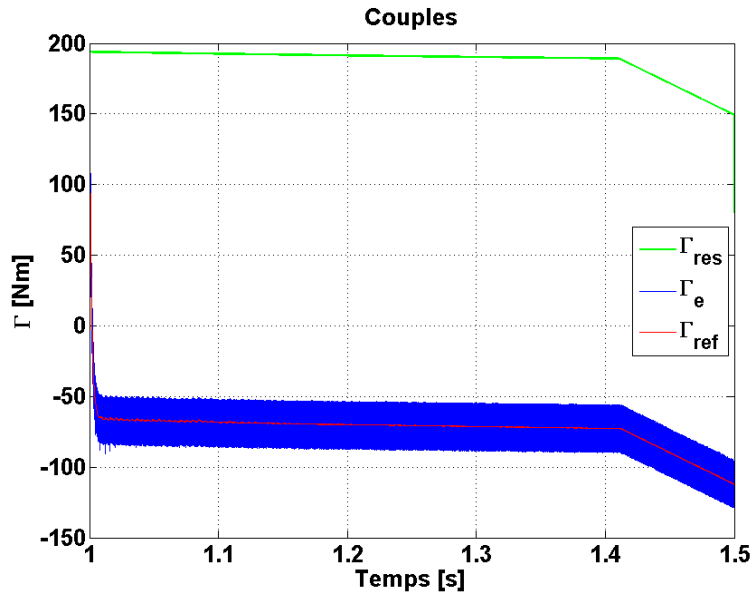


FIGURE 3.13 – Courant absorbé par l'onduleur

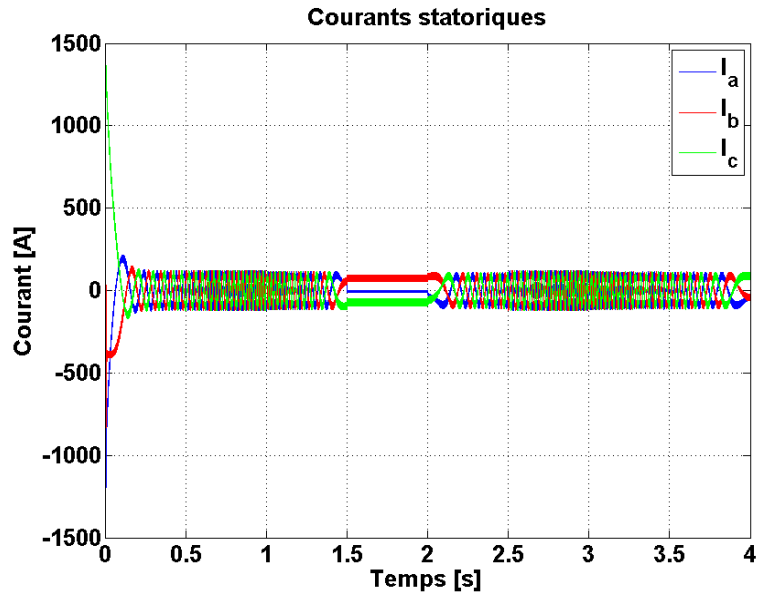


(a) Couple électromagnétique

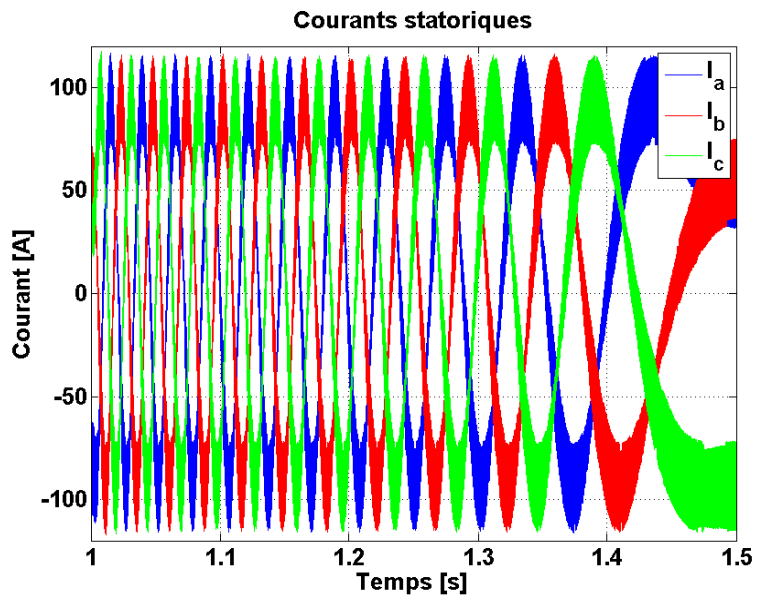


(b) Loupe sur le couple électromagnétique

FIGURE 3.14 – Couple électromagnétique

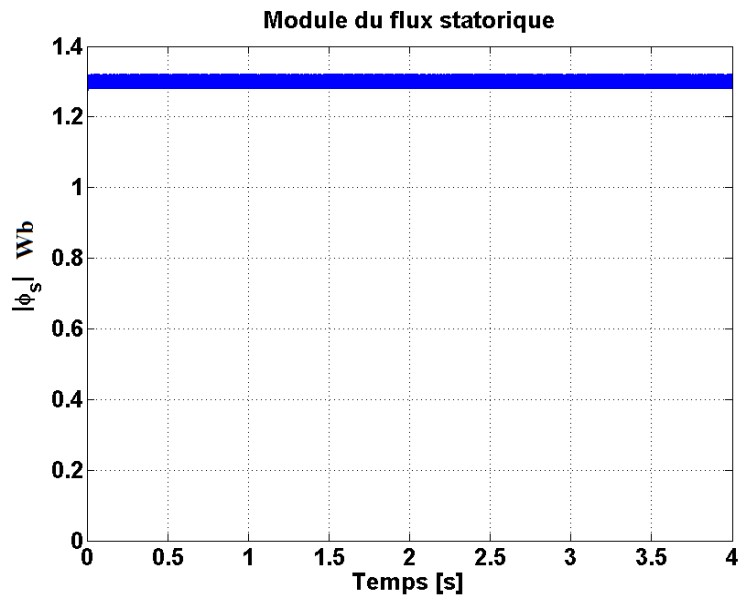


(a) Courants statoriques

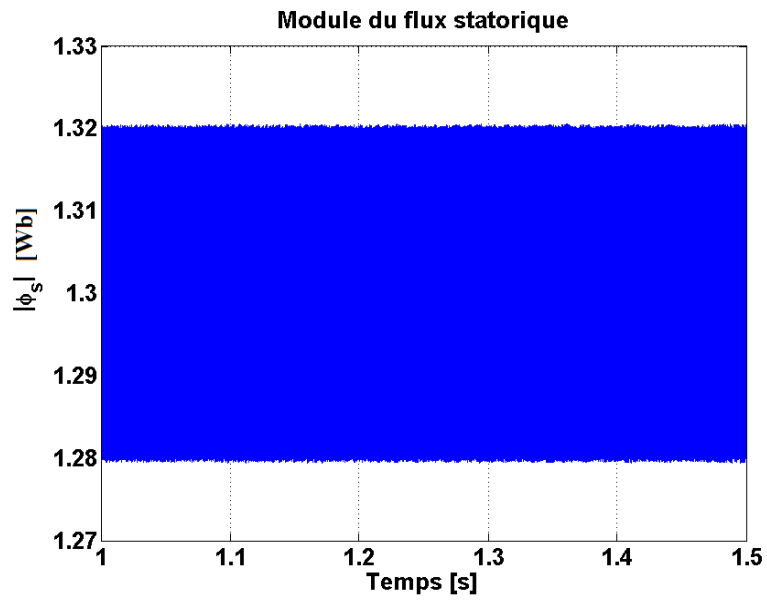


(b) Loupe sur les courants statoriques

FIGURE 3.15 – Courants statoriques

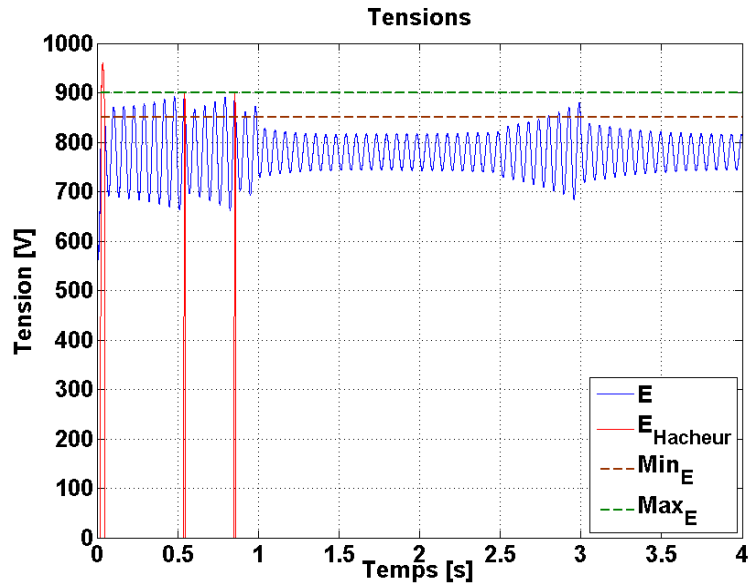


(a) Module du flux statorique

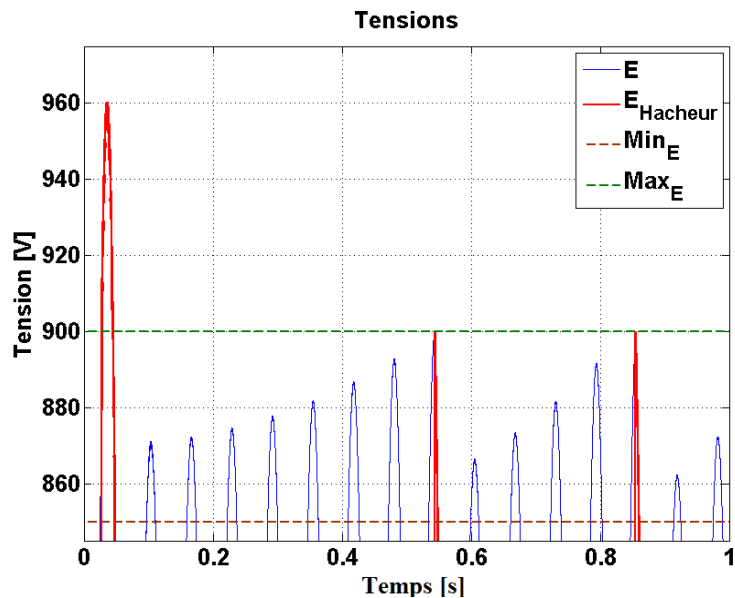


(b) Loupe sur le Module du flux statorique

FIGURE 3.16 – Module du flux statorique



(a) Tensions



(b) Loupe sur les tensions

FIGURE 3.17 – Tensions aux bornes de la capacité d’entrée et aux bornes la résistance de freinage

### 3.5.2 Interprétations des résultats

On remarque des figures 3.10 et 3.11 que la vitesse de rotation suit sa valeur de référence avec une erreur statique négligeable. Le fort appel de courant au démarrage cause la décharge brusque de la capacité, ce qui est remarqué dans les figures 3.17 et 3.15. Au freinage on a supposé que le courant est totalement absorbé par la capacité, ce qui justifie la diminution de l’ondulation de la tension de la capacité.

De la figure 3.14, on remarque que le couple résistant suit sa référence et que la pente

amène une augmentation considérable du couple résistant.

De la figure 3.13, on remarque que le courant absorbé par l'onduleur subit des ondulations brusques, car on n'applique que des vecteur actifs sur la machine. La fréquence moyenne de commutation est de l'ordre de 45kHz.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le tramway d'Alger, les efforts qu'il subit lors de son fonctionnement et la structure de la commande.

L'estimation du couple résistant est importante dans la procédure de commande, la bonne identification des coefficients permet d'optimiser les matériels à installer.

La commande directe du couple permet d'obtenir les meilleurs performances dynamiques avec seulement deux capteurs de tensions et deux capteurs de courants. Or la variation de la fréquence de commutation qui a une valeur moyenne de 45kHz dans cette simulation représente un inconvénient majeur.

Pour contourner le problème de la fréquence de commutation une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux pour contrôler le couple sera proposée dans le chapitre suivant. Pour réduire aussi le gabarit et les éléments mécaniques nous ajouterons dans la commande une correction des vitesses des roues motrices lors des courbures.



# Chapitre 4

## Amélioration de la commande

### Introduction

Dans ce chapitre nous proposons trois améliorations dans cette commande, nous commencerons par une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux pour contrôler le couple, puis nous proposerons une structure de commande qui corrigera les vitesses des roues motrices lors des courbures, et nous terminerons par une commande multi-machines mono-convertisseur.

### 4.1 Commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux

Nous avons vu dans le chapitre 2, que la commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux pour contrôler le couple électromagnétique donnait des résultats satisfaisants. Avec une contrainte qui est la fréquence de commutation très élevée, qui peut aller jusqu'à 100kHz.

#### 4.1.1 Principe

Le principe reste le même pour le contrôle du flux statorique. Le comparateur à hystérésis contrôlant le flux donnera comme sortie soit 1 ou 0 pour l'augmentation ou la diminution du module du flux statorique respectivement. Or pour le contrôle du couple électromagnétique, l'état intermédiaire 0 sera ajouté pour affiner la commande qui correspond à un couple constant. Ce nouvel état implique des nouveaux vecteurs à appliquer  $V_7$  ou  $V_0$ , ils permettront la diminution de la fréquence de commutation. Les interrupteurs auront des périodes de mise hors services<sup>1</sup>. Le comparateur à hystérésis contrôlant le couple est modélisé par le système d'équations 4.1 et représenté par la figure 4.1

---

1. interrupteurs  $S_a, S_b, S_c$  seront soit fermés ou ouverts

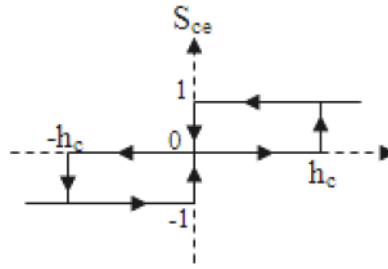


FIGURE 4.1 – Comparateur à hystérésis à trois niveaux contrôlant le couple électromagnétique

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 \text{si } \Delta C_e > h_{C_e} & \Rightarrow S_{C_e} = 1 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta C_e \leq h_{C_e} \text{ et } \Delta \dot{C}_e > 0 & \Rightarrow S_{C_e} = 0 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta C_e \leq h_{C_e} \text{ et } \Delta \dot{C}_e < 0 & \Rightarrow S_{C_e} = 1 \\
 \text{si } \Delta C_e < -h_{C_e} & \Rightarrow S_{C_e} = -1 \\
 \text{si } -h_{C_e} \leq \Delta C_e \leq 0 \text{ et } \Delta \dot{C}_e > 0 & \Rightarrow S_{C_e} = 0 \\
 \text{si } -h_{C_e} \leq \Delta C_e \leq 0 \text{ et } \Delta \dot{C}_e < 0 & \Rightarrow S_{C_e} = -1
 \end{array} \right. \quad (4.1)$$

L'application du vecteur nul maintient le module du flux statorique constant et ralentit sa rotation, donc le couple électromagnétique diminue lentement [12]. Le vecteur nul est choisi d'une façon à changer l'état d'un seul interrupteur. Si par exemple le vecteur actif précédent contient deux zéro, alors le vecteur  $V_0$  est choisi, si non, le vecteur  $V_7$  est choisi. Le tableau 4.1 représente la nouvelle table de sélection.

$\Delta\phi_s$	$\Delta C_e$	Région					
		1	2	3	4	5	6
1	1	$V_2$ 1,1,0	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1	$V_5$ 0,0,1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0
	-1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0	$V_2$ 1,1,0	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1	$V_5$ 0,0,1
	0	$V_7$ 1,1,1	$V_0$ 0,0,0	$V_7$ 1,1,1	$V_0$ 0,0,0	$V_7$ 1,1,1	$V_0$ 0,0,0
0	1	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1	$V_5$ 0,0,1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0	$V_2$ 1,1,0
	-1	$V_5$ 0,0,1	$V_6$ 1,0,1	$V_1$ 1,0,0	$V_2$ 1,1,0	$V_3$ 0,1,0	$V_4$ 0,1,1
	0	$V_0$ 0,0,0	$V_7$ 1,1,1	$V_0$ 0,0,0	$V_7$ 1,1,1	$V_0$ 0,0,0	$V_7$ 1,1,1

TABLE 4.1 – Nouvelle table de commutation

### 4.1.2 Simulation sur Matlab

Pour comparer les résultats des deux commandes, nous avons réalisé des simulations sur Matlab. Nous avons comparé les résultats donnés par la simulation d'une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux avec celle utilisant un comparateur à trois niveaux.

Les valeurs de références sont données dans le tableau 4.2, les simulations ont été faites avec la machine 1.

Temps [s]	0 - 0.5	0.5 - 1
$H_{C_e}$ [Nm]	$0.3 \simeq 1.5\% C_n$	
$H_{\phi_s}$ [Wb]	$0.02 \simeq 3\% \phi_n$	
$C_{ref}$ [Nm]	20	5
$\phi_{ref}$ [Wb]	0.7	

TABLE 4.2 – Valeurs imposées dans la simulation

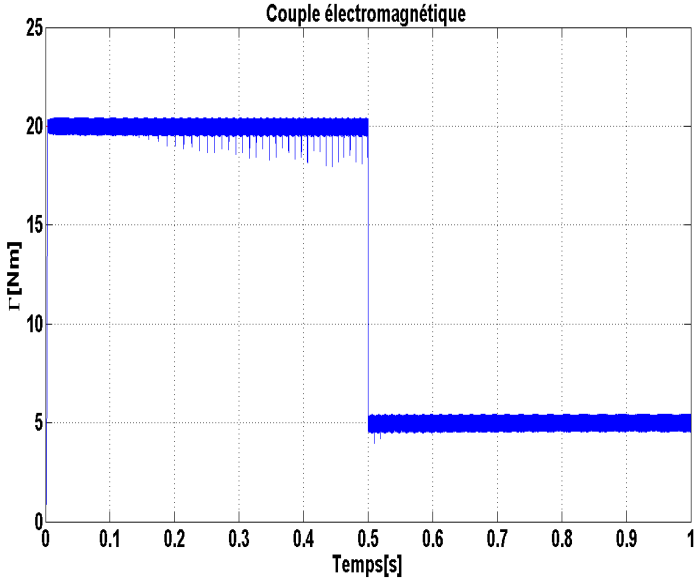
### Résultats de la simulation

Le tableau 4.3 représente les valeurs obtenues pour des simulations avec des différentes valeurs de largeurs de bandes d'hystérésis<sup>2</sup>

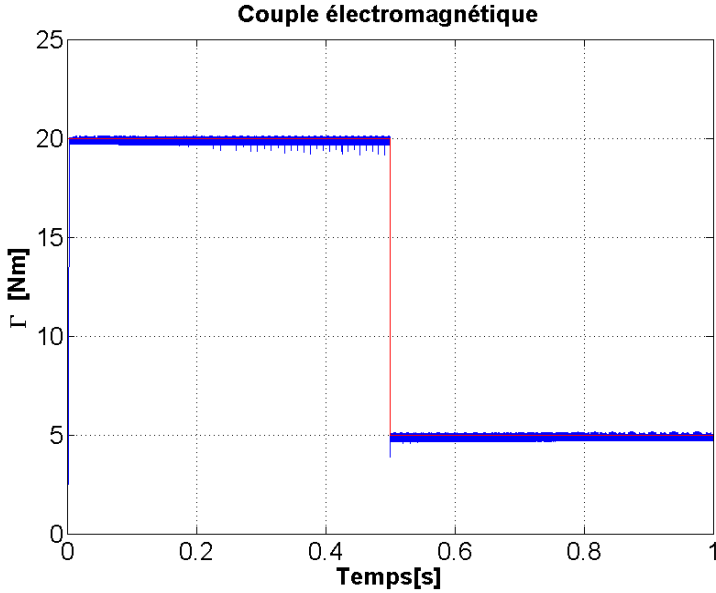
$H_{C_e}$ [Nm]	$H\phi$ [Wb]	Fréquence de commutation [kHz]
0.3	0.02	33
	0.04	32
	0.06	31
0.6	0.02	19
	0.04	18
	0.06	17
0.9	0.02	13
	0.04	12
	0.06	12

TABLE 4.3 – Influences des largeurs des bandes d'hystérésis sur la fréquence de commutation

2. Les simulations ont été faites pour une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux



(a) Couple électromagnétique pour une DTC<sub>2</sub>



(b) Couple électromagnétique pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.2 – Couple électromagnétique

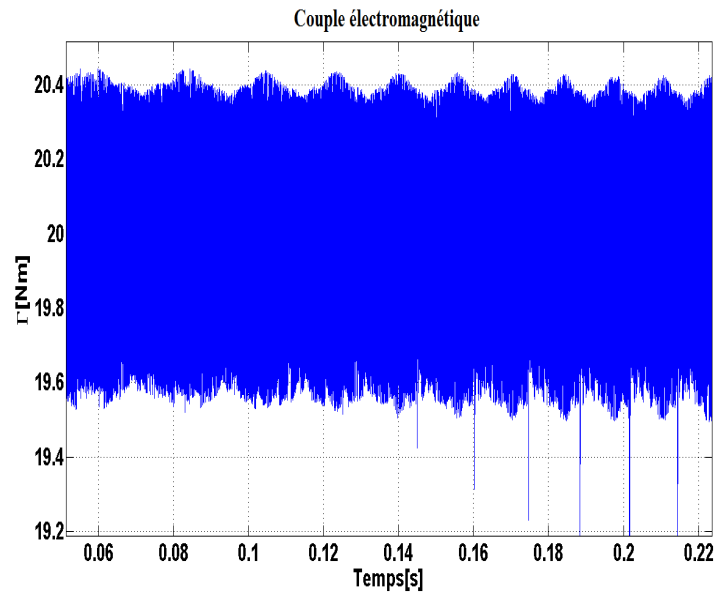
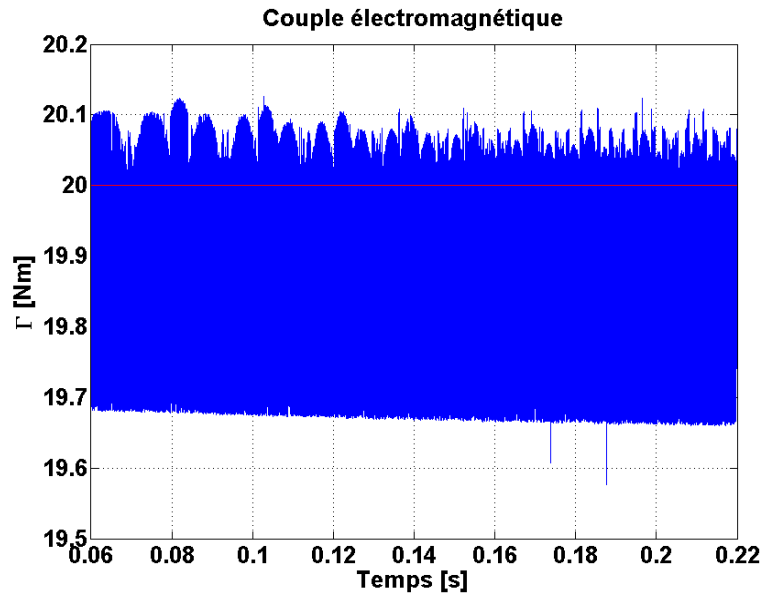
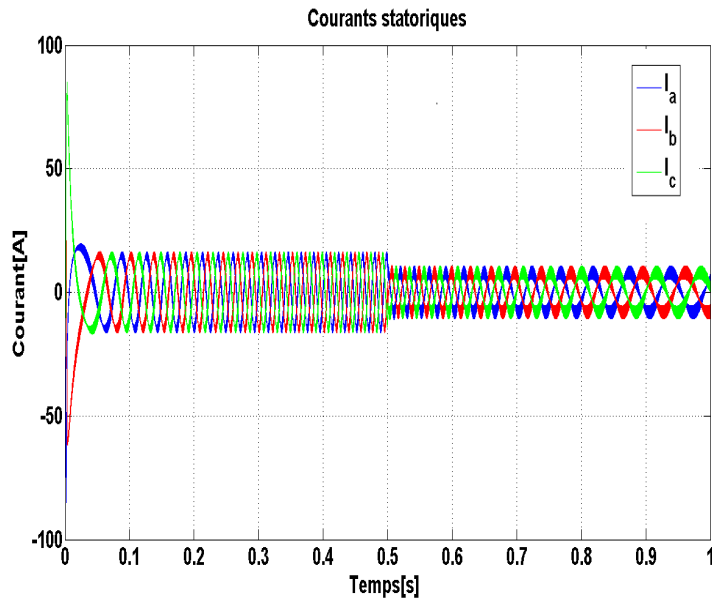
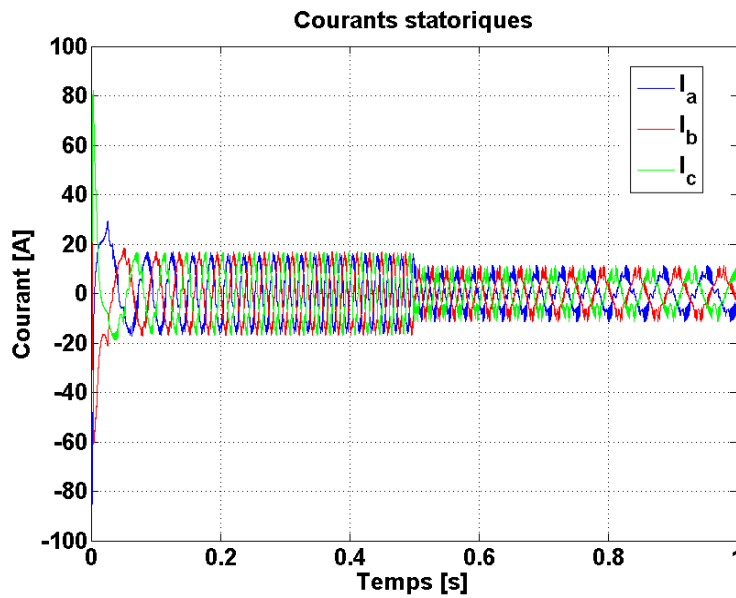
(a) Couple électromagnétique pour une DTC<sub>2</sub>(b) Couple électromagnétique pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.3 – Loupe sur le couple électromagnétique

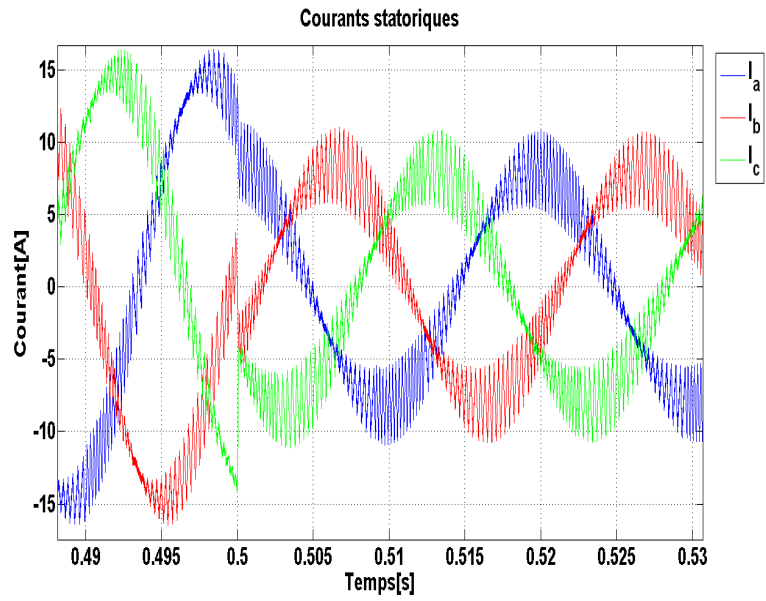


(a) Courants statoriques pour une  $DTC_2$

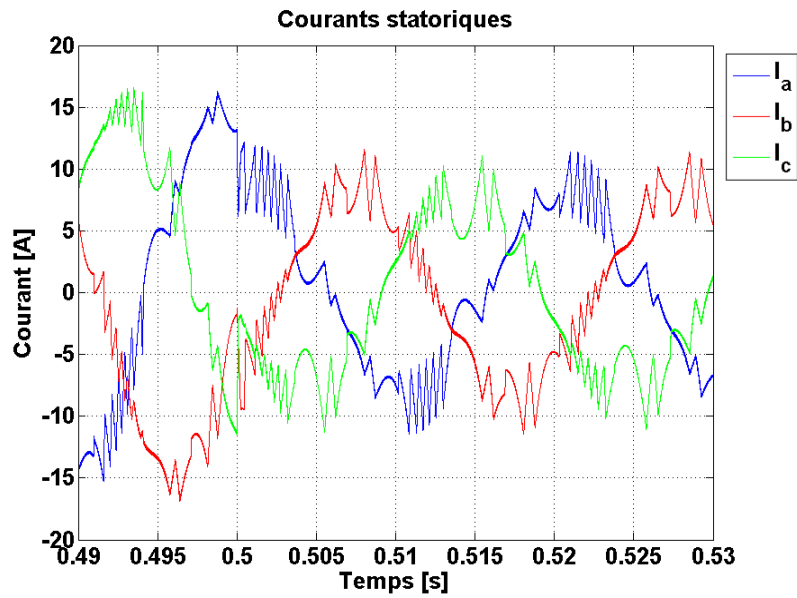


(b) Courants statoriques pour une  $DTC_3$

FIGURE 4.4 – Courants statoriques

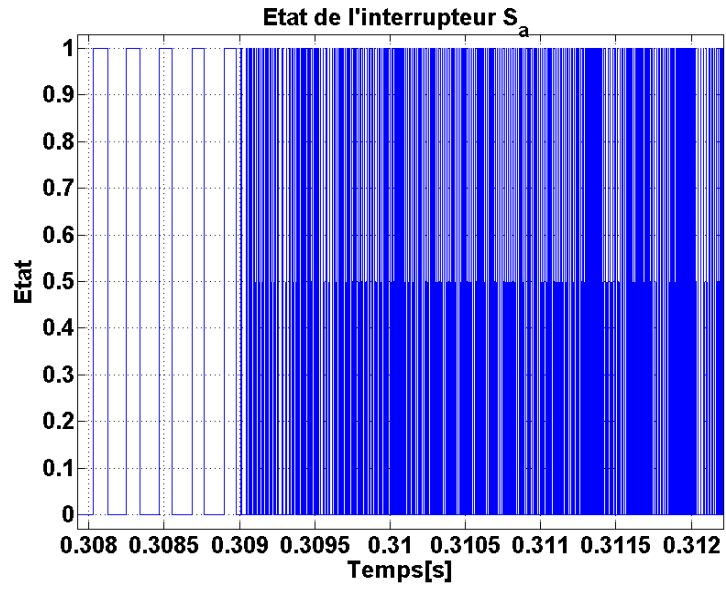


(a) Courants statoriques pour une DTC<sub>2</sub>

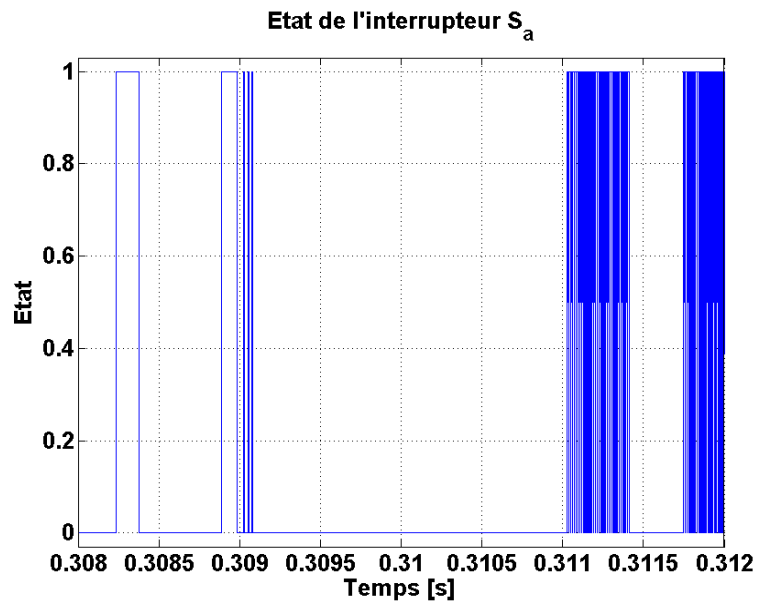


(b) Courants statoriques pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.5 – Loupe sur les courants statoriques



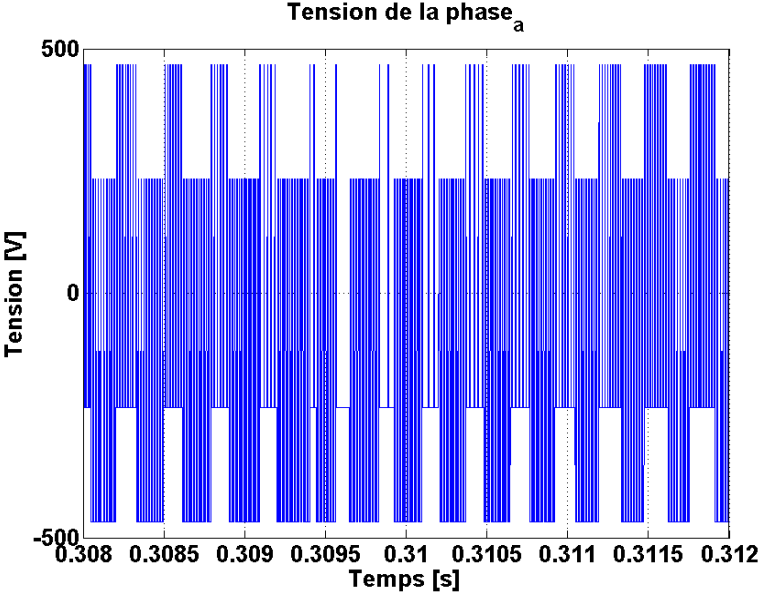
(a) État de l'interrupteur  $S_a$  pour une DTC<sub>2</sub>



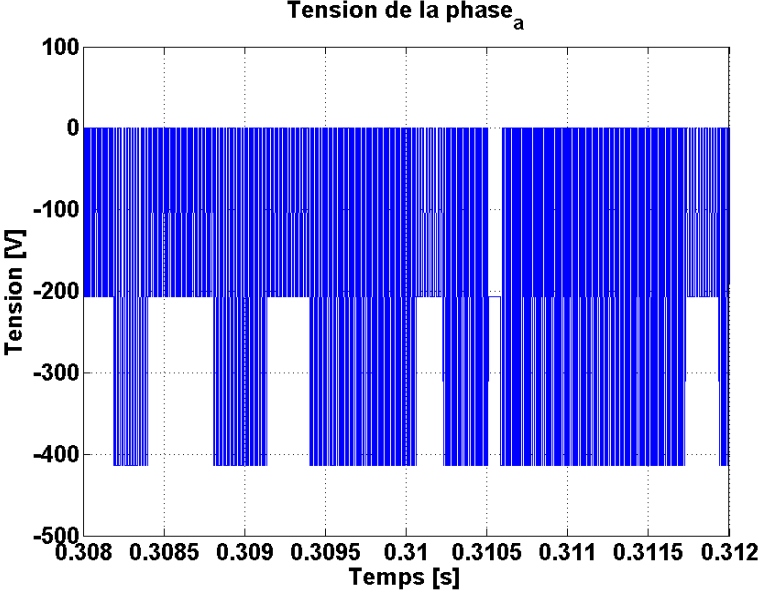
(b) État de l'interrupteur  $S_a$  pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.6 – État de l'interrupteur  $S_a$



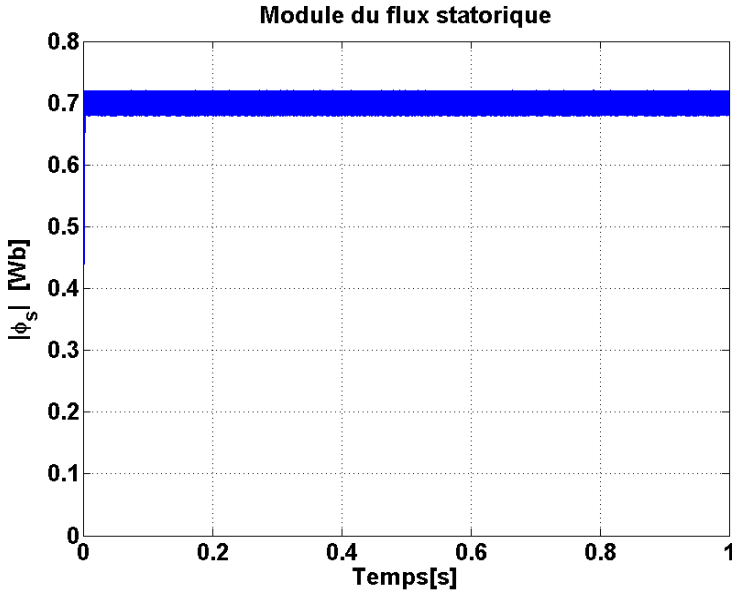


(a) Tension de la phase<sub>a</sub> pour une DTC<sub>2</sub>

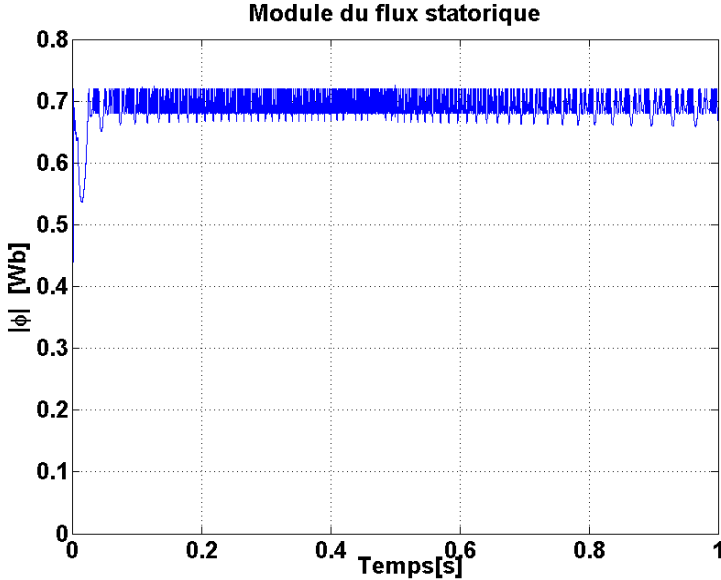


(b) Tension de la phase<sub>a</sub> pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.7 – Tension de la phase<sub>a</sub>



(a) Module du flux statorique pour une DTC<sub>2</sub>



(b) Module du flux statorique pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.8 – Module du flux statorique

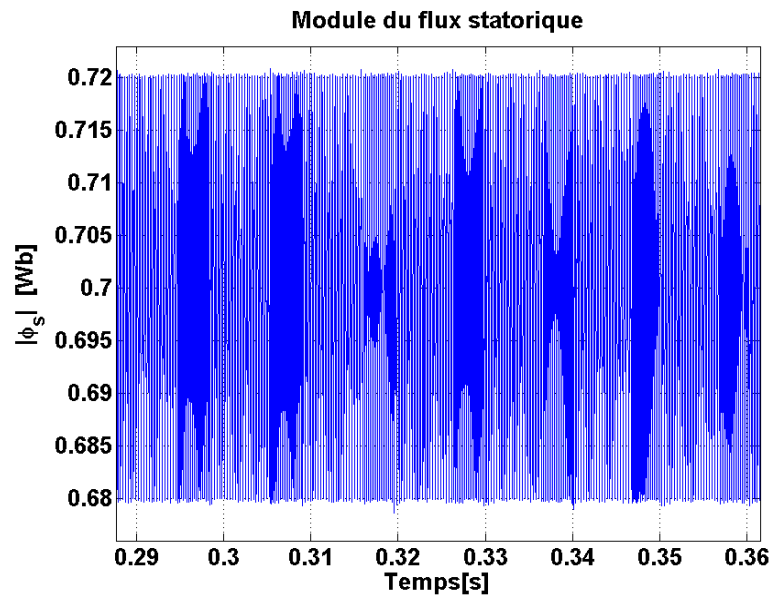
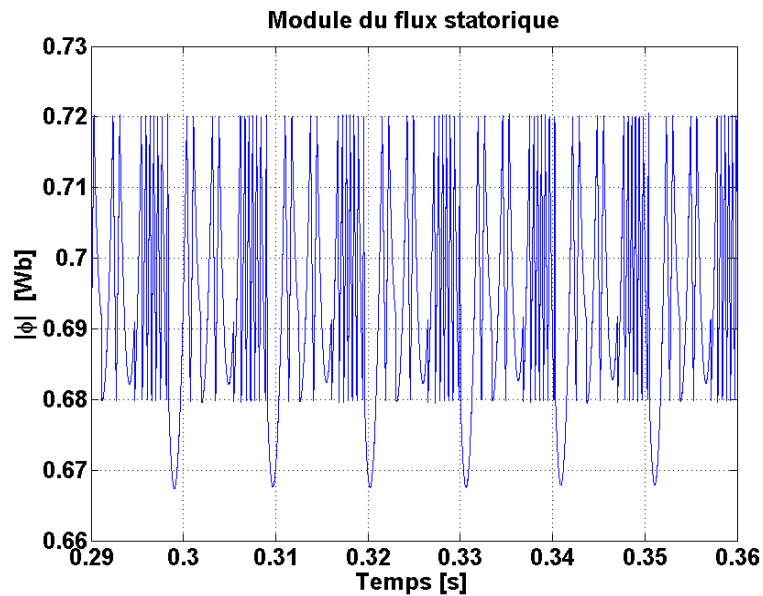
(a) Module du flux statorique pour une DTC<sub>2</sub>(b) Module du flux statorique pour une DTC<sub>3</sub>

FIGURE 4.9 – Loupe sur le module du flux statorique

**Interprétation des résultats** D'après les figures 4.4 et 4.5, nous remarquons que les courants statoriques de la commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux sont moins bruités que ceux d'une commande utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux, nous remarquons aussi que les courants ont une allure sinusoïdale.

Des figures 4.2 et 4.3, nous remarquons que le couple électromagnétique suit sa référence, le couple d'une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux est plus bruité que celui d'une commande utilisant un comparateur à hystérésis

à trois niveaux.

D'après les figures 4.6 et 4.7, nous remarquons que la tension appliquée à la phase<sub>a</sub> pour une commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux est plus douce que celle d'une commande utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux.

Des figures 4.8 et 4.9, le module du flux statorique suit sa référence, pour la commande utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux le module de flux subit quelques chutes, de l'ordre de 2 % du flux nominal ce qui est négligeable, elles sont causées par l'application du vecteur nul.

## 4.2 Annulation du différentiel de vitesse mécanique

Pour expliquer bien la procédure, on prendra l'exemple d'un véhicule électrique.

Dans un véhicule électrique les roues sont couplées aux moteurs à travers un réducteur de vitesse, pour assurer la stabilité du véhicule dans les virages il faut corriger les vitesses des roues motrices, soit mécaniquement ou électriquement, donc par la commande.

Pour réduire le poids de la chaîne de traction et les contraintes mécaniques cette correction sera faite électriquement<sup>3</sup>.

On suppose que la vitesse de référence est générée par le conducteur à travers la pédale d'accélérateur, dans un virage, à droite ou à gauche, les deux moteurs sont entraînés par deux vitesses différentes. Par exemple, dans un virage à gauche, la vitesse de référence du moteur droite doit être plus grande que celle du moteur gauche [14].

Nous allons adopter le modèle d'Ackermann-Jeantaud utilisé dans [14], qui est utilisé généralement pour des vitesses réduites.

---

3. pour réaliser cette commande il faut avoir deux onduleurs, un onduleur pour alimenter le moteur droite et un autre pour alimenter celui de gauche

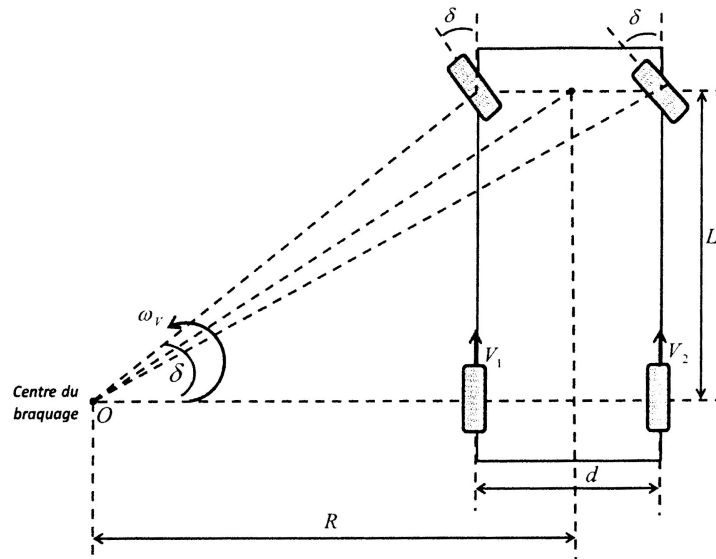


FIGURE 4.10 – Modèle de trajectoire

À partir de ce modèle, représenté par la figure 4.10, le rayon R peut être calculer comme suit :

$$R = \frac{L}{\tan \delta} \tag{4.2}$$

avec  $\delta$  est l'angle de direction.

la vitesse linéaire de chaque roue est donnée par :

$$\begin{cases} V_1 = \Omega_v(R - \frac{d}{2}) \\ V_2 = \Omega_v(R + \frac{d}{2}) \end{cases} \tag{4.3}$$

on peut déduire donc la vitesse de rotation :

$$\begin{cases} \Omega_1 = \Omega_v \frac{L - \frac{d}{2} \tan \delta}{L} \\ \Omega_2 = \Omega_v \frac{L + \frac{d}{2} \tan \delta}{L} \end{cases} \tag{4.4}$$

tel que  $\Omega_v$  est la vitesse angulaire du véhicule selon le centre de braquage, on aura donc une différence entre les deux vitesses :

$$\Delta\Omega = \Omega_1 - \Omega_2 = -\frac{d \tan \delta}{L} \Omega \tag{4.5}$$

L'angle de direction est donné comme suit :

- $\delta > 0$  : virage à gauche
- $\delta < 0$  : virage à droite
- $\delta = 0$  : tout droit

### 4.3 Structure mono-convertisseur multi-machines

On a vu précédemment que pour corriger les vitesses des roues motrices lors des courbures il faut imposer des vitesses de référence différentes ce qui nécessite une alimentation séparée du moteur gauche et de droite, ce qui demande six bras donc douze interrupteurs. On peut gagner un bras en alimentant par une structure mono-convertisseur multi-machines illustrée par la figure 4.11

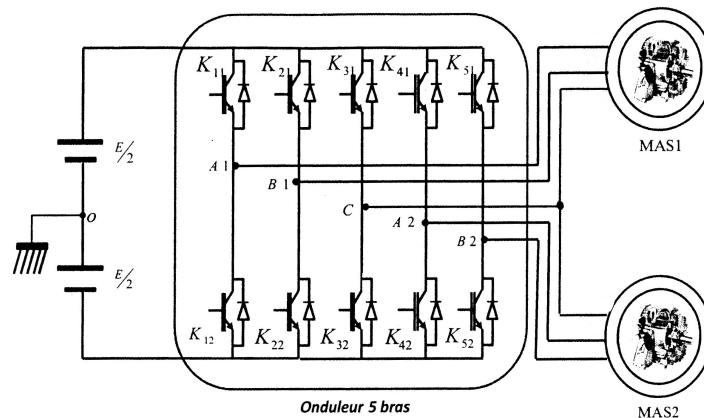


FIGURE 4.11 – Structure mono-convertisseur multi-machines

#### 4.3.1 Principe

Dans cette structure on adoptera une commande directe du couple qui utilise un comparateur à hystérésis à trois niveaux pour contrôler le couple électromagnétique. Cette structure offre deux bras indépendants pour chaque moteur et un bras commun pour les deux, pour assurer une commande découplée nous avons utilisé la méthode suivante : Les états des interrupteurs sont calculés comme si on avait une structure d'alimentation séparée puis :

- Si  $S_{c1} = S_{c2}$  : nous appliquerons directement les vecteurs actifs  $V_1(S_{a1}, S_{b1}, -S_{c1})$  pour le premier moteur et  $V_2(S_{a2}, S_{b2}, S_{c2})$  pour le deuxième
- Si non : dans la demi période d'échantillonnage nous appliquerons le vecteur actif  $V_1(S_{a1}, S_{b1}, S_{c1})$  pour le premier moteur avec le vecteur nul  $V_2(S_{c1}, S_{c1}, S_{c1})$  pour le deuxième, dans la deuxième demi période d'échantillonnage nous appliquerons le vecteur actif  $V_2(S_{a2}, S_{b2}, S_{c2})$  pour le deuxième moteur et le vecteur nul  $V_1(S_{c2}, S_{c2}, S_{c2})$  pour le premier moteur

### 4.3.2 Simulation sur MATLAB

Pour notre simulation<sup>4</sup> nous avons pris une voiture qui a les dimensions suivantes<sup>5</sup> :

- L=2.4m
- d=1.4m

la vitesse de référence, l'angle de direction et le couple de charge sont donnés dans le tableau 4.4

Temps[s]*10 <sup>-1</sup>	0-3	3-5	5-7	7-9	9-10
Vitesse de référence[tr/min]	1000				
Couple résistant[Nm]	$2+0.01 \times \Omega_{rotation}$				
Angle du virage[°]	0	15	0	-15	0
Rayon de courbure[m]	$\infty$	10	$\infty$	10	$\infty$

TABLE 4.4 – Données de Référence de la simulation

### Résultats de la simulation

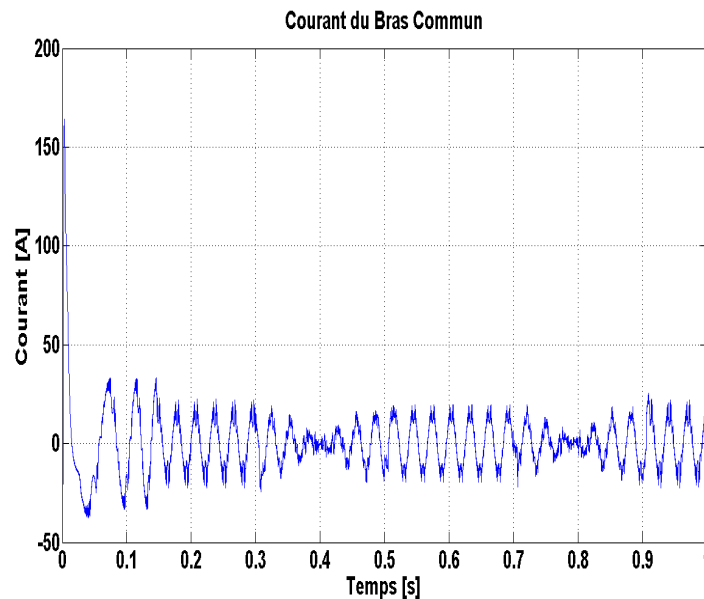
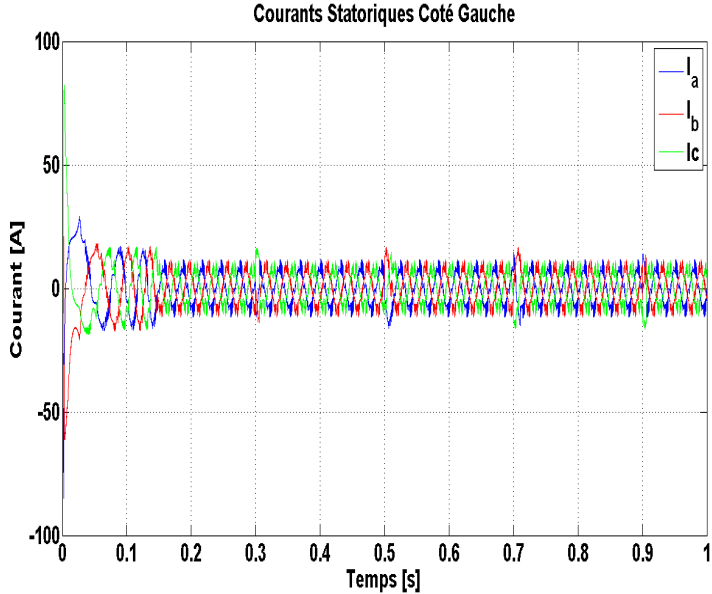
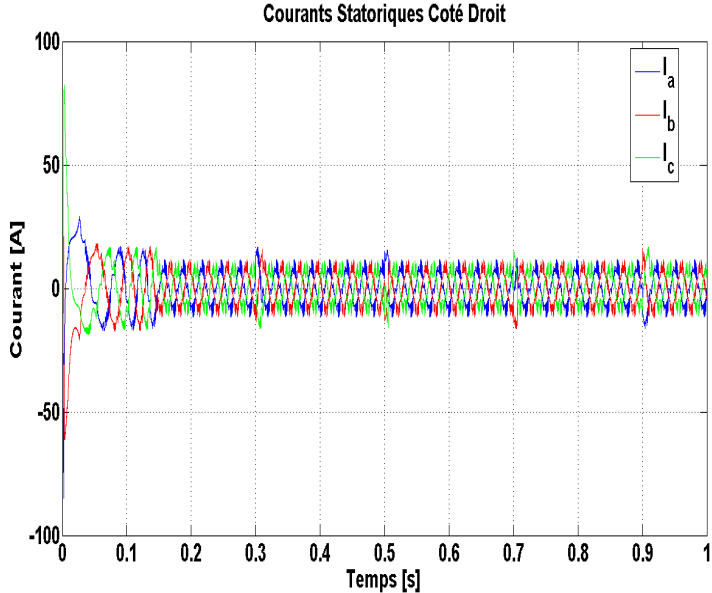


FIGURE 4.12 – Courant absorbé par le bras commun

- 
4. La simulation a été faite avec les paramètres de la machine 1
  5. Nous avons pris les dimensions d'une Volkswagen Golf série 1



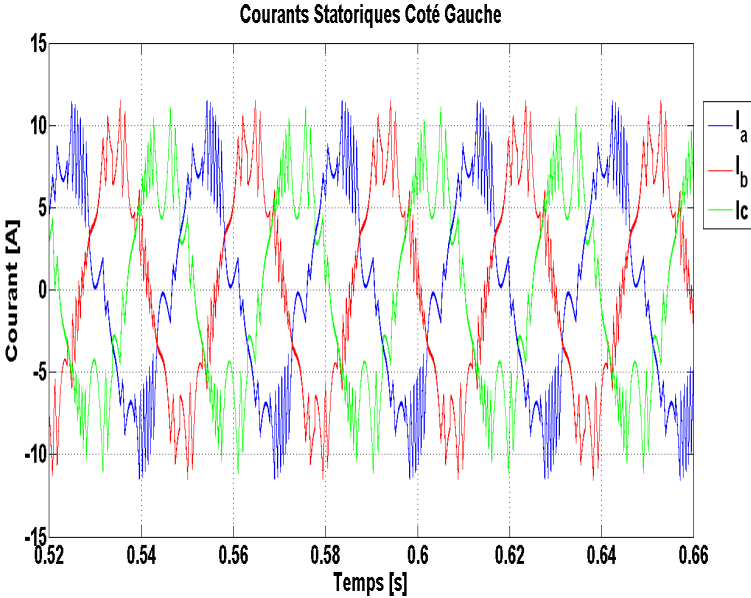
(a) Moteur gauche



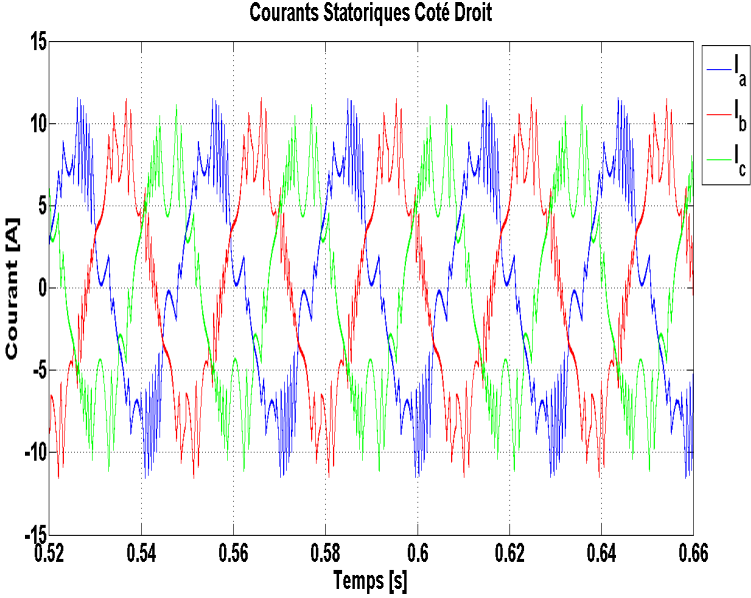
(b) Moteur droite

FIGURE 4.13 – Courants statoriques



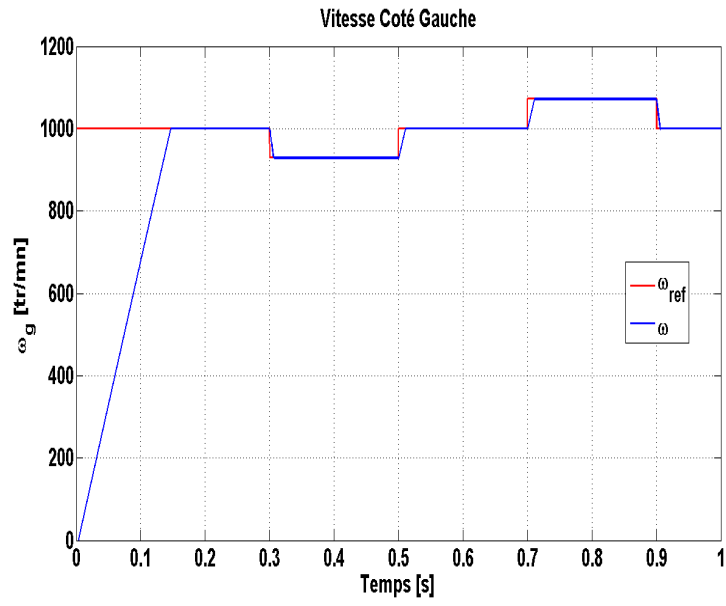


(a) Moteur gauche

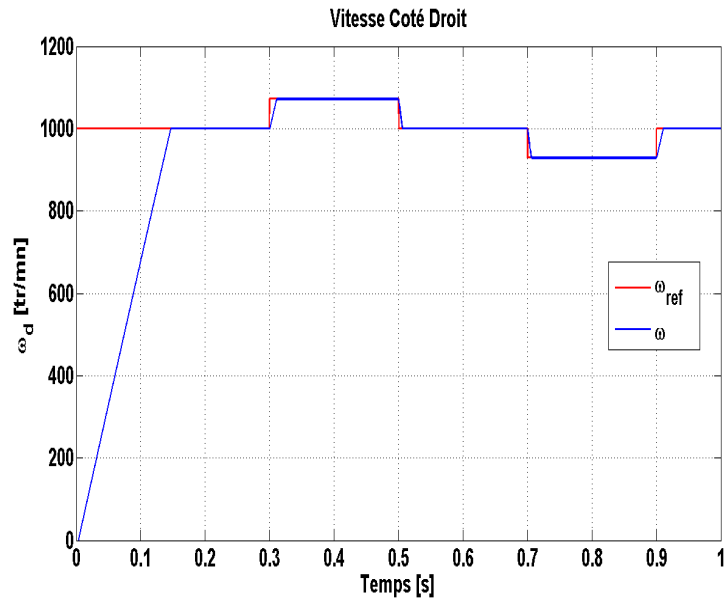


(b) Moteur droite

FIGURE 4.14 – Loupe sur les courants statoriques

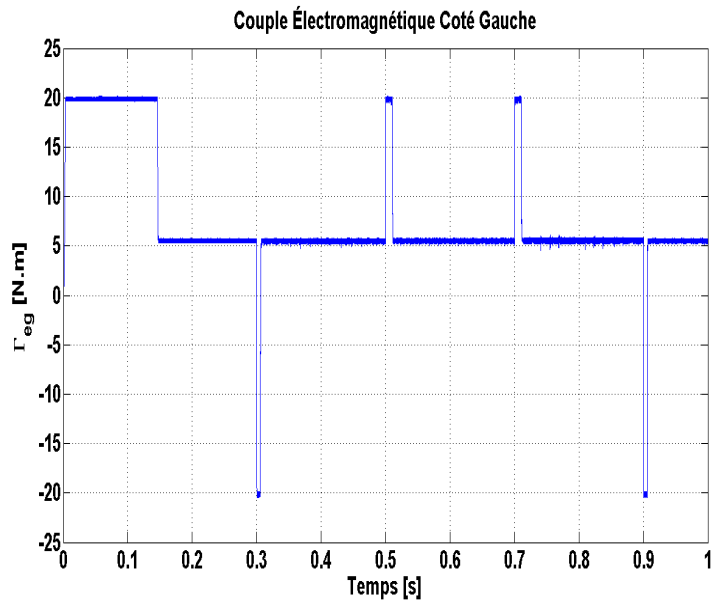


(a) Moteur gauche

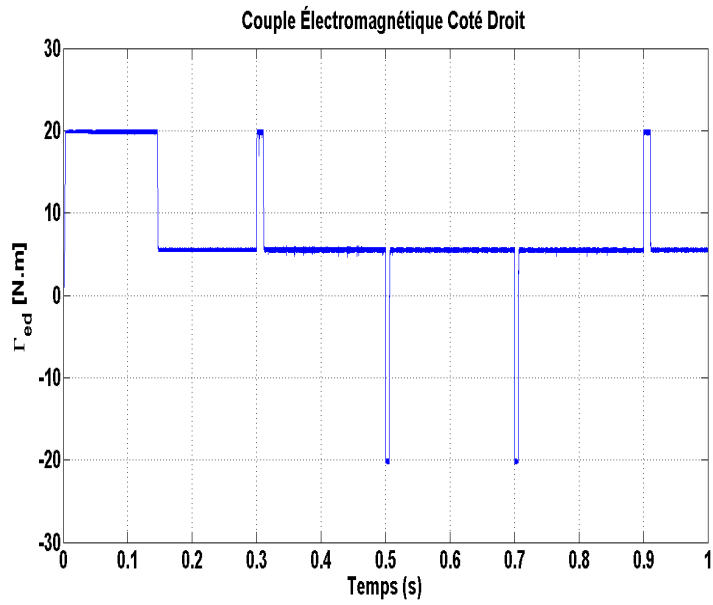


(b) Moteur droite

FIGURE 4.15 – Vitesse de rotation

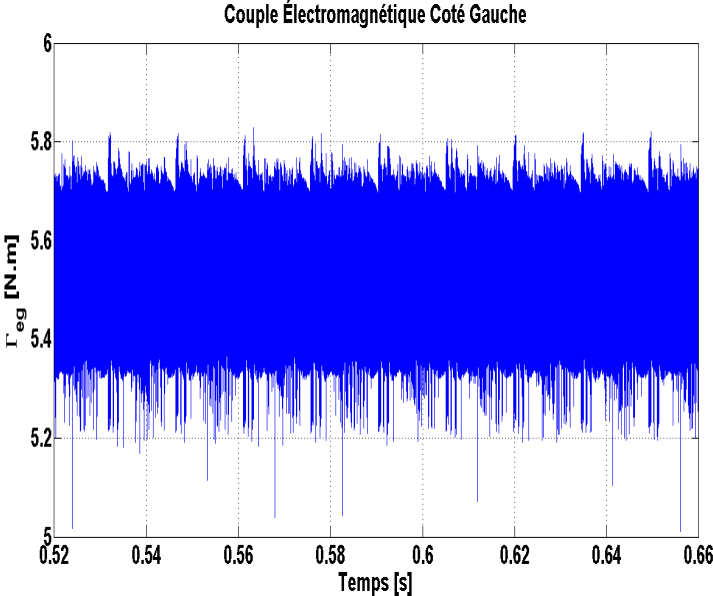


(a) Moteur gauche

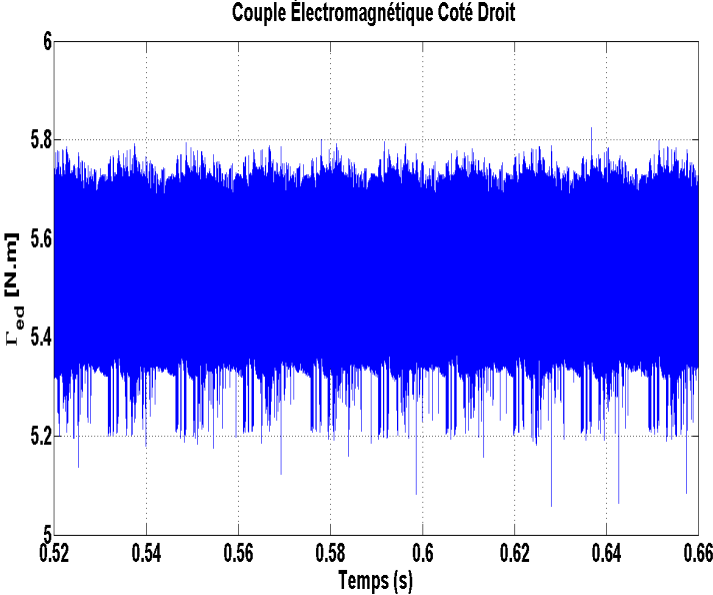


(b) Moteur droite

FIGURE 4.16 – Couple électromagnétique

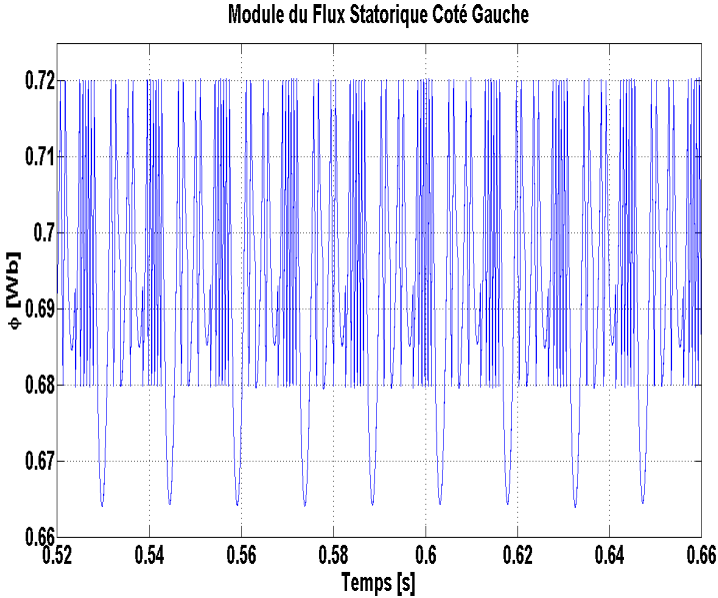


(a) Moteur gauche

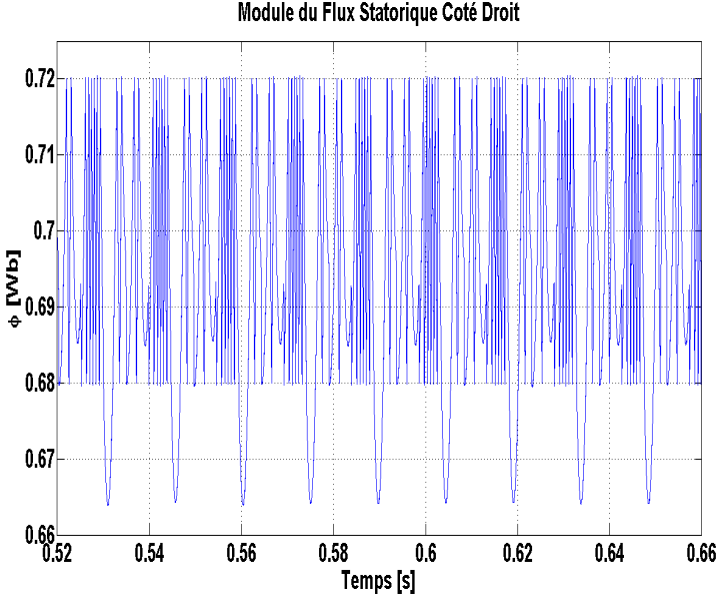


(b) Moteur droite

FIGURE 4.17 – loupe sur le couple électromagnétique



(a) Moteur gauche



(b) Moteur droite

FIGURE 4.18 – loupe sur le module du flux statorique

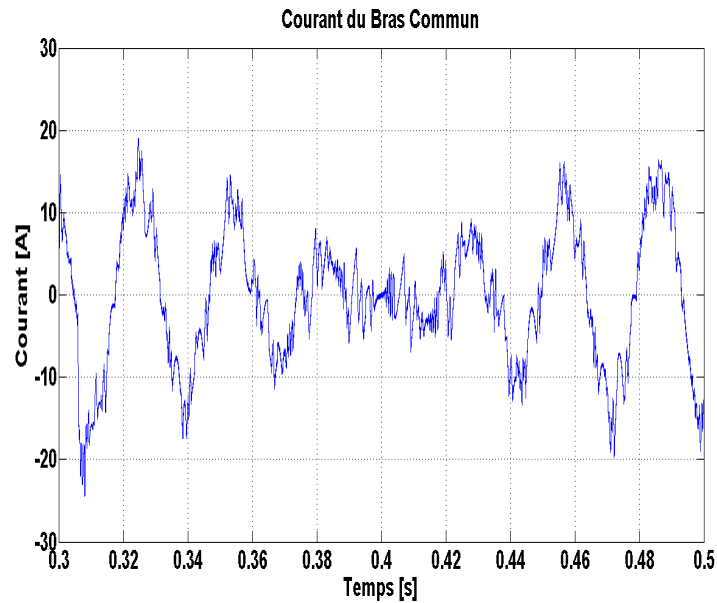


FIGURE 4.19 – Loupe sur le courant absorbé par le bras commun

**Interprétation des résultats** D’après la figure 4.15, cette structure corrige les vitesses des roues motrices et assure la commande séparée des deux moteurs, gauche et droite dans notre cas. Des figures 4.16 et 4.17, nous remarquons que le couple électromagnétique suit sa référence plus au moins la valeur introduite dans le comparateur à hystérésis, on remarque certains pics dans le couple électromagnétique ceci est dû au moments d’application du vecteur nul, dans la demi période d’échantillonnage. On remarque aussi des figures 4.12 et 4.19, que le courant absorbé par le bras commun est sinusoïdal si les vitesses sont égales, si non le courant a une allure non sinusoïdale. On remarque de la figure 4.13 4.14, que l’allure des courants absorbés par les moteurs est sinusoïdale.

D’après la figure 4.18 le flux statorique suit sa référence avec quelques chutes causées par les moments d’application du vecteur nul sur la machine.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé des méthodes pour améliorer la commande d’une chaîne de traction électrique. la commande directe du couple utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveau pour contrôler le couple apporte une diminution de la fréquence de commutation et le courant absorbé par cette dernière est moins bruité, la correction des vitesses des roues motrices par la commande permet de simplifier la structure mécanique. La structure mono-convertisseur multi-machines permet de gagner deux interrupteurs donc un bras qui économisera le prix de départ. Malgré les avantages proposés par cette dernière, le courants non sinusoïdale absorbé par le bras commun représente un grand désavantage.

# Conclusion générale

## Conclusion

Dans ce rapport nous avons étudié la commande de la chaîne de traction du tramway d'Alger, nous avons utilisé une commande directe du couple pour contrôler la vitesse des moteurs de traction, donc la vitesse du tramway.

Malgré ses inconvénients, la DTC représente plusieurs avantages par rapport à la commande vectorielle, parmi ces derniers on cite :

- Elle ne nécessite pas un capteur mécanique.
- Elle est robuste contre les variations paramétriques de la machine.
- Une dynamique plus rapide du couple et du flux.

La DTC utilisant un comparateur à hystérésis à deux niveaux nécessite que l'application des vecteurs actifs sur la machine, ce qui l'entraîne dans des régimes transitoires sévères, mais elle donne des bonnes dynamiques et absorbe un courant sinusoïdal. La variation de la fréquence de commutation représente un grand inconvénient, elle a une valeur moyenne de l'ordre de 50kHz, ce qui nécessite des composants performants et assez chers. Elle dépend largement des largeurs des bandes d'hystérésis et surtout celle du comparateur contrôlant le couple.

Pour diminuer la fréquence de commutation, nous avons proposé l'ajout de l'utilisation du vecteur nul, donc on utilisera un comparateur à hystérésis à trois niveaux.

Pour annuler le différentiel mécanique, gagner d'espace et minimiser les contraintes mécaniques, une correction de la vitesse de référence lors des courbures a été ajoutée à la commande. Cette dernière nécessite une alimentation séparée des deux cotés, gauche et droite. Pour diminuer le nombre d'interrupteurs une structure mono-convertisseur multi-machines a été proposée, elle offre la même réponse qu'une structure à alimentation séparée avec un seul inconvénient de plus, qui est le courant non sinusoïdale absorbé par le bras commun. Dans cette dernière commande la fréquence d'échantillonnage influe largement sur la réponse du couple.

## Perspectives

Nous proposons pour notre étude les améliorations suivantes :

- Une commande directe du couple utilisant des méthodes intelligentes pour le réglage de la vitesse ; comme les réseaux de neurones et la logique floue. Elles offrent plus de robustesse et de rapidité au système de régulation.
- La correction de la résistance statorique en fonction de la température et la prise en considération du retard imposé par les interrupteurs ajouteront plus de réalité à notre modèle.
- Une commande directe du couple hybride (DTC-SVM) permettra d'imposer une fréquence de commutation fixe.
- Une réalisation pratique et/ou une implémentation sur une carte DSP sont nécessaires pour confirmer notre modèle.
- Une commande directe du couple à douze secteurs apportera la notion des grandes et faibles variations du couple, ce qui offrira une meilleure dynamique et réduira les ondulations du couple.
- Une alimentation à travers un onduleur multi-niveaux permettra la diminution des pertes par commutation, de la fréquence de commutation et d'augmenter le nombre de tensions générées, ce qui améliorera les formes d'ondes et réduira les harmoniques injectés dans le bus continu.



# Bibliographie

- [1] Pierre CHAPAS : *Composantes et applications électriques du système ferroviaire*. Techniques de L'ingénieur, 10/11/2003.
- [2] Marc DEBRUYNE : *Apport de l'électronique de puissance pour la traction électrique D3278*, *Technique de l'ingénieur*, 10/08/2010.
- [3] Jean-Marc ALLENBACH : *Traction Électrique*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, EPFL, 2008.
- [4] Pierre PATIN : *La Traction Électrique*. Editions Leon Eyrolles, Collection des chemins de fer, 1954.
- [5] Victor SABATÉ : *Traction électrique ferroviaire - Convertisseurs et moteurs D5502*, *Technique de l'ingénieur*, 10/05/1998.
- [6] Alstom. *Brochure matériel roulant AGV*.
- [7] Pierre CHAPAS et JEAN-MICHEL PETIT : *Dimensionnement du matériel roulant ferroviaire*. Techniques de L'ingénieur, 10/11/2004.
- [8] Pierre CHAPAS : *Cours de Traction Ferroviaire*, 2001.
- [9] Georges MULLER : *Tramways - Avantages, contraintes et exploitation C4441*, *Technique de l'ingénieur*, 10/08/2011.
- [10] Georges MULLER : *TRAMWAYS - Alimentation, conception, performances et design C4442*. Techniques de L'ingénieur, 10/02/2012.
- [11] *Modélisation contrôle vectoriel et DTC*. HERMES Science Publications, 2000.
- [12] TOUFOUTI RIAD : *contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone*. Thèse de doctorat, université mentouri constantine, 2008.
- [13] Rémi VIAL : *Vers un dimensionnement optimal structure-commande de système multi-convertisseur. Application aux réseaux de tramways*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [14] Rebba KADA : *Etude et réalisation d'un système mono-convertisseur multi-machines*. Ecole militaire polytechnique d'Alger, 01 2013. Mémoire de magister.

# Annexe A

## Paramètres de la Machine 1

$V_n/U_n$	Tension	220/380 [V]
$I_n$	Courant Nominale	14 [A]
$P_n$	Puissance Nominale	3.5 [kW]
$\Omega_n$	Vitesse nominale	1410 [tr/min]
$p$	Nombre de paires de pôles	2
$R_s$	Résistance statorique	0.76 [ $\Omega$ ]
$R_r$	Résistance rotorique	0.74 [ $\Omega$ ]
$l_s$	Inductance de fuite statorique	3 [mH]
$l_r$	Inductance de fuite rotorique	3 [mH]
$M$	Inductance Mutuelle	74 [mH]

## Annexe B

### Paramètres du Moteur de traction

$V_n/U_n$	Tension		290/500 [V]
$I_n$	Courant Nominale		168 [A]
$P_n$	Puissance Nominale		120 [kW]
$\eta_n$	Rendement nominal du moteur		94%
$\Omega_n$	Vitesse nominale		2145 [tr/min]
$p$	Nombre de paires de pôles		2
$R_s$	Résistance statorique	20[° C]	24.8 [ $m\Omega$ ]
		150[°C]	37.5 [ $m\Omega$ ]
$R_r$	Résistance rotorique	20[°C]	17.3 [ $m\Omega$ ]
		150[°C]	24 [ $m\Omega$ ]
$l_s$	Inductance de fuite statorique		0.456 [mH]
$l_r$	Inductance de fuite rotorique		0.304 [mH]
$M$	Inductance Mutuelle		1.2 [mH]
$k_g$	Rapport de réduction		1/6.88
$\eta_g$	Rendement du réducteur		96%
$D$	Diamètre de roue	neuve	590 [mm]
		mi-usée	560 [mm]

# Annexe C

## Modélisation de la machine asynchrone

Pour élaborer la loi de commande il faut avoir le bon modèle du système, dans notre cas la machine asynchrone. Vu que la commande directe du couple nécessite uniquement la transformation vers le système d'axes lié au stator  $\alpha$ - $\beta$ , on aura besoin que du modèle de la machine asynchrone dans ce dernier repère.

### C.1 Modèle d'état dans un repère lié au stator

le système d'équations de la machine asynchrone est comme suit :

#### C.1.1 Équations électriques

$$\begin{cases} V = (R + W)I + L\dot{I} \\ V = \begin{bmatrix} V_{\alpha s} & V_{\beta s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^t \\ I = \begin{bmatrix} I_{\alpha s} & I_{\beta s} & I_{\alpha r} & I_{\beta r} \end{bmatrix}^t \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M\omega_r & 0 & -L_r\omega_r \\ -M\omega_r & 0 & -L_r\omega_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

Un modèle d'état est sous la forme :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (\text{C.5})$$

avec :

- $V=U$
- $\dot{X}=\dot{I}$
- $A=L^{-1}(R + W)$
- $B=L^{-1}$

### C.1.2 Équations mécaniques

$$\begin{cases} C_e - C_r = J\dot{\Omega} - f\Omega \\ \omega_r = p\Omega \\ C_e = pM(I_{\alpha r}I_{\beta s} - I_{\alpha s}I_{\beta r}) \end{cases} \quad (\text{C.6})$$

# Annexe D

## Transformée de Concordia

Elle permet le passage d'un repère triphasé  $X_{a,b,c}$  vers un autre repère diphasé  $X_{\alpha,\beta}$

### D.1 Passage d'un repère biphasé vers un repère triphasé

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \\ C_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{4}} & -\sqrt{\frac{3}{4}} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{D.1})$$

### D.2 Passage d'un repère triphasé vers un repère biphasé

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \\ C_{32} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{D.2})$$