

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M. Ing.

PAR  
ALEXANDRE SILES

ANALYSE ET SIMULATION DES SURTENSIONS AUX BORNES DU MOTEUR  
ASYNCHRONE ALIMENTÉ PAR DES LONGS CÂBLES

MONTRÉAL, LE 12 DÉCEMBRE 2005

(c) droits réservés de Alexandre Siles

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis-A. Dessaint, directeur de mémoire  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Kamal Al-Haddad, président du jury  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Claude Cyr, membre de jury  
TechnoMotion

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 7 DÉCEMBRE 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **ANALYSE ET SIMULATION DES SURTENSIONS AUX BORNES DU MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ PAR DES LONGS CABLES**

Alexandre Siles

## **SOMMAIRE ABRÉGÉ**

Beaucoup de nouvelles applications industrielles exigent que l'onduleur et le moteur soient à des endroits séparés. Ainsi, il faut souvent avoir recours à des câbles pour les raccorder. Ceci nécessite donc d'utiliser de longs câbles d'alimentation qui peuvent avoir des longueurs allant jusqu'à plus de 100 mètres. Or ces longs câbles apportent des surtensions aux bornes des moteurs, ce qui peut abîmer l'isolation des enroulements du moteur et aboutir à leur endommagement prématuré. De plus les transistors IGBT utilisés ont des fréquences de commutation très élevées et permettent de faire passer des signaux MLI à des tensions plus élevées que les autres transistors. Tandis que la haute fréquence de commutation des transistors améliore de manière significative les performances de l'onduleur, la rapide élévation de tension, caractérisée par un important  $dv/dt$ , a des effets nuisibles sur l'isolation du moteur.

Nous allons utiliser un modèle de moteur haute fréquence que nous implémenterons sous Simulink afin de pouvoir prévoir ces surtensions. Ensuite, nous validerons notre modèle en vérifiant nos résultats de simulation avec des résultats pratiques. Puis grâce à des filtres, nous réduirons ces surtensions afin qu'elles ne soient pas destructrices pour les moteurs.

# **ANALYSE ET SIMULATION DES SURTENSIONS AUX BORNES DU MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ PAR DES LONGS CABLES**

Alexandre Siles

## **SOMMAIRE**

Beaucoup de nouvelles applications industrielles exigent que l'onduleur et le moteur soient à des endroits séparés. Ainsi, il faut souvent avoir recours à des câbles pour les raccorder. Ceci nécessite donc d'utiliser de longs câbles d'alimentation qui peuvent avoir des longueurs allant jusqu'à plus de 100 mètres. Or ces longs câbles apportent des surtensions aux bornes des moteurs, ce qui peut abîmer l'isolation des enroulements du moteur et aboutir à leur endommagement prématuré. De plus les transistors IGBT utilisés ont des fréquences de commutation très élevés et permettent de faire passer des signaux MLI à des tensions plus élevées que les autres transistors. Tandis que la haute fréquence de commutation des transistors améliore de manière significative les performances de l'onduleur, la rapide élévation de tension, caractérisée par un important  $dv/dt$ , a des effets nuisibles sur l'isolation du moteur.

Nous allons utiliser un modèle de moteur haute fréquence que nous implémenterons sous Simulink afin de pouvoir prévoir ces surtensions. Ensuite, nous validerons notre modèle en vérifiant nos résultats de simulation avec des résultats pratiques. Puis grâce à des filtres, nous réduirons ces surtensions afin qu'elles ne soient pas destructrices pour les moteurs.

## **ANALYZE AND SIMULATION OF OVERVOLTAGES ON THE INDUCTION MOTOR INSULATION SUPPLIED WITH LONG CABLES**

Alexandre Siles

### **ABSTRACT**

Many new industrial applications require that the inverter and the motor be in separate places. Thus, it is often necessary to have recourse to cables to connect them. This requires the use of long electric cables that have lengths reaching more than 100 meters. However, these long cables bring overvoltages at the motor terminals, which can damage the winding insulation of the motor and lead to their premature damage. Moreover, transistors IGBT used in inverters have very high frequencies of commutation and they allow higher voltage than the others transistors. While the high frequency of commutation of the transistors significantly improves the performances of the inverter, the rapid rise in voltage, characterized by a significant  $dv/dt$ , has harmful effects on the insulation of the motor.

We will use a high frequency model of the induction motor implemented under Simulink in order to observe these overvoltages. Then we will validate our simulation model with practical results. Finally, we will use filters to reduce these overvoltages so that they are no longer harmful to the motor insulation.

## AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Ce document présente les travaux que j'ai effectués dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique de l'école de technologie supérieure.

En utilisant un modèle de représentation de moteur pour les hautes fréquences, nous allons étudier et représenter les surtensions qui apparaissent aux bornes du moteur asynchrone triphasé lors de l'utilisation d'un câble pour relier le moteur à l'onduleur. Ma contribution se situe au niveau du modèle sous Simulink et de la validation expérimentale de ce modèle. Ce projet m'a été proposé par M. Louis-A. Dessaint à l'automne 2004.

J'aimerais d'ailleurs remercier le professeur Louis-A. Dessaint pour la confiance qu'il m'a accordée en me confiant ce projet.

J'aimerais également remercier M. Handy Fortin Blanchette pour le support qu'il m'a fourni dans le cadre de ce travail.

Et de tout mon cœur je remercie ma famille et mon amie, qui m'ont supporté moralement lors de ma maîtrise.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE.....	i
ABSTRACT .....	ii
AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	x
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE.....	3
1.1 Revue de la littérature .....	3
1.2 Problématique .....	4
CHAPITRE 2 ÉTUDE THÉORIQUE .....	6
2.1 Théories des réflexions sur les câbles .....	6
2.2 Explication de ce phénomène dans notre cas .....	10
2.3 Coefficients de réflexion des éléments du système .....	14
2.3.1 Coefficient de réflexion du moteur .....	14
2.3.2 Coefficient de réflexion de l'onduleur .....	15
2.3.3 Schéma bloc équivalent du système.....	16
2.4 Études des filtres.....	18
2.4.1 Filtre RC aux bornes du moteur.....	18
2.4.2 Filtre RLC en sortie de l'onduleur .....	22
2.4.3 Filtre RLC aux bornes du moteur .....	29
CHAPITRE 3 MODÉLISATION ET IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES .....	31
3.1 Description du modèle du moteur.....	31
3.2 Détermination des impédances du moteur grâce au RLC meter .....	32
3.2.1 Présentation du RLC Meter .....	32
3.2.2 Description des mesures d'impédances.....	34
3.2.3 Identification des paramètres du moteur .....	41
3.2.4 Mesures des impédances du moteur.....	43
3.2.5 Calcul des paramètres du moteur .....	47
3.3 Identification des paramètres du câble grâce au RLC meter.....	47
3.3.1 Explications sur les mesures.....	47

3.3.2	Détermination des paramètres du câble .....	49
CHAPITRE 4	SIMULATION .....	51
4.1	Simulation de l'entraînement avec SPS .....	51
4.1.1	Simulation avec un câble d'un mètre .....	53
4.1.2	Simulation avec un câble de cinq mètres .....	54
4.1.3	Simulation avec un câble de dix mètres .....	55
4.1.4	Simulation pour un câble de quinze mètres .....	56
4.1.5	Simulation pour un câble de vingt mètres .....	56
4.2	Utilisation de filtres pour réduire la surtension .....	58
4.2.1	Utilisation d'un Filtre RC aux bornes du moteur .....	58
4.2.2	Utilisation d'un Filtre RLC aux bornes du moteur .....	60
4.2.3	Utilisation d'un Filtre inductif en sortie de l'onduleur .....	62
4.2.4	Utilisation d'un Filtre RLC en sortie de l'onduleur .....	64
CHAPITRE 5	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX .....	67
5.1	Description du contrôleur .....	67
5.1.1	Etude du contrôleur .....	67
5.1.2	Branchement du contrôleur MC68832 au pont triphasé à IGBT .....	70
5.2	Fonctionnement de l'onduleur .....	71
5.3	Description du montage pratique .....	71
5.4	Détermination des surtensions .....	79
5.4.1	Fonctionnement du montage avec un câble d'un mètre .....	80
5.4.2	Fonctionnement du montage avec un câble de cinq mètres .....	82
5.4.3	Fonctionnement du montage avec un câble de dix mètres .....	81
5.4.4	Réduction de la surtension avec un filtre RC .....	82
CHAPITRE 6	COMPARAISON DES RÉSULTATS ET RECOMMANDATION .....	87
6.1	Comparaison des résultats .....	87
6.1.1	Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de un mètre .....	87
6.1.2	Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de cinq mètres .....	89
6.1.3	Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de dix mètres .....	90
6.1.4	Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de dix mètres avec un filtre RC aux bornes du moteur .....	91
6.2	Recommandation .....	93
CONCLUSION	.....	95
Tableau I	: Tableau récapitulatif des résultats .....	93



## ANNEXES

1 : IGBT utilisés .....	97
2 : HCPL-316J.....	100
3 : Moteur triphasé sous SPS .....	102
BIBLIOGRAPHIE.....	104

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Système Onduleur-Câble-Moteur ..... 7
Figure 2	Schéma d'une ligne de transmission ..... 13
Figure 3	Processus de réflexion dans le cas d'un circuit ouvert ..... 17
Figure 4	Processus de réflexion ..... 19
Figure 5	Schéma bloc équivalent de la tension à la sortie de l'onduleur ..... 23
Figure 6	Schéma bloc équivalent de la tension aux bornes du moteur ..... 25
Figure 7	Filtre RC de terminaison aux bornes du moteur ..... 26
Figure 8	Schéma du montage avec ajout du filtre RC aux bornes du moteur ..... 26
Figure 9	Schéma du montage avec ajout d'un filtre RLC en sortie de l'onduleur ..... 30
Figure 10	Filtre RLC en sortie de l'onduleur ..... 31
Figure 11	Filtre RLC aux bornes du moteur ..... 36
Figure 12	Représentation par phase du modèle de moteur haute fréquence ..... 39
Figure 13	Photo du RLC Meter ..... 40
Figure 14	Représentation des enroulements statoriques du moteur ..... 40
Figure 15	Représentation des enroulements statoriques du moteur utilisé ..... 43
Figure 16	Représentation en étoile des enroulements statoriques du moteur ..... 44
Figure 17	Représentation en double étoile des enroulements statoriques du moteur ..... 45
Figure 18	Représentation en double étoile des enroulements statoriques de moteur (2) ..... 46
Figure 19	Mesure de l'impédance phase-neutre du moteur ..... 47
Figure 20	Mesure de l'impédance phase-masse du moteur ..... 48
Figure 21	Réponse en fréquence de l'impédance Phase-Neutre ..... 50
Figure 22	Diagramme de bode de l'impédance Phase-Neutre ..... 51

Figure 23	Réponses en fréquence de l'impédance Phase-Masse.....	52
Figure 24	Représentation des capacités internes au câble.....	53
Figure 25	Câble de un mètre utilisé au cours de nos mesures.....	55
Figure 26	Représentation monophasé du câble.....	56
Figure 27	Montage Onduleur-câble-moteur sous SPS.....	57
Figure 28	Signal MLI sortant de l'onduleur.....	58
Figure 29	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre entre le moteur et l'onduleur.....	59
Figure 30	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres entre le moteur et l'onduleur.....	60
Figure 31	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur.....	61
Figure 32	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de quinze mètres entre le moteur et l'onduleur.....	62
Figure 33	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de vingt mètres entre le moteur et l'onduleur.....	63
Figure 34	Montage sous Simulink avec le filtre RC aux bornes du moteur.....	64
Figure 35	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre RC aux bornes du moteur.....	65
Figure 36	Montage sous Simulink avec le filtre RLC aux bornes du moteur.....	66
Figure 37	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre RLC aux bornes du moteur.....	67
Figure 38	Montage sous Simulink avec le filtre inductif aux bornes de l'onduleur.....	68
Figure 39	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre inductif aux bornes de l'onduleur.....	69
Figure 40	Montage sous Simulink avec le filtre RLC aux bornes de l'onduleur.....	70
Figure 41	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre RLC aux bornes de l'onduleur.....	71
Figure 42	Topologie du montage pratique.....	72
Figure 43	Photo du contrôleur MC68332.....	73
Figure 44	Schéma du branchement du contrôleur à l'onduleur.....	74
Figure 45	Charge triphasée reliée à un pont (1).....	75

Figure 46	Charge triphasée reliée à un pont (2).....	76
Figure 47	Photo du montage en entier.....	77
Figure 48	Photo de la partie génération des impulsions (1).....	78
Figure 49	Photo de la partie génération d'impulsions (2).....	79
Figure 50	Photo de l'onduleur.....	80
Figure 51	Photo des circuits d'attaque reliés aux IGBT.....	81
Figure 52	Photo de la source CC reliée à l'onduleur.....	82
Figure 53	Photo du câble partant de l'onduleur.....	83
Figure 54	Photo du câble allant aux bornes du moteur.....	84
Figure 55	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre entre le moteur et l'onduleur.....	85
Figure 56	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres entre le moteur et l'onduleur.....	86
Figure 57	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur.....	87
Figure 58	Photo du filtre RC.....	88
Figure 59	Photo du moteur sans filtre.....	89
Figure 60	Photo du moteur avec un filtre RC.....	90
Figure 61	Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur et un filtre RC aux bornes du moteur.....	91
Figure 62	Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre.....	92
Figure 63	Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre (2).....	93
Figure 64	Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres.....	94
Figure 65	Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres.....	95
Figure 66	Tension différentielles aux bornes du moteur avec un filtre RC.....	96

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

SPS	SimPowerSystems
CC	Courant continu
TPU	Time process unit
MC68332	Contrôleur modèle 68332 de Motorola
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
GTO	Gate Turn Off Thyristors
BJT	Bipolar junction transistor
L	Inductance par unité de longueur, H
C	Capacité par unité de longueur, F
$v$	Vitesse de propagation
$Z_0$	Impédance caractéristique du câble
$L_s$	Inductance série, H
$R_s$	Résistance série, $\Omega$
$C_p$	Capacité parallèle, F
RC	Coefficient de reflexion
$Z_T$	Impédance de terminaison
$K_G$	Coefficient de réflexion aux bornes de l'onduleur
$K_L$	Coefficient de réflexion aux bornes du moteur
$l$	Longueur du câble, m
$\tau$	Temps de retard de propagation de l'onde aux bornes du moteur
U(s)	Transformée de Laplace de u(t)
$R_f$	Résistance du filtre, $\Omega$
$C_f$	Capacité du filtre, F
$L_f$	Inductance du filtre, H
$Z_{pn}$	Impédance Phase-neutre, $\Omega$
$Z_{pm}$	Impédance Phase-masse, $\Omega$

$F_{BASSE}$	Fréquence la plus basse dans la mesure d'impédance, Hertz
$F_{HAUTE}$	Fréquence la plus haute dans la mesure d'impédance, Hertz
$F_{P\acute{o}le-ZPN}$	Fréquence du premier pôle dans la réponse en fréquence de l'impédance Phase-neutre, Hertz
$F_{Z\acute{e}ro-ZPN}$	Fréquence du premier zéro dans la réponse en fréquence de l'impédance Phase-neutre, Hertz

## INTRODUCTION

Le transistor est un élément important de l'onduleur car c'est lui qui fixe le temps de montée du signal MLI et la tension de ce signal. Le problème qui peut se produire en utilisant une commande avec des IGBT est en l'occurrence des transitoires à haute tension sur les bornes du moteur qui peuvent produire une surtension potentiellement destructrice de l'isolation du moteur (Von Jouanne, 1996). Un phénomène connu sous le nom de tension réfléchie ou effet des lignes de transmission. Ce phénomène se produit quand une commande est installée avec un câble d'une certaine longueur entre l'onduleur et le moteur. Le fait que l'onduleur et le moteur soient à des endroits différents est commun en Amérique du nord, c'est pour cela que la majorité des problèmes viennent de là-bas, au contraire en Europe, l'onduleur et le moteur sont aussi proche que possible. Ce qui explique que l'Europe soit moins touché par ces phénomènes. Les câbles reliant le moteur représentent une impédance aux impulsions de tension de l'onduleur MLI. Ces câbles contiennent les valeurs significatives de l'inductance et de la capacité qui sont proportionnelles à leur longueur. À chaque passage d'un signal sur le câble, une réflexion se produira. La vitesse de ce signal sur le câble dépendant de la capacité et de l'inductance du câble. De plus, le temps de montée du dispositif de commutation et la longueur du câble déterminent la valeur que la surtension peut atteindre.

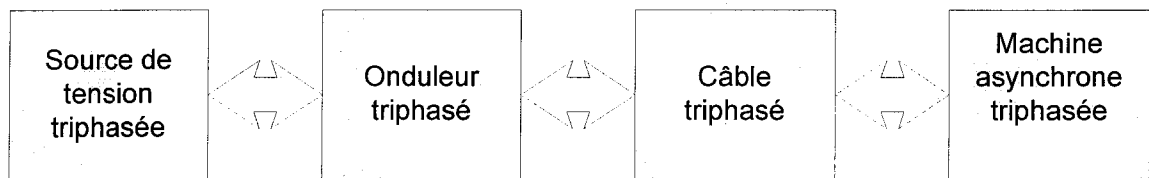


Figure 1 Système Onduleur-Câble-Moteur

Il est important de comprendre que cette réflexion se produit indépendamment du type de dispositif de commutation utilisé pour l'onduleur. Les installations à base d'IGBT, de GTO et BJT sont toutes touchées par ce phénomène de réflexion dont l'amplitude peut être égale à deux fois la tension du bus CC, voir même dans certains cas être encore plus élevée.

Alors que ce phénomène a été présent depuis longtemps, il est venu au premier plan avec l'introduction d'onduleurs ayant un bus CC de 460 volts ou de 575 volts à base d'IGBT. Pour la plupart, les applications de 230 volts sont inchangées parce que les amplitudes reflétées de tension sont inférieures à l'isolation typique des moteurs, qui est identique à un moteur de 460 volts. Tandis qu'un certain nombre de cas de dégâts de moteur ont été répertoriés avec l'utilisation des onduleurs à base de BJT et de GTO, ils ont été généralement restreints pour de longs câbles (100 mètres et plus). C'est compréhensible quand nous nous rappelons que le temps de montée du dispositif de commutation détermine la distance à laquelle l'amplitude reflétée de tension atteint son maximum. Le temps de montée d'un GTO ou d'un BJT étant bien plus élevé que celui d'un transistor IGBT, laissant des longueurs de câble beaucoup plus longues avant que la tension maximale permise aux bornes du moteur soit atteinte. Pendant que les avantages des dispositifs ayant des temps de montée plus rapides (fréquence accrue avec la perte de commutation minimale) ont été réalisés, leur utilisation dans la construction d'entraînement a augmentée. Il existe plusieurs phénomènes destructeurs dans ce montage, particulièrement la surtension en mode différentiel et une élévation du courant en mode commun. Dans cette étude, nous allons étudier la surtension en mode différentiel et nous partirons du principe qu'une limitation de la surtension limitera aussi l'élévation du courant en mode commun. En installant une génération courante à base d'IGBT dans les mêmes conditions qu'une commande plus ancienne, cela peut avoir comme conséquence d'augmenter le phénomène de tension réfléchie et d'endommager le moteur. Prévoir la surtension permettra d'éviter de tels dégâts.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

#### 1.1 Revue de la littérature

Le travail effectué dans ce mémoire consiste à valider un modèle de simulation permettant de représenter les surtensions aux bornes des moteurs dans certaines conditions (longueur du câble et temps de montée du signal MLI).

Nous avons trouvé plusieurs publications concernant les surtensions aux bornes des moteurs dues aux câbles d'alimentations. A l'heure actuelle, il ne semble pas y avoir de simulateur permettant de faire varier la longueur du câble et de jouer sur le temps de montée des impulsions qui soit utilisée sous Simulink. Les simulations actuelles permettent surtout de faire apparaître une surtension et de la supprimer en modélisant les composants (onduleur, câble, moteur) par des formules mathématiques. C'est-à-dire en modélisant les coefficients de réflexion de l'onduleur et du moteur.

Ainsi, il y a notamment S. Lee et K. Nam (2000) qui en remplaçant les coefficients de réflexions de l'onduleur et du moteur par des expressions dans le domaine de Laplace réussissent à simuler les surtensions et à les réduire. Ils utilisent une représentation haute fréquence du moteur qui est remplacé par une résistance et une capacité. Cette représentation permet ainsi de simuler les surtensions sur Simulink grâce à des fonctions de transfert. Ayant testé ce modèle, je dois dire qu'il marche relativement bien. Toutefois, la simplicité du modèle amène à se poser des questions quand à sa précision. Il y a aussi G. Skibinski, R. Kerkman, D. Leggate, J. Pankau et D. Schlegel (2001) qui utilisent cette représentation de moteur haute fréquence afin de simuler ces surtensions sous Simulink. Ils peuvent alors représenter le système à l'aide de gains et de retards.

Une autre approche de simulation est faite par Y. Dupraz, F. Cornu, P-F. Gaythey, C. Yechouroun et Vaclavik (2002) qui utilisent des équations différentielles pour représenter chaque cellule du câble et utilisent ensuite Simplorer pour simuler leur système. C'est une modélisation relativement lourde en programmation, pour autant elle semble être assez précise.

Un autre article intéressant sur les surtensions aux bornes des moteurs est celui de A. Von Jouanne et P.N Enjetti (1995) qui est une des premières publications sur le sujet. Là encore, ils représentent les surtensions en utilisant des fonctions mathématiques afin d'obtenir les coefficients de réflexion du moteur et de l'onduleur. Dans cet article, on s'intéresse plutôt à la longueur critique du câble en fonction du temps de montée. C'est-à-dire, la longueur de câble à ne pas dépasser pour différentes valeurs de temps de montée. Cet article permet de bien comprendre le problème et ses enjeux.

Pour finir, nous allons utiliser la représentation de A.F Moreira, T.A Lipo, G. Venkataramanam et S. Bernet (2001) qui permet de simuler un moteur en haute fréquence. Ils ont utilisé un plan de travail afin d'obtenir ce modèle, grâce à plusieurs mesures effectuées sur le moteur, et ont ensuite validé leur modèle grâce à des résultats expérimentaux. Leur modèle étant une amélioration du modèle de moteur haute fréquence précédemment établi par A. Boglietti et E. Carpaneto (2000).

## **1.2 Problématique**

Les surtensions aux bornes des moteurs peuvent être destructrices pour celui-ci. Dans un premier temps, il serait utile de pouvoir simuler le système d'entraînement électrique composé de l'onduleur, du câble et du moteur. En effet, ceci permettra de pouvoir examiner s'il y a des surtensions qui apparaissent et de déterminer leur valeur, ainsi cela évitera des inconvénients. Pouvoir faire varier les deux paramètres dont dépendent les surtensions, c'est-à-dire le temps de montée des impulsions et la longueur du câble

ajoutera alors des avantages quant à savoir si l'on peut changer un peu la configuration actuelle.

Ainsi, grâce à un tel système, on pourra déterminer pour un système donné (câble et moteur) les caractéristiques maximales possibles (longueur du câble et temps de montée du signal MLI). Ce qui permettra d'aller au plus près des performances optimales du système (rapidité, éloignement). Nous voyons donc l'intérêt et la justification d'une telle simulation.

Ensuite, il faudrait pouvoir filtrer ces surtensions, ou du moins les diminuer à un niveau acceptable qui ne constitue pas de danger pour le moteur. Plusieurs possibilités existent :

- Un filtre RC aux bornes du moteur
- Un filtre RLC aux bornes du moteur
- Un filtre RLC à la sortie de l'onduleur

Nous allons simuler toutes ces méthodes et pour certaines les comparer à des résultats pratiques. Nous allons ainsi déterminer leurs efficacités.

## CHAPITRE 2

### ÉTUDE THÉORIQUE

#### 2.1 Théories des réflexions sur les câbles

Afin de bien comprendre le phénomène qui survient dans le cadre de notre expérience, il convient de faire un petit rappel sur les phénomènes de réflexions sur les câbles. La caractéristique commune de tous ces câbles est qu'ils se composent de longues paires linéaires de conducteurs avec un espacement uniforme. Comme un câble a une longueur physique finie, les signaux électriques ont aussi besoin d'un temps fini pour traverser le câble. Si ce temps devient important par rapport à la période d'un cycle de la tension d'excitation, alors le phénomène couramment appelé « Transmission line effects » commence à apparaître.

Les caractéristiques de propagation des signaux sur des lignes de transmission peuvent être déterminées par une solution des équations de base. Nous analyserons tout d'abord une ligne idéale qui n'a aucune résistance de série et aucune résistance en parallèle. Il est plus simple d'observer le phénomène sur une ligne idéale, et une fois qu'il est comprise, il sera alors possible de visualiser le comportement d'une ligne de transmission non idéale. Notre modèle d'étude est celui de la figure 2, la chute de tension dans une section de ligne est égale à  $-\frac{L\partial i}{\partial t}$  où  $L$  représente l'inductance par unité de longueur. Si la longueur considérée est  $dx$ , alors l'inductance pour cette longueur est  $L\Delta x$  et la tension devient  $v = -\frac{L\partial i}{\partial t}\Delta x$  (Sueker, 1999).

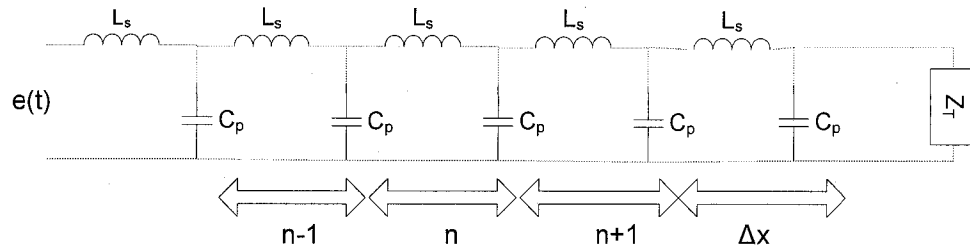


Figure 2 Schéma d'une ligne de transmission

Or

$$v = \Delta x \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2-1)$$

L'équation peut être écrite de la façon suivante :

$$\Delta x \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{L \partial i}{\partial t} \Delta x \quad (2-2)$$

En divisant de chaque côté par  $dx$  et en substituant la notation aux dérivées partielles, l'équation fondamentale devient :

$$\frac{v}{x} = - \frac{L i}{t} \quad (2-3)$$

De la même façon, le courant est :

$$-\Delta x \frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial e}{\partial t} \Delta x \quad (2-4)$$

D'où :

$$- \frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2-5)$$

On résout isolément alors le courant et la tension, et l'on obtient les équations suivantes :

$$LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = 0 \quad (2-6)$$

Et

$$LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = 0 \quad (2-7)$$

Ces équations peuvent être résolues par des méthodes de Fourier. La solution des équations (2-5) et (2-6) est de la forme suivante :

$$V(x,t) = V^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) + V^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \quad (2-8)$$

Et

$$I(x,t) = I^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) + I^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \quad (2-9)$$

Où  $v$  est la vitesse de propagation, définie de la façon suivante :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-10)$$

Dans la plupart des lignes (Sueker, 1999), la vitesse de propagation et l'impédance caractéristique sont déterminés par les dimensions physiques de la ligne et de la constante diélectrique du milieu isolant. L'impédance caractéristique du câble  $Z_0$  est importante car elle est reliée à l'impédance de terminaison  $Z_T$ . Alors le coefficient de réflexion (RC) est égal à :

$$RC = \frac{|Z_T - Z_0|}{|Z_T + Z_0|} \quad (2-11)$$

Où  $Z_0$  est l'impédance caractéristique, définie de la façon suivante :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-12)$$

Ce coefficient décrit le comportement des tensions réfléchies quand elles rencontrent l'extrémité de la ligne. Un circuit ouvert donne un coefficient de réflexion de 1, un court-circuit donne un coefficient de réflexion égal à -1, et une impédance de terminaison égale à :  $Z_T = Z_0$  donne un coefficient de réflexion égal à 0.

Une tension incidente de la valeur égale à  $U$  produira une tension réfléchie se dirigeant dans la direction opposée avec la valeur  $RC \times U$  quand elle atteint l'extrémité de la ligne. Ce qui est dit présentement pour les tensions est aussi valable pour les courants. La tension à un point quelconque sur la ligne est la somme des tensions incidentes et des tensions réfléchies à cet endroit et à ce temps. Les tensions de déplacement peuvent se refléter dans les deux sens suivant la ligne jusqu'à ce qu'elles soient finalement amorties par les pertes de ligne que nous avons ignorées dans le cas présent. Quand la ligne est terminée avec son impédance caractéristique, alors seulement dans ce cas, il n'y a aucune tension réfléchie et les tensions et les courants sont uniformes sur toute la longueur de la ligne.

La figure 3 illustre ce phénomène dans le cas d'un circuit ouvert. On voit bien que lorsqu'elle arrive à l'extrémité du circuit, la tension est réfléchie avec un coefficient égal à 1 et qu'un court-circuit donne un coefficient de réflexion égal à -1.

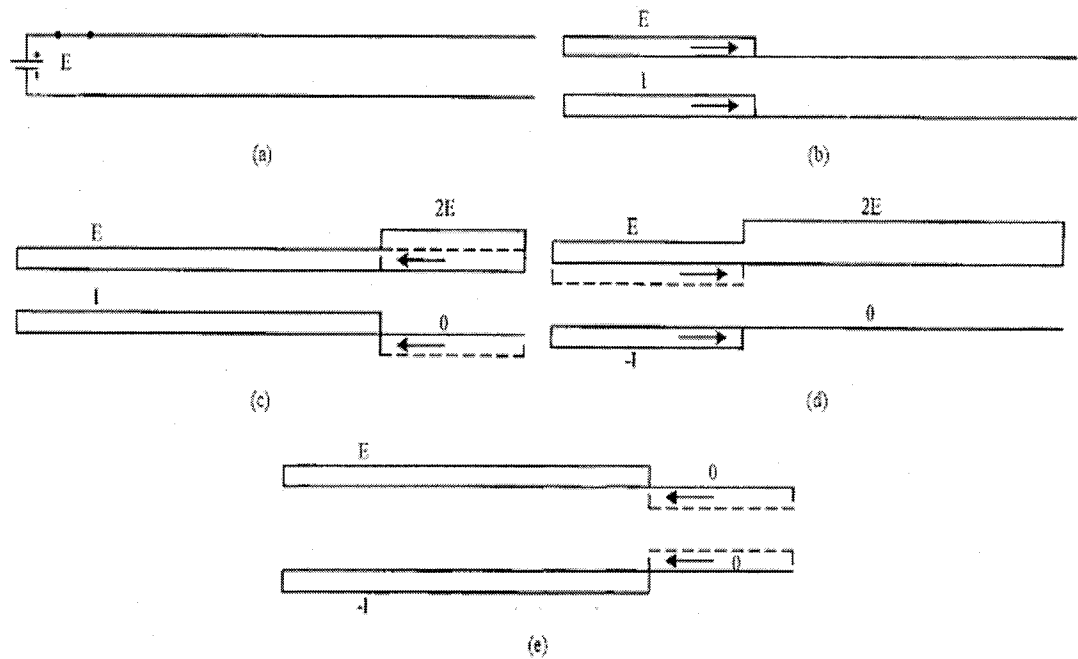


Figure 3 Processus de réflexion dans le cas d'un circuit ouvert  
(Von Jouanne, 1995)

## 2.2 Explication de ce phénomène dans notre cas

Dans le cas du système Onduleur-Cable-Moteur, le phénomène de réflexion intervient de la même façon, La figure 4 illustre cette réflexion. Pour le moment, nous ne nous intéresserons pas au modèle des composants, nous présenterons seulement le processus de réflexion. On a alors :

- $K_G$ , qui représente le coefficient de réflexion aux bornes de l'onduleur
- $K_L$ , qui représente le coefficient de réflexion aux bornes du moteur

Le diagramme de Bounce (Lee, 2000) représenté à la figure 4 illustre alors les déplacements de tension de la ligne de transmission qui s'effectuent entre l'onduleur et les bornes du moteur. Ceci à l'instant où un  $u(t)$  de tension est injecté en entrée du



câble. La longueur du câble est  $l$  et le temps de retard de propagation de l'onde aux bornes du moteur est égal à  $\tau$ ,  $U(s)$  est la transformée de Laplace de  $u(t)$ .

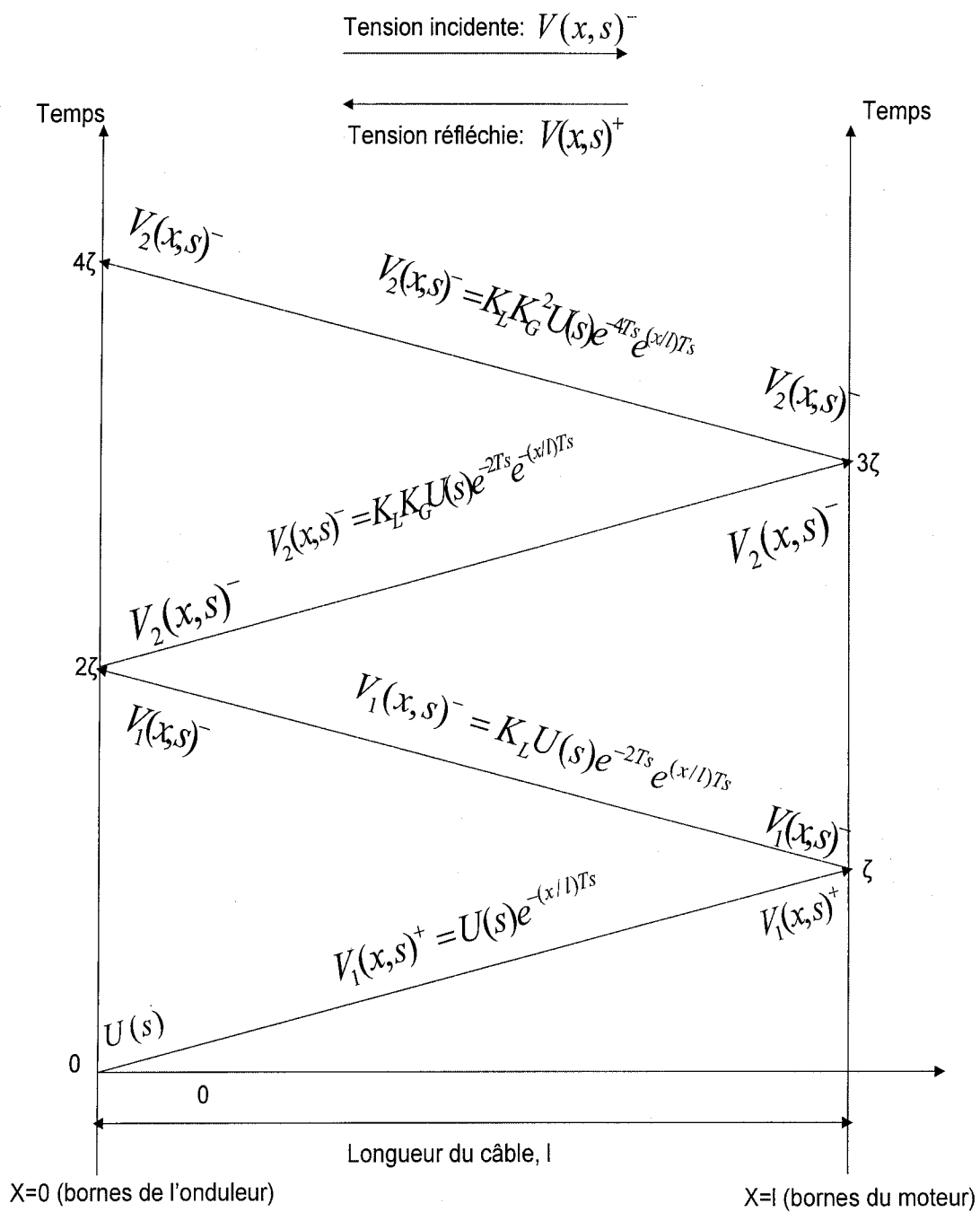


Figure 4 Processus de réflexion dans le cas du système Onduleur-Câble-Moteur

On voit bien que la progression des tensions incidentes et réfléchies dépendent du temps  $t$  et de la position  $x$ . L'onduleur est situé à la position  $x = 0$  et le moteur à la position  $x = l$ . Deux axes temporels sont dessinés verticalement, l'un est à  $x = 0$  et l'autre à  $x = l$ . La tension d'entrée venant de l'onduleur (MLI) est notée  $u(t)$  et sa transformée de Laplace  $U(s)$ . Cette tension ayant un certain retard de transmission, elle est notée  $v_1(x, t)^+$  (S. Lee 2003), avec :

$$V_1(x, s)^+ = U(s)e^{-(x/l)Ts} \quad (2-13)$$

Et  $V_1(x, s)^+$  représentant la transformée de Laplace de  $v_1(x, t)^+$ . Le signe « + », signifie que le sens de la propagation est de l'onduleur vers le moteur. Cette vague incidente est alors réfléchi aux bornes du moteur avec un coefficient égal à  $K_L$ . La vague réfléchi est alors  $V_1(x, s)^-$ , où le signe « - » représente un sens de propagation du moteur vers l'onduleur. La valeur de  $V_1(x, s)^-$  est alors (Lee, 2003) :

$$V_1(x, s)^- = K_L U(s)e^{-2Ts} e^{(x/l)Ts} \quad (2-14)$$

Ce phénomène se reproduit lorsque cette vague réfléchi atteint les bornes de l'onduleur, une nouvelle vague réfléchi apparaît alors,  $V_2(0, s)^-$ , avec :

$$V_2(0, s)^- = K_G V_1(0, s)^- = K_L K_G U(s)e^{-2Ts} e^{-(x/l)Ts} \quad (2-15)$$

L'indice « 2 » est utilisé afin de noter la seconde propagation. Ce procédé se répète alors à l'infini.

### 2.3 Coefficients de réflexion des éléments du système

Nous avons expliqué précédemment à quoi étaient dues les surtensions, maintenant nous allons les quantifier et les exprimer en fonction des caractéristiques du montage.

### 2.3.1 Coefficient de réflexion du moteur

Nous notons alors comme précédemment  $u(t)$  comme étant la tension de l'onduleur MLI et sa transposition dans le domaine de Laplace  $U(s)$ , où  $s$  signifie l'opérateur de Laplace. En considérant le câble comme ligne de transmission, nous notons  $v(x,t)$  la tension partie à un point  $x$  de l'onduleur et sa transformée de Laplace  $V(x,s)$ . Par exemple,  $v(0,t)$  représente la tension aux bornes de l'onduleur et  $v(l,t)$  représente la tension aux bornes du moteur, si la longueur de câble est  $l$ . Les lignes de transmission transforment l'impédance d'une charge, c.-à-d., le moteur dans notre cas, en une autre valeur quand elle est vue du câble. Selon la *formule de transformation d'impédance*, l'impédance d'entrée vue sur les bornes de l'onduleur est donnée par (Lee, 2003):

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(j\omega l \sqrt{LC})}{Z_0 + Z_L \tanh(j\omega l \sqrt{LC})} \quad (2-16)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + K_L e^{-2Ts}}{1 - K_L e^{-2Ts}}, s = j\omega \quad (2-17)$$

Où

$$K_L = \frac{(Z_L - Z_0)}{(Z_L + Z_0)} \quad (2-18)$$

$K_L$  Représente le coefficient de réflexion aux bornes du moteur et  $\omega$  est la fréquence de fonctionnement.

Notons que le retard de propagation de l'onduleur aux bornes du moteur est égal à :

$$T = l\sqrt{LC} \quad (2-19)$$

### 2.3.2 Coefficient de réflexion de l'onduleur

Une fois  $Z_m$  obtenu, alors la tension sur les bornes de l'onduleur est donné par

$$V(0,s) = \frac{Z_m}{R_G + Z_m} U(s) \quad (2-20)$$

On déduit de (2-17) et de (2-20) :

$$V(0,s) = \frac{Z_0}{R_G + Z_0} \frac{1 + K_L e^{-2Ts}}{1 - K_L K_G e^{-2Ts}} U(s) \quad (2-21)$$

$$V(0,s) = \frac{1 - K_G}{2} \frac{1 + K_L e^{-2Ts}}{1 - K_L K_G e^{-2Ts}} U(s) \quad (2-22)$$

Où

$$K_G = (R_G - Z_0)/(R_G + Z_0) \quad (2-23)$$

$K_G$  Représente le coefficient de réflexion aux bornes de l'onduleur. On peut tirer un schéma fonctionnel de (2-22) comme l'illustre la figure 5 ( Lee, 2003).

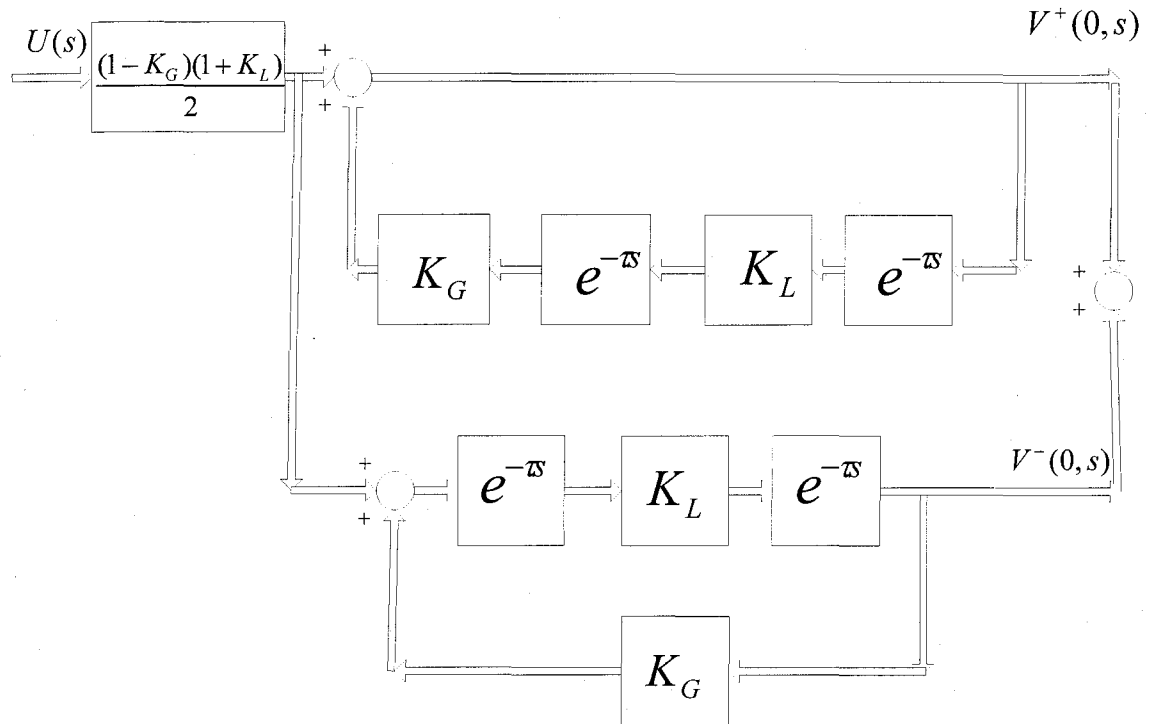


Figure 5 Schéma bloc équivalent de la tension en sortie de l'onduleur

### 2.3.3 Schéma bloc équivalent du système

En raison des effets de la ligne de transmission à haute fréquence, la tension  $V(l,s)$  est égale à la somme des déplacements avant  $V^+(l,s)$  et des déplacements arrière  $V^-(l,s)$ , c.-à-d. :

$$V(l,s) = V^+(l,s) + V^-(l,s) \quad (2-24)$$

Notons que sur la borne de moteur, les tensions de déplacement vers l'avant et en arrière sont reliées par le coefficient de réflexion  $K_L$  tels que

$$V^-(l,s) = K_L V^+(l,s) \quad (2-25)$$

Ainsi :

$$V(l, s) = V^+(l, s) + V^-(l, s) = (1 + K_L)V^+(l, s) \quad (2-26)$$

D'autre part, en incluant le temps de retard de transmission,  $\pm T$ , on obtient la tension aux bornes de l'onduleur telle que :

$$\begin{aligned} V(0, s) &= V^+(0, s) + V^-(0, s) \\ V(0, s) &= V^+(l, s)e^{Ts} + V^-(l, s)e^{-Ts} \\ V(0, s) &= (1 + K_L e^{-2Ts})e^{Ts}V^+(l, s) \end{aligned} \quad (2-27)$$

En conséquence, on obtient à partir de (2-26) et de (2-27) l'expression de boucle fermée :

$$V(l, s) = \frac{(1 + K_G)e^{-Ts}}{1 + K_L e^{-2Ts}} V(0, s) \quad (2-28)$$

$$V(0, s) = \frac{1 - K_G}{2} \frac{(1 + K_L)e^{-Ts}}{1 - K_L K_G e^{-2Ts}} U(s) \quad (2-29)$$

Normalement,  $R_G$  est très petit comparé à  $Z_0$ . Ainsi, le coefficient de réflexion  $K_G$  est approximé par -1 et donne ainsi :

$$\frac{(1 - K_G)}{2} = 1 \quad (2-30)$$

En utilisant (2-29), nous pouvons modéliser la ligne de transmission comme une boucle de rétroaction comme est montré par la figure 6 ( Lee, 2003).

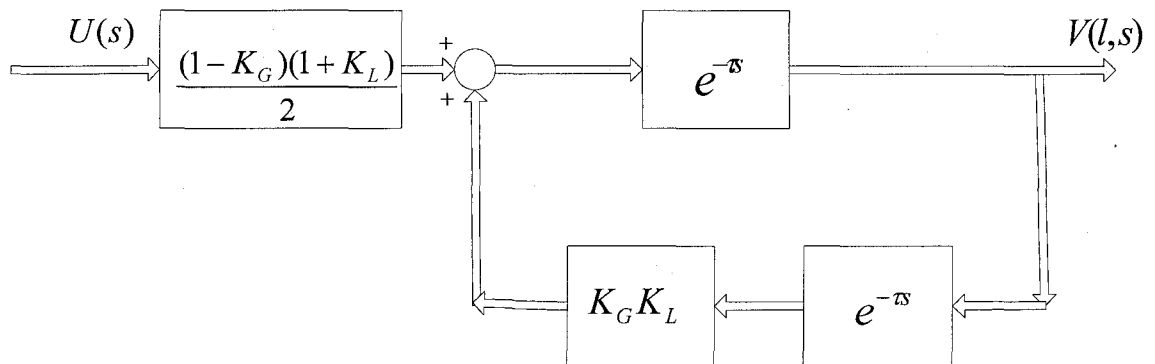


Figure 6 Schéma bloc équivalent de la tension aux bornes du moteur

Notons à partir de (2-22) et de (2-29) que les expressions de boucle fermée de  $V(0,s)$  et  $V(l,s)$  ont le même dénominateur.

## 2.4 Études des filtres

### 2.4.1 Filtre RC aux bornes du moteur

Une façon de réduire cette surtension est d'ajouter un filtre RC de terminaison. Les figures 7 et 8 illustrent cette technique.



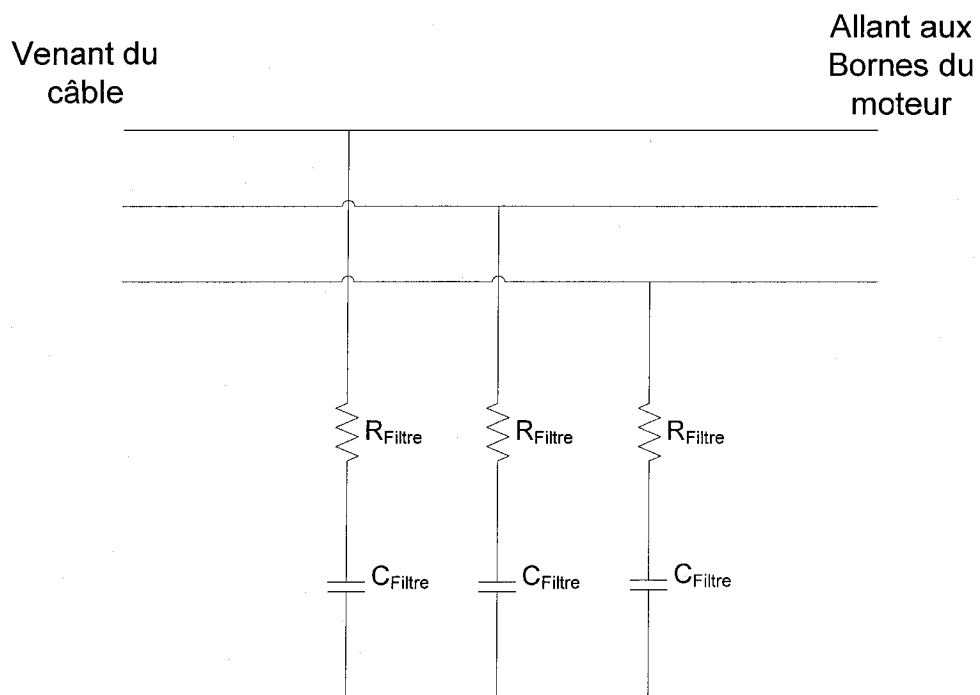


Figure 7 filtre RC aux bornes du moteur

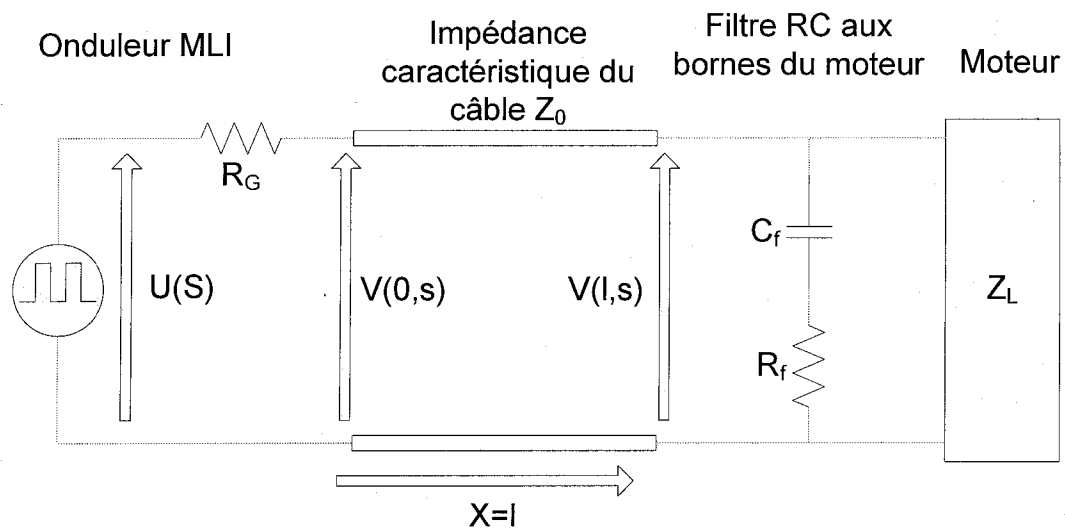


Figure 8 Schéma du montage avec ajout du filtre RC aux bornes du moteur (Lee, 2003)

Comme dans la section précédente, on considère que la MLI est représentée par une source idéale de tension. Le coefficient de réflexion étant toujours noté par

$$K_G \approx -1 \quad (2-29)$$

Ce qui donne alors :

$$K_L(s) = \frac{Z'_L - Z_0}{Z'_L + Z_0} = \frac{(R_f Z_L - R_f Z_0 - Z_L Z_0)C_f s + Z_L - Z_0}{(R_f Z_L + R_f Z_0 + Z_L Z_0)C_f s + Z_L + Z_0} \quad (2-30)$$

Où  $Z'_L$  est l'impédance d'entrée aux bornes du moteur (contenant le filtre RC).

On approxime  $K_L(s)$  de la façon suivante :

$$K_L(s) \approx \frac{(R_f - Z_0)C_f s + 1}{(R_f + Z_0)C_f s + 1} \quad (2-31)$$

Car

$$1 - \frac{Z_0}{Z_L} \approx 1 \quad (2-32)$$

Déterminons alors la transformée de Laplace de la tension incidente et de la tension réfléchie, que l'on note  $U_{inc}^{(1)}$  et  $U_{ref}^{(1)}$  (Lee, 2000), où l'exposant <sup>(1)</sup> signifie que ce sont les premières tensions incidente et réfléchie.

On a alors :

$$U_{ref}^{(1)}(s) = K_L(s)U_{inc}^{(1)}(s) \quad (2-33)$$

Et

$$U_{ref}^{(1)} = 1 - \frac{2Z_0}{(R_f + Z_0)} e^{-\frac{l}{(R_f + Z_0)C_f}} \quad (2-34)$$

Après un temps de retard  $T$ , à première réflexion apparaît aux bornes de l'onduleur et une seconde tension incidente revient aux bornes du moteur avec un autre retard  $T$ , d'où :

$$U_{inc}^{(2)} = K_G - \frac{2K_G Z_0}{(R_f + Z_0)} e^{-\frac{l-2T}{(R_f + Z_0)C_f}} \quad (2-35)$$

En ajoutant ces deux tensions, on obtient :

$$U_{ref}^{(1)}(t) + U_{inc}^{(1)}(t) = (1 + K_G) - \frac{2Z_0}{(R_f + Z_0)} \times (1 + K_G e^{\frac{2T}{(R_f + Z_0)C_f}}) e^{-\frac{l}{(R_f + Z_0)C_f}} \quad (2-36)$$

Or, comme

$$1 + K_G \approx 0 \quad (2-37)$$

On pose alors arbitrairement :

$$R_f = 0.5Z_0 \quad (2-38)$$

Et l'on choisit  $C_f$  de telle sorte que la partie restante soit nulle, D'où (Lee, 2000) :

$$C_f = \frac{4}{3} \times \frac{l \times C}{\ln\left(\frac{1}{|K_G|}\right)} \quad (2-39)$$

On a donc les paramètres de notre filtre.

Une autre approche (Lipo, 2001) qui consiste à caractériser le filtre en fonction du temps de montée et des paramètres du câble, nous permet de déterminer que

$$R_f = Z_0 \quad (2-40)$$

$$C_f = \frac{\tau_{Montée}}{0,1054 \times R_f} \quad (2-41)$$

Par la suite, cette approche sera beaucoup plus simple afin de calculer notre filtre.

#### **2.4.2 Filtres RLC en sortie de l'onduleur**

L'ajout d'un filtre passe-bas en sortie de la MLI permettra de diminuer considérablement l'effet de réflexion et donc d'éviter l'apparition d'une surtension destructrice aux bornes du moteur (Lee, 2003). Les figures 9 et 10 illustrent ce procédé.

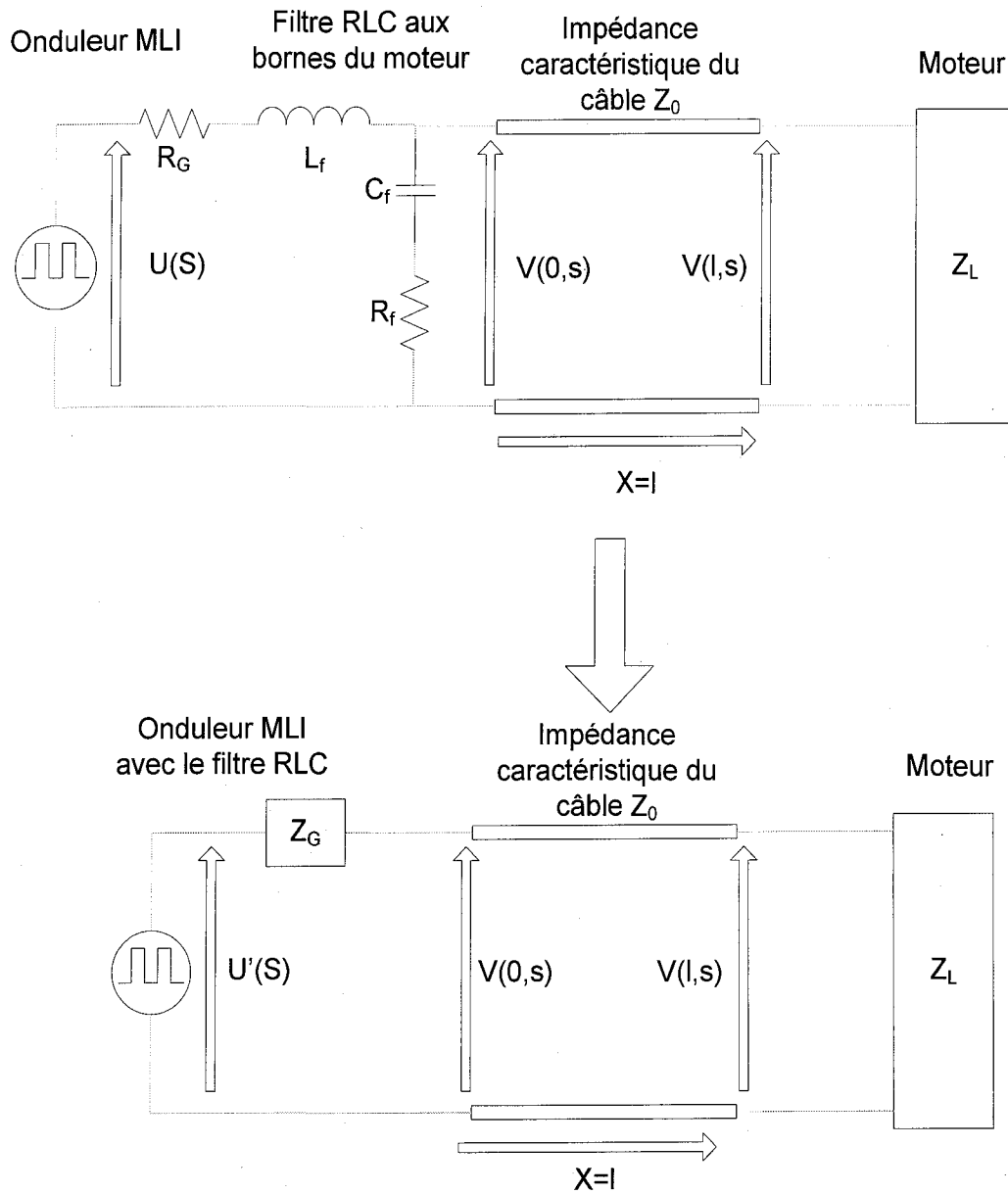


Figure 9 Schéma du montage avec ajout d'un filtre RLC en sortie de l'onduleur (Lee, 2003)

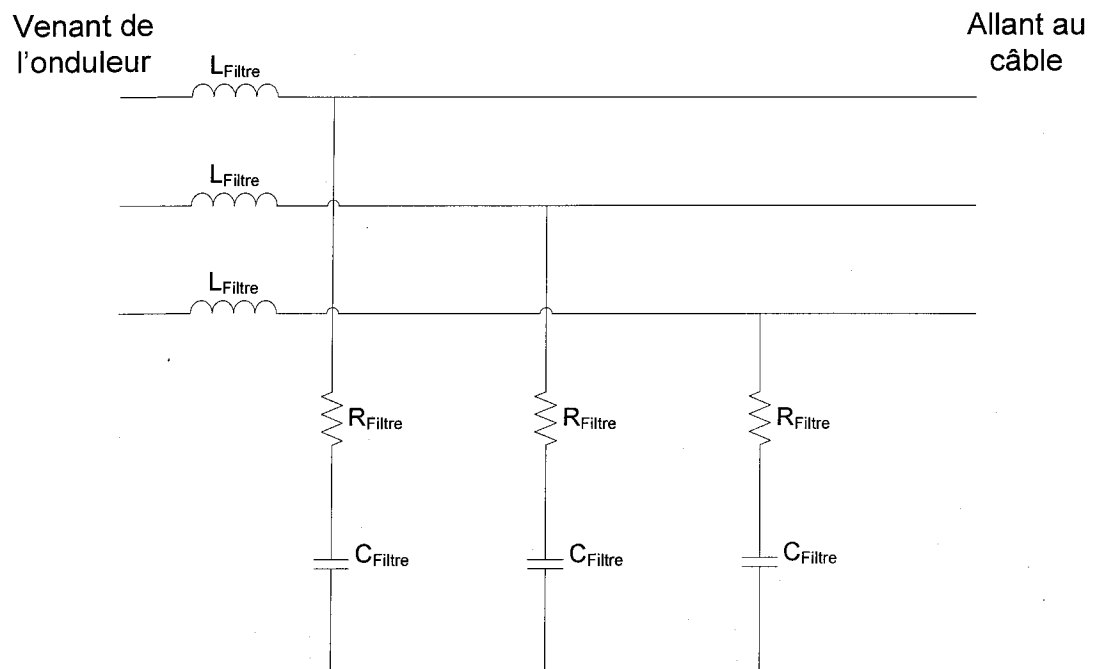


Figure 10 filtre RLC en sortie de l'onduleur

On a :

$$V(l, s) = \frac{1 - K'_G}{2} \frac{(1 + K_L)e^{-Ts}}{1 - K_L K'_G e^{-2Ts}} U'(s) \quad (2-42)$$

Où

$$K'_G = (Z_G - Z_0)/(Z_G + Z_0), \text{ avec } Z_G = (R_G + sL_f)/(R_f + (1/sC_f)) \quad (2-43)$$

Et

$$\frac{U'(s)}{U(s)} = \frac{(1 + sR_f C_f)}{(1 + s(R_f + R_G)C_f + s^2 L_f C_f)} \quad (2-44)$$

On pose

$$H_1(s) = \frac{1 - K_L K'_G e^{-2Ts}}{1 - K_L K'_G e^{-2Ts}} \quad (2-45)$$

Et,

$$H_2(s) = \frac{(R_G + Z_0)(1 + sR_f C_f)}{(R_G + Z_0) + s(L_f + 2R_G Z_0 C_f + Z_0^2 C_f) + 2s^2 Z_0 L_f C_f} \quad (2-46)$$

Il faut choisir  $R_f, L_f$  et  $C_f$  afin que le temps de montée soit suffisamment long pour éviter le doublement de la tension en sortie du câble (Lee, 2003).

Il faut tout d'abord poser

$$R_f = Z_0 \quad (2-47)$$

On a généralement

$$R_G \ll Z_0 \quad (2-48)$$

Ce qui aboutit à

$$K_G \approx -1 \quad (2-49)$$

On obtient alors :

$$H_1(s) = \frac{2s^2 + \frac{Z_0}{L_f} s + \frac{1}{L_f C_f}}{1 + K_L e^{-2ts} s^2 + \frac{Z_0}{L_f} s + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (2-50)$$

Et,

$$H_2(s) = \frac{\frac{Z_0}{L_f} s + \frac{1}{L_f C_f}}{2s^2 + \left( \frac{Z_0}{L_f} + \frac{1}{C_f Z_0} \right) s + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (2-51)$$

On peut aussi choisir  $L_f$  et  $C_f$  tels que (Lee, 2003):

$$Z_0 \gg \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (2-52)$$

Alors

$$\frac{Z_0}{L_f} = \frac{1}{C_f Z_0} \quad (2-53)$$

De plus, pour un  $T$  donné,  $Ts$  est très faible, ainsi

$$e^{-2Ts} \approx 1 \quad (2-54)$$

On obtient alors :

$$H_1(s) = \frac{2s^2 + \frac{Z_0}{L_f}s + \frac{1}{L_f C_f}}{\frac{2}{1+K_L}s^2 + \frac{Z_0}{L_f}s + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (2-55)$$

Et,

$$H_2(s) = \frac{\frac{Z_0}{L_f}s + \frac{1}{L_f C_f}}{2s^2 + \frac{Z_0}{L_f}s + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (2-56)$$

On peut alors obtenir

$$H(s) \equiv H_1(s)H_2(s) \quad (2-57)$$

D'où :

$$H(s) = \frac{\frac{Z_0}{L_f}s + \frac{1}{L_f C_f}}{\frac{2}{1+K_L}s^2 + \frac{Z_0}{L_f}s + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (2-58)$$



Ainsi, le dénominateur de cette fonction du second ordre peut être décrite de la façon suivante (Lee, 2003) :

$$s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2 \quad (2-59)$$

Par analogie avec le dénominateur, on obtient :

$$\begin{cases} L_f = \frac{(1 + K_L)Z_0}{4\xi w_n} \\ C_f = \frac{2\xi}{w_n Z_0} \end{cases} \quad (2-60)$$

Pour avoir les conditions souhaitées, il faut alors :

$$\begin{cases} L_f \geq \frac{15(1 + K_L)K_L}{0.78 \times 4\xi} \times TZ_0 \approx 4.8(1 + K_L)K_L \times l \times L \\ C_f \geq \frac{2\xi \times 15K_L}{0.78} \times \frac{T}{Z_0} \approx 38.5K_L \times l \times C \end{cases} \quad (2-61)$$

Où

$$T = l\sqrt{LC} \text{ et } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-62)$$

On a donc tous les paramètres nécessaires à notre filtre.

Une autre approche (Lipo, 2001) qui consiste à caractériser le filtre en fonction du temps de montée et des paramètres du câble, nous permet de déterminer que

$$R_f = \frac{Z_0}{2} \quad (2-63)$$

$$\exp(-w_n \times \tau_{Monté})(1 + w_n \times \tau_{Monté}) = 0,9 \quad (2-64)$$

$$2w_n = \frac{2L_f + Z_0 R_f C_f}{L_f C_f (2R_f + Z_0)} \quad (2-65)$$

$$w_n^2 = \frac{Z_0}{L_f C_f (2R_f + Z_0)} \quad (2-66)$$

En résolvant ce système, on peut donc aisément trouver les paramètres de notre filtre. Par la suite, cette approche sera beaucoup plus simple afin de calculer notre filtre.

### 2.4.3 Filtre RLC aux bornes du moteur

Il existe un autre filtre qui consiste en un circuit RLC en sortie du moteur. Son étude mathématique n'est pas nécessaire, elle est en effet très proche de celle du filtre RC en sortie du câble. La figure 11 illustre ce filtre.

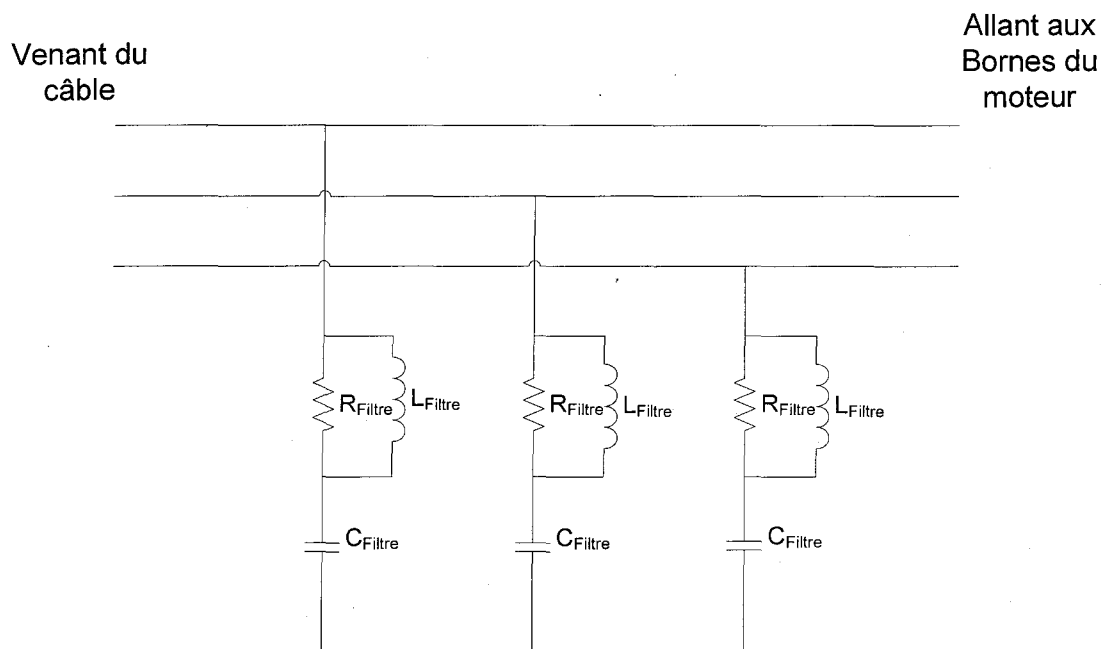


Figure 11 filtre RLC aux bornes du moteur

Les caractéristiques (Lipo, 2001) de ce filtre en fonction du temps de montée et des paramètres du câble, sont :

$$R_f = Z_0 \quad (2-67)$$

$$\exp(-w_n \times \tau_{Monté})(1 - w_n \times \tau_{Monté}) = 0,9 \quad (2-68)$$

$$\frac{1}{R_f C_f} = 2w_n \quad (2-69)$$

$$\frac{1}{L_f C_f} = w_n^2 \quad (2-70)$$

En résolvant ce système, on peut donc aisément trouver les paramètres de notre filtre.  
Par la suite, cette approche sera beaucoup plus simple afin de calculer notre filtre.

## CHAPITRE 3

### MODÉLISATION ET IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES

#### 3.1 Description du modèle du moteur

Un des éléments essentiels afin d'obtenir une analyse précise et fiable des surtensions est la représentation en haute fréquence de l'impédance d'entrée du moteur à courant alternatif. Elle doit aussi être valide dans une grande gamme de fréquences de l'impulsion d'entrée (le signal MLI). Afin de déterminer la surtension, il n'est en aucun cas nécessaire de vérifier comment s'effectue la distribution de la tension à l'intérieur des enroulements du moteur. En revanche, il est important de savoir quelle est l'impédance d'entrée du moteur et de savoir comment elle varie en fonction de la fréquence (Lipo, 2001).

Le présent modèle est une représentation par morceaux de l'impédance d'entrée du moteur. C'est une représentation par phase. Une partie du modèle sert à capter les basses fréquences, c'est le modèle  $d-q$  (représenté par l'inductance  $L_d$ ), tandis que les autres composants  $R-L-C$  sont nécessaires pour représenter les hautes fréquences. Les capacités entre la phase et la terre et entre les enroulements d'une phase jouent un rôle majeur dans les phénomènes hautes fréquences.

Le modèle basse fréquence est approximé par inductance  $L_d$ , qui est l'inductance de fuite du moteur. La capacité  $C_g$  représente la capacité entre la phase et la terre. Le paramètre  $R_g$  est ajouté afin de représenter les effets dissipatifs qui sont présents dans l'armature du moteur. Le circuit représenté par les paramètres  $R_l$ ,  $L_l$  et  $C_l$  sert à capturer les secondes résonances de l'impulsion venant du câble, qui sont dues à la

capacité entre les enroulements d'une phase. Le paramètre  $R_e$  est utilisé afin de représenter les pertes par courant de Foucault à l'intérieur du noyau magnétique. La figure 12 illustre ce modèle.

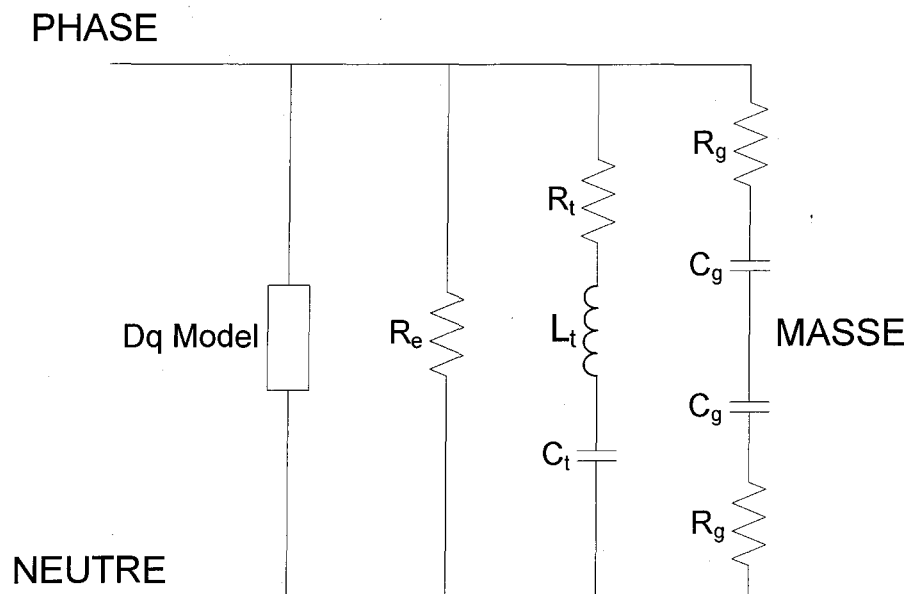


Figure 12 Représentation par phase du modèle de moteur haute fréquence

### 3.2 Détermination des impédances du moteur grâce au RLC meter

Afin d'obtenir le modèle de moteur précédemment établi, il nous est nécessaire de déterminer la réponse en fréquence de l'impédance phase-masse et la réponse en fréquence de l'impédance phase-neutre, ceci dans une gamme de fréquence importante : entre  $100\text{Hz}$  et  $2\text{MHz}$ . Pour ce faire nous allons utiliser le RLC Meter Quadtech 7600.

#### 3.2.1 Présentation du RLC Meter

Le RLC Meter Quadtech 7600 est un appareil de précision qui permet de tester les

composants et les matériaux pour diverses études de recherche et de conception et pour la fabrication des composants. Il mesure l'impédance (inductance, capacitance et résistance) pour des fréquences ponctuelles. Cet appareil de mesure d'impédances est optimisé pour mesurer les impédances élevées et les impédances faibles. Pour cela, le RLC Meter a quatre fils qui sont regroupés en groupe de deux par l'intermédiaire d'une broche. Celles-ci sont utilisées afin d'injecter pour l'une un fort courant et une forte tension et pour l'autre un faible courant et une faible tension. Grâce à cela le RLC parvient à déterminer l'impédance désirée. Après quoi, il stocke ces mesures sur une disquette permettant ainsi une utilisation facile des données. La photo 4-7 représente cet appareil :

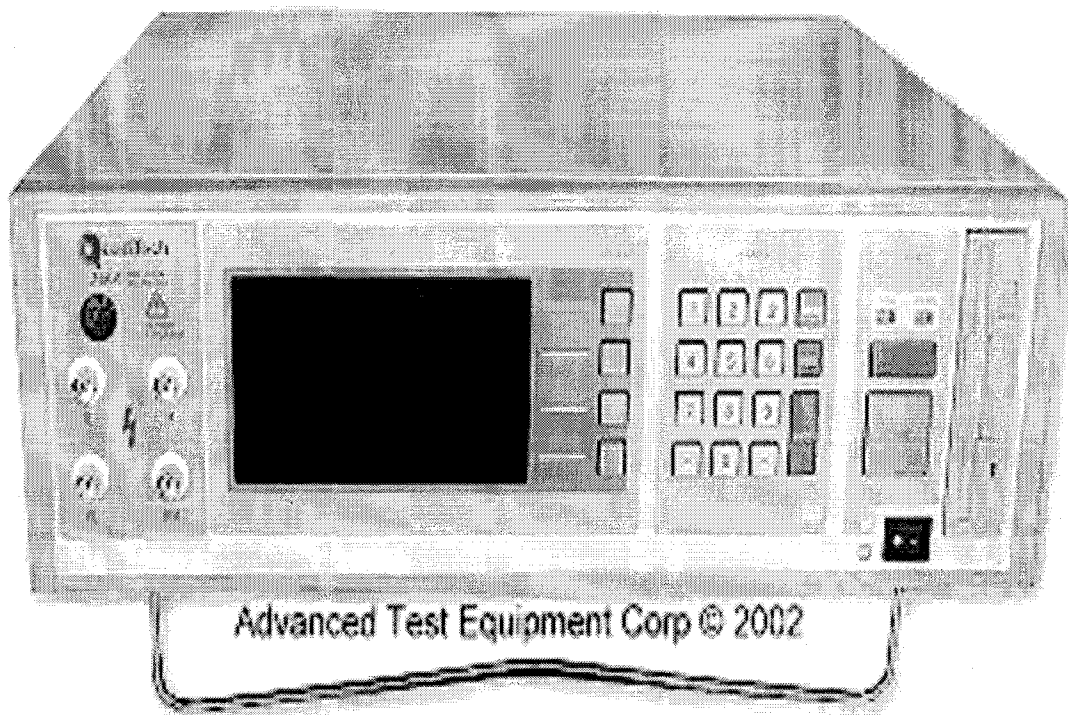


Figure 13 Photo du RLC Meter

### 3.2.2 Description des mesures d'impédances

Un moteur asynchrone, dit encore d'induction, est basé sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant. Il comporte deux armatures à champ tournant coaxiales : l'une est fixe, l'autre est mobile. Aussi les appelle-t-on respectivement, stator et rotor. Le stator développe un champ tournant, ayant pour résultat les courants induits du rotor. Le stator est une couronne faite de tôles magnétiques, isolées entre elles par un vernis. Les tôles sont munies d'encoches qui renferment un bobinage triphasé; bobinage qui est relié au réseau par l'intermédiaire de la plaque à bornes (Chauprade, 1984).

Le stator d'un moteur est représenté par ses enroulements. Pour notre expérience, nous allons utiliser une machine asynchrone « Dual voltage », qui peut être utilisée en fort ou faible courant. C'est-à-dire respectivement en étoile ou en double étoile. Cette utilisation du moteur en étoile ou double étoile a pour but de réduire ou d'augmenter la tension et le courant aux bornes du moteur tout en faisant tourner le moteur à la même vitesse. Les figures 14, 15, 16, 17 et 18 illustrent ces propos.

Nous voyons tout d'abord les enroulements du moteur non liées sur les figures 14 et 15. Puis les branchements de la configuration étoile sur la figure 16 où on relie 8 et 5, 7 et 4, 9 et 6. Enfin les branchements de la configuration double étoile sur les figures 17 et 18 où on relie 1 et 7, 3 et 9, 2 et 8 et 6, 5 et 4. Pour notre expérience, nous allons utiliser la configuration double étoile.

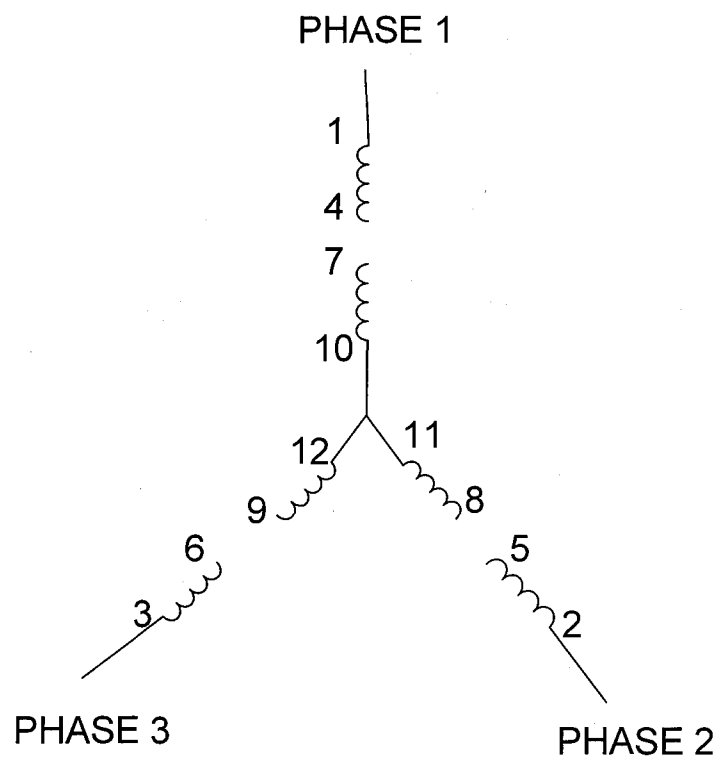


Figure 14 Représentation des enroulements statoriques du moteur



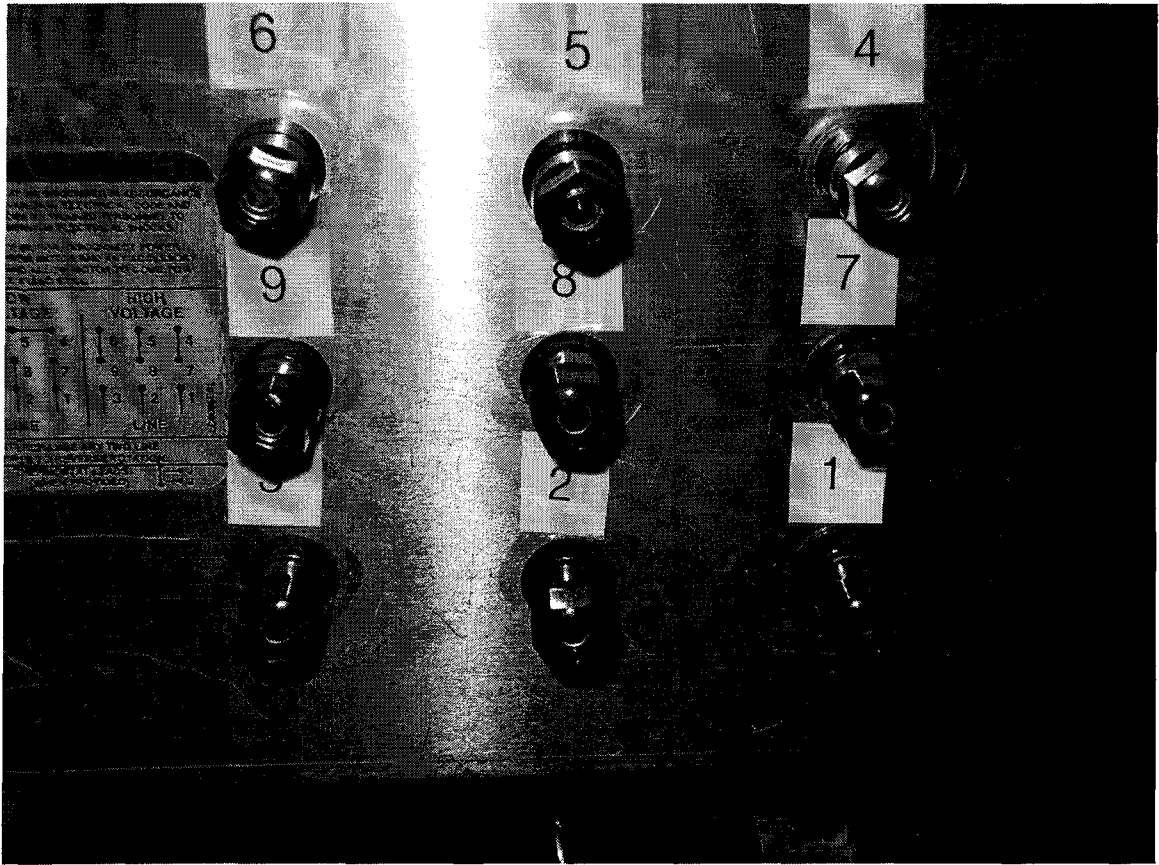


Figure 15 Représentation des enroulements statoriques du moteur utilisé

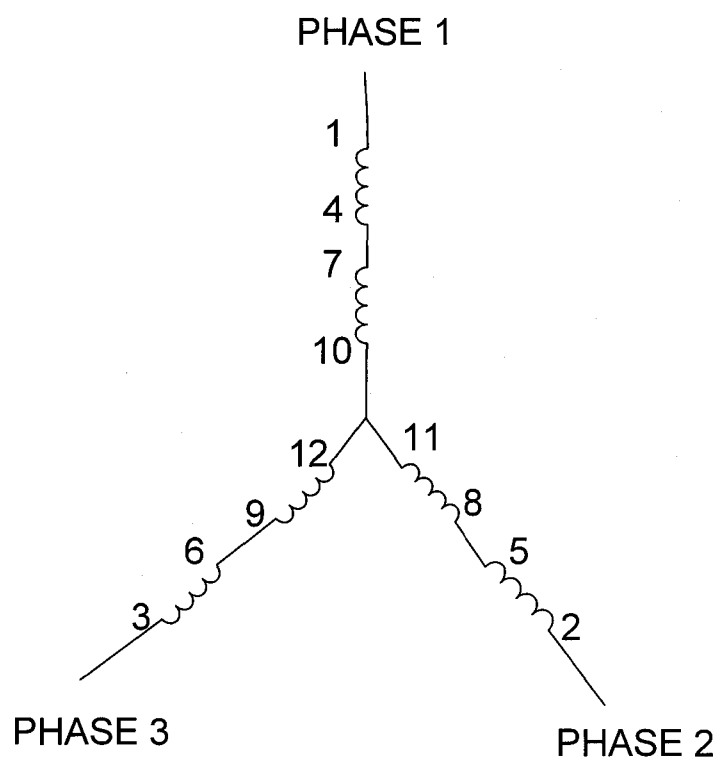


Figure 16 Représentation en étoile des enroulements statoriques du moteur

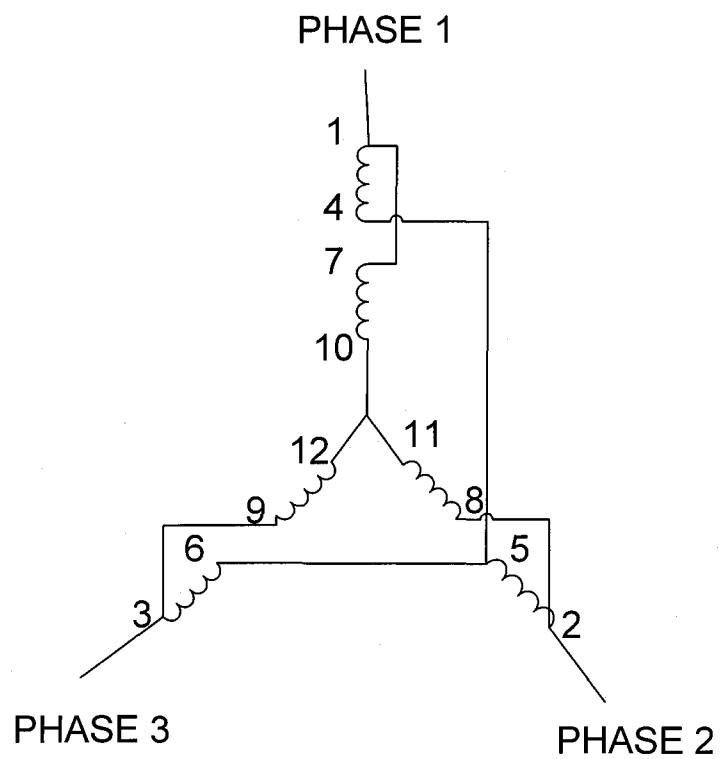


Figure 17 Représentation en double étoile des enroulements statoriques du moteur

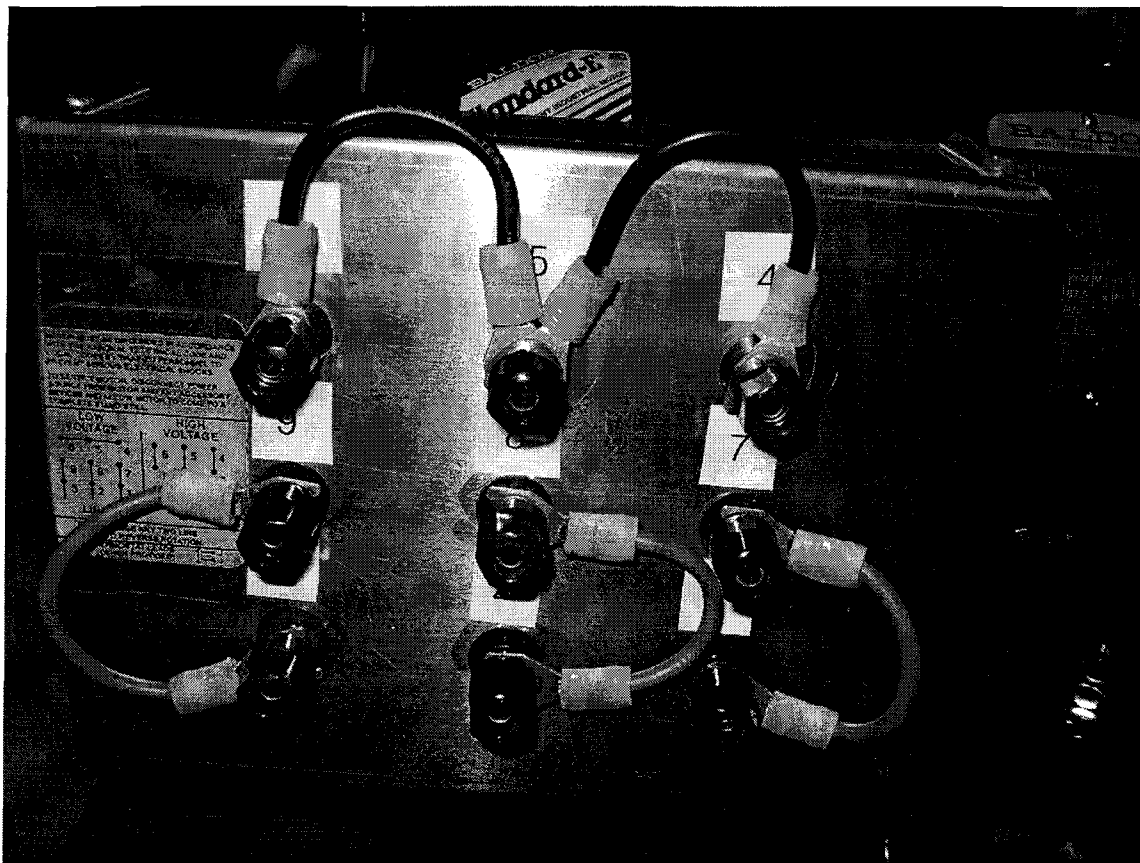


Figure 18 Représentation en double étoile des enroulements statoriques du moteur utilisé

Maintenant, nous pouvons passer aux explications relatives aux mesures : La première mesure concerne l'impédance Phase-neutre. Dans ce cas, il nous faut mettre une broche du RLC Meter sur un fil reliant les trois phases et une autre sur un fil faisant office de neutre. Pour cela, il suffit de prendre une des bornes 4, 5 et 6 du moteur qui sont reliées entre elles et créer ainsi un neutre. La figure 19 illustre ces propos. La mesure de l'impédance Phase-neutre sert à déterminer les paramètres  $L_d$ ,  $R_e$ ,  $L_l$  et  $R_l$  du modèle par phase du moteur.

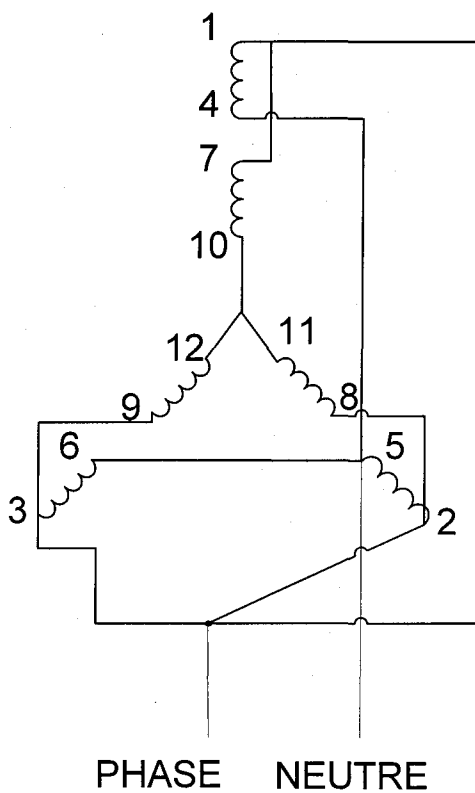


Figure 19 Mesure de l'impédance Phase-neutre du moteur

Il convient ensuite d'effectuer une autre mesure qui est celle de l'impédance phase-masse, nous procédons de la même façon que précédemment afin d'obtenir notre phase. Pour ce qui est de la masse, nous prendrons celle de la machine. La figure 20 illustre ces propos. La mesure de l'impédance Phase-masse sert à déterminer les paramètres  $C_g$ ,  $R_g$  et  $C_l$  du modèle par phase du moteur.



$$R_g = 3 \times REEL\{Z_{PM}\}_{F_{HAUTE}} \quad (3-2)$$

Où  $REEL\{Z_{PM}\}_{F_{HAUTE}}$  représente la partie réelle de l'impédance Phase-masse à la fréquence la plus haute dans la mesure d'impédance.

$$L_d = \frac{2}{Cg} \left( \frac{1}{2\pi F_{pôle-ZPN}} \right)^2 \quad (3-3)$$

Où  $F_{pôle-ZPN}$  représente la fréquence du premier pôle dans la réponse en fréquence de l'impédance Phase-neutre.

$$R_e = 3 \times AMPLITUDE\{Z_{PN}\}_{F_{pôle-Zpn}} \quad (3-4)$$

Où  $AMPLITUDE\{Z_{PN}\}_{F_{pôle-Zpn}}$  représente l'amplitude de l'impédance Phase-neutre à la fréquence du pôle dans la réponse en fréquence de l'impédance Phase-neutre.

$$C_t = \frac{C_g}{10} \quad (3-5)$$

$$L_t = \frac{1}{C_t} \left( \frac{1}{2\pi \times F_{zéro-Zpn}} \right) \quad (3-6)$$

Où  $F_{zéro-ZPN}$  représente la fréquence du premier zéro dans la réponse en fréquence de l'impédance Phase-neutre.

$$R_t = 3 \times Réel\{Z_{PN}\}_{F_{zéro-Zpn}} \quad (3-7)$$

Où  $\text{Réal}\{Z_{PN}\}F_{\text{zéro-ZPN}}$  représente la partie réelle de l'impédance Phase-neutre à la fréquence du premier zéro dans la réponse en fréquence de l'impédance Phase-neutre.

### 3.2.4 Mesures des impédances du moteur

Grâce au RLC Meter et comme indiqué précédemment, on détermine la réponse en fréquence de l'impédance Phase-Neutre, représentée à la figure 21 et la réponse en fréquence de l'impédance Phase-Masse représentée à la figure 23. Afin de déterminer la fréquence du pôle  $F_{\text{pôle-ZPN}}$  et la fréquence du zéro  $F_{\text{zéro-ZPN}}$ , nous traçons le diagramme de Bode asymptotique de l'impédance Phase-Neutre à la figure 22. On trouve alors leurs fréquences :

$$F_{\text{pôle-ZPN}} = 128\text{KHz}$$

$$F_{\text{zéro-ZPN}} = 612\text{KHz}$$



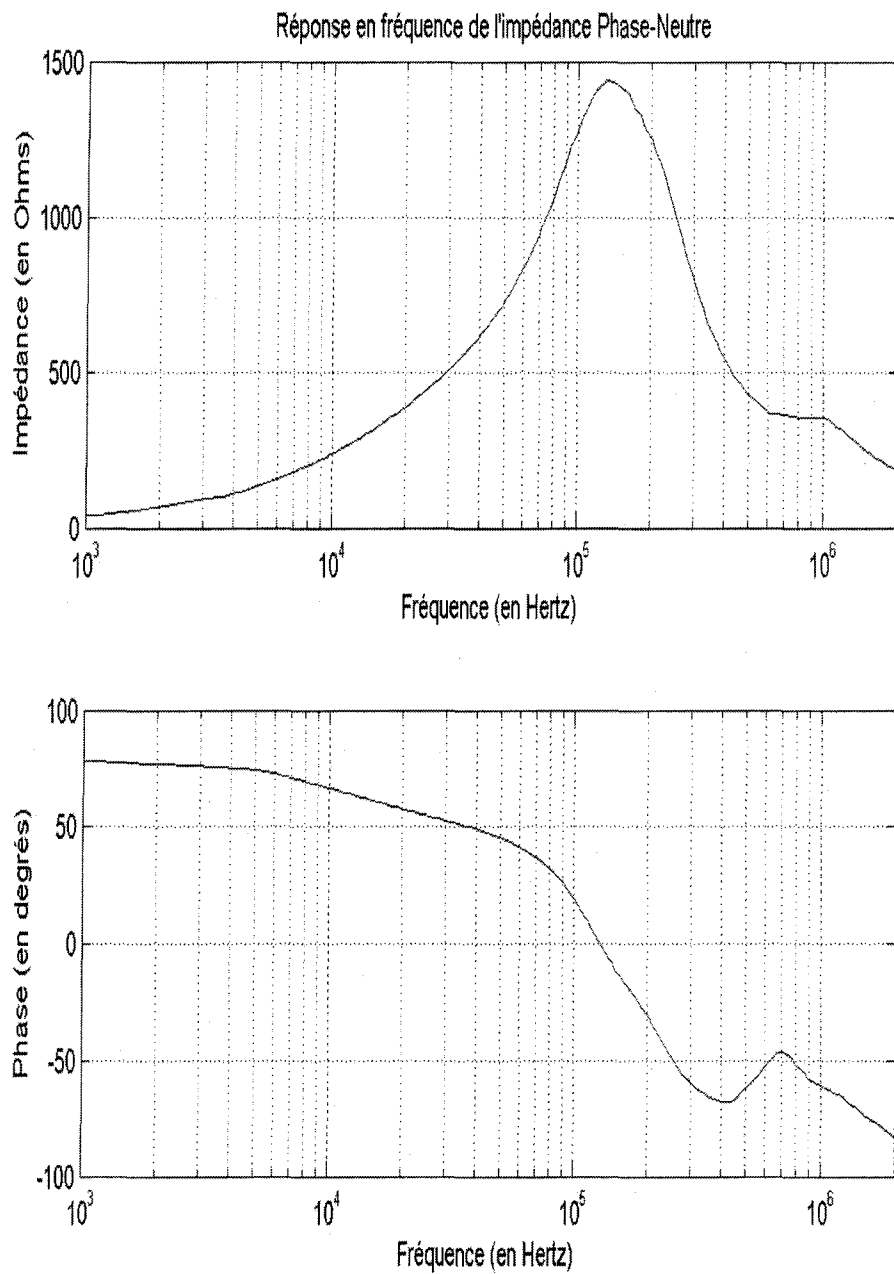


Figure 21 Réponse en fréquence de l'impédance Phase-Neutre

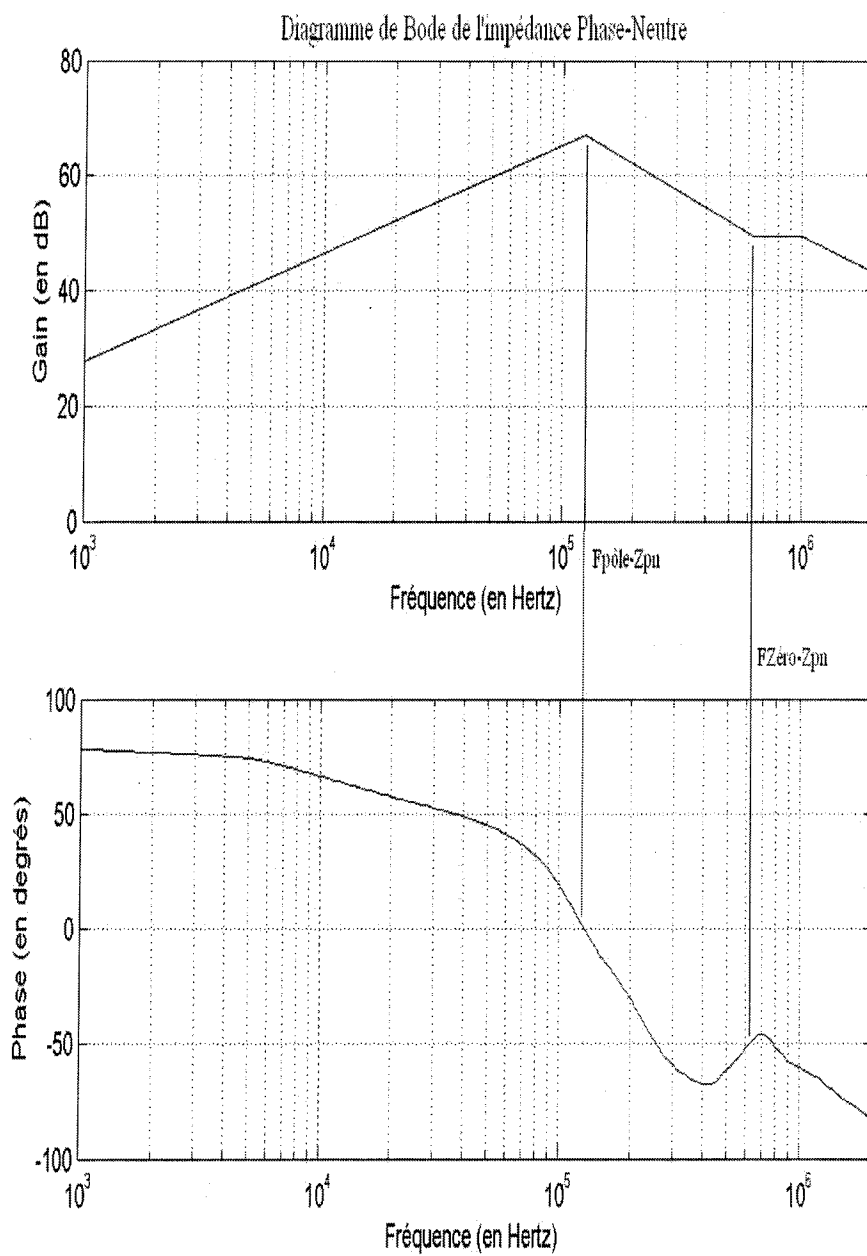


Figure 22 Diagramme de Bode de l'impédance Phase-Neutre

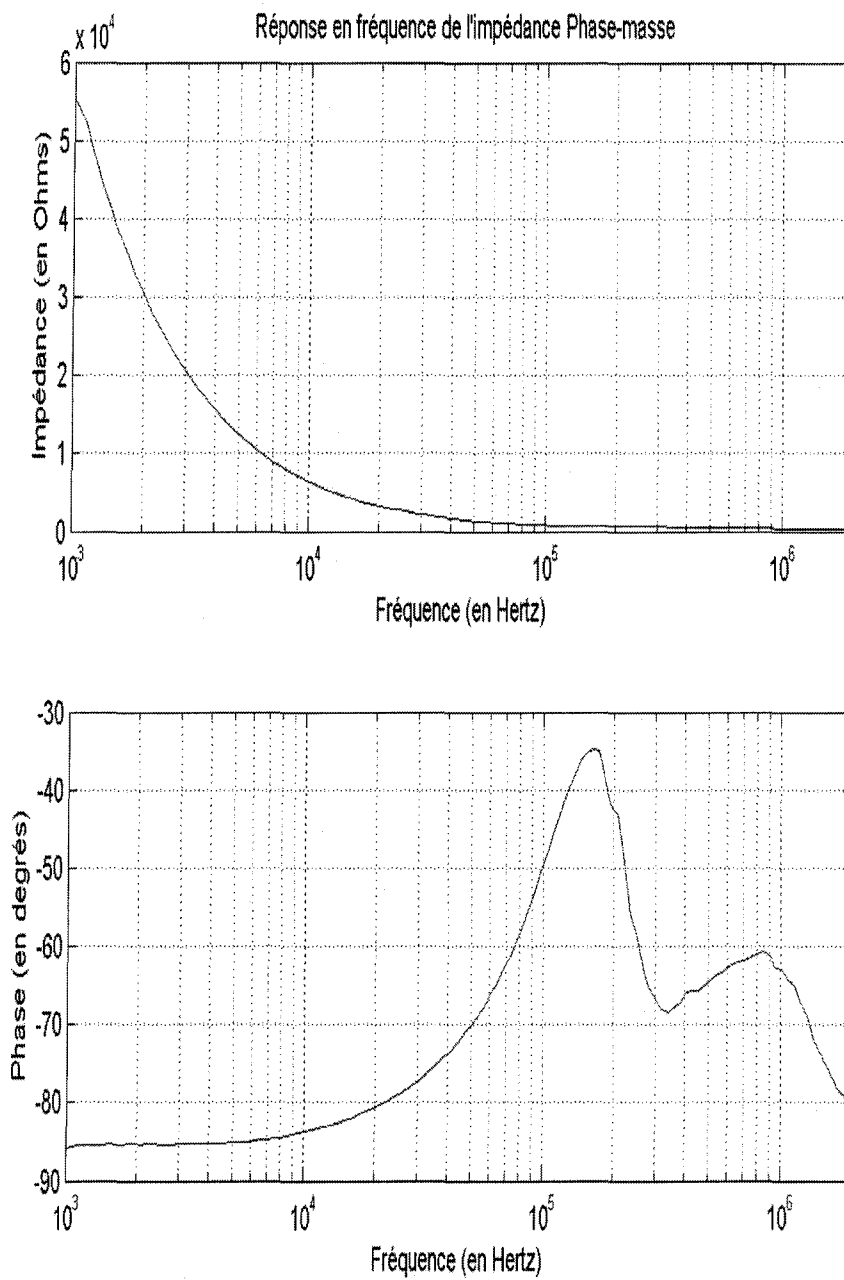


Figure 23 Réponse en fréquence de l'impédance Phase-masse

### 3.2.5 Calcul des paramètres du moteur

Le moteur utilisé est un moteur asynchrone Baldor de 3HP (M3611T). Sa tension nominale est de 208 Volts, sa fréquence est de 60 Hz et sa vitesse nominale est de 1750 tr/min.

A partir des impédances et des formules du moteur, on peut en déduire les paramètres de notre moteur :

On prend  $F_{BASSE} = 1000\text{Hz}$  et  $F_{HAUTE} = 2\text{MHz}$  (Lipo, 2001), on trouve alors :

$$C_g = 457\text{ pf}$$

$$R_g = 36,46\Omega$$

$$L_d = 6,7\text{mH}$$

$$R_e = 4311\Omega$$

$$C_l = 45,7\text{ pf}$$

$$L_l = 1,48\text{mH}$$

$$R_l = 767\Omega$$

## 3.3 Identification des paramètres du câble grâce au RLC meter

### 3.3.1 Explications sur les mesures

Le modèle de câble que nous allons utiliser est le modèle en pi qui contient des éléments résistifs, capacitifs et inductifs. Afin de représenter le modèle triphasé, il convient de rajouter les capacités différentielles entre phases. En effet, dans les câbles triphasés, il existe des potentiels entre deux paires de conducteurs aussi bien qu'entre chaque conducteur et l'armature (Von Jouanne, 1995). Ainsi, il y a une capacité  $C_s$ , entre deux

paires de conducteurs et une capacité  $C_c$  entre chaque conducteur et la gaine comme illustré à la figure 24. Cette protection de métal est en effet utilisée afin de protéger le câble de la moisissure et des dommages mécaniques et affecte la capacité du câble.

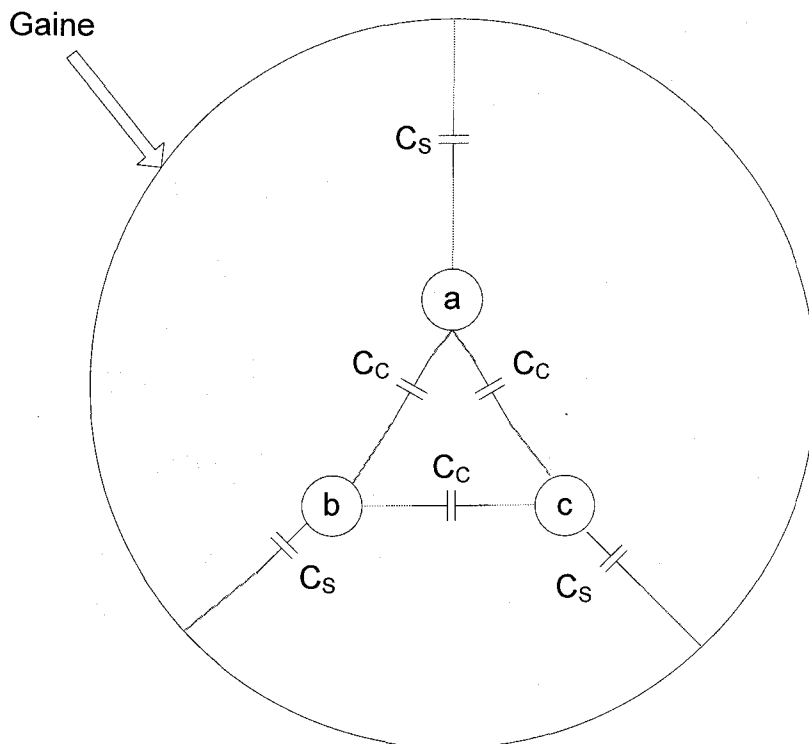


Figure 24 Représentation des capacités internes au câble

Il nous faut désormais identifier les paramètres de notre câble qui est un câble de puissance triphasé de diamètre AWG14. Nous allons encore une fois utiliser le RLC Meter, en effet nous allons mesurer les paramètres du câble ( $R$ ,  $L$ ,  $C_c$ ,  $C_s$ ) pour une longueur d'un mètre.

Nous connectons une des branches du RLC Meter à une des bornes du câble et l'autre branche à l'autre extrémité du câble. Pour ce qui est des paramètres  $R$  et  $L$ , les deux branches du RLC Meter doivent être mises en série sur la même phase (une branche à

chaque extrémité). Pour déterminer les capacités  $C_s$  et  $C_c$ , les deux branches du RLC Meter doivent être mises en parallèles entre une phase et la gaine pour  $C_s$  et entre deux phases pour  $C_c$ . Le câble utilisé au cours de ces mesures est présenté à la figure 25.

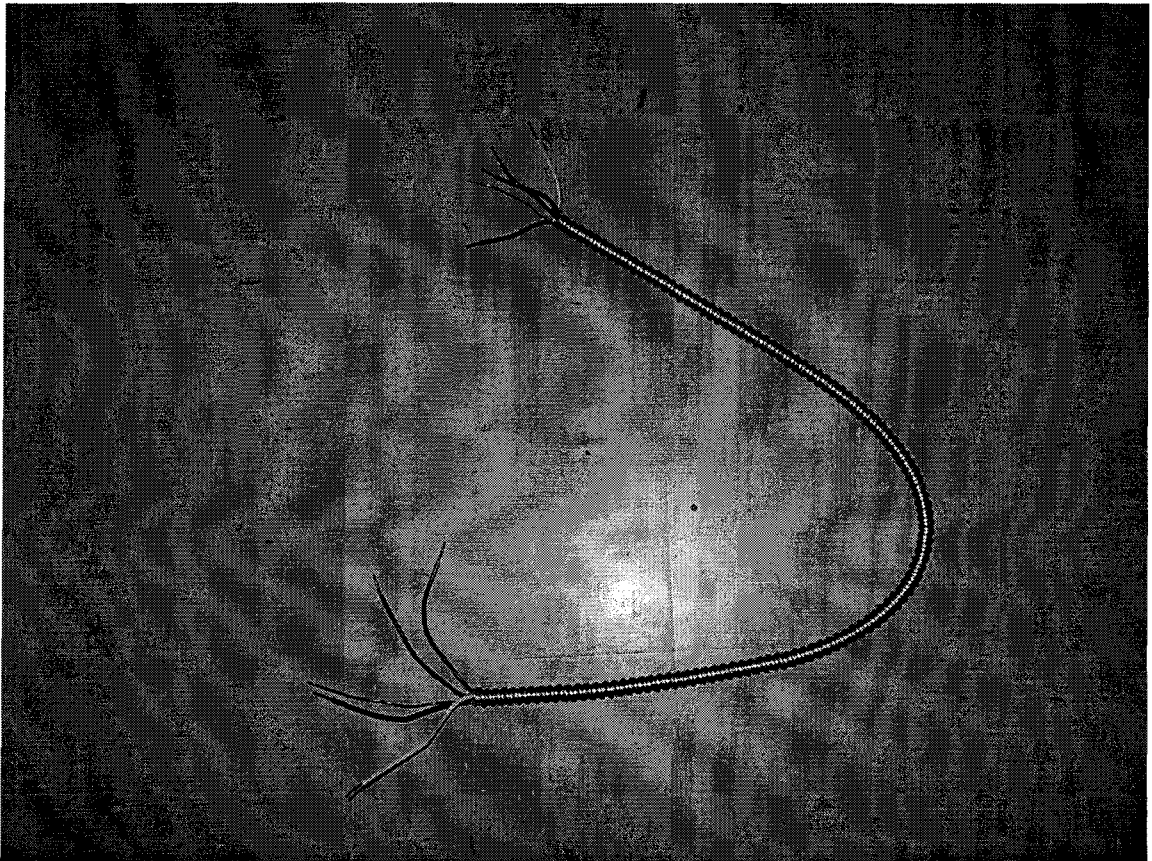


Figure 25 Câble d'un mètre utilisé au cours de nos mesures

### 3.3.2 Détermination des paramètres du câble

La représentation du câble (Von Jouanne, 1996) utilisé est illustrée à la figure 26.

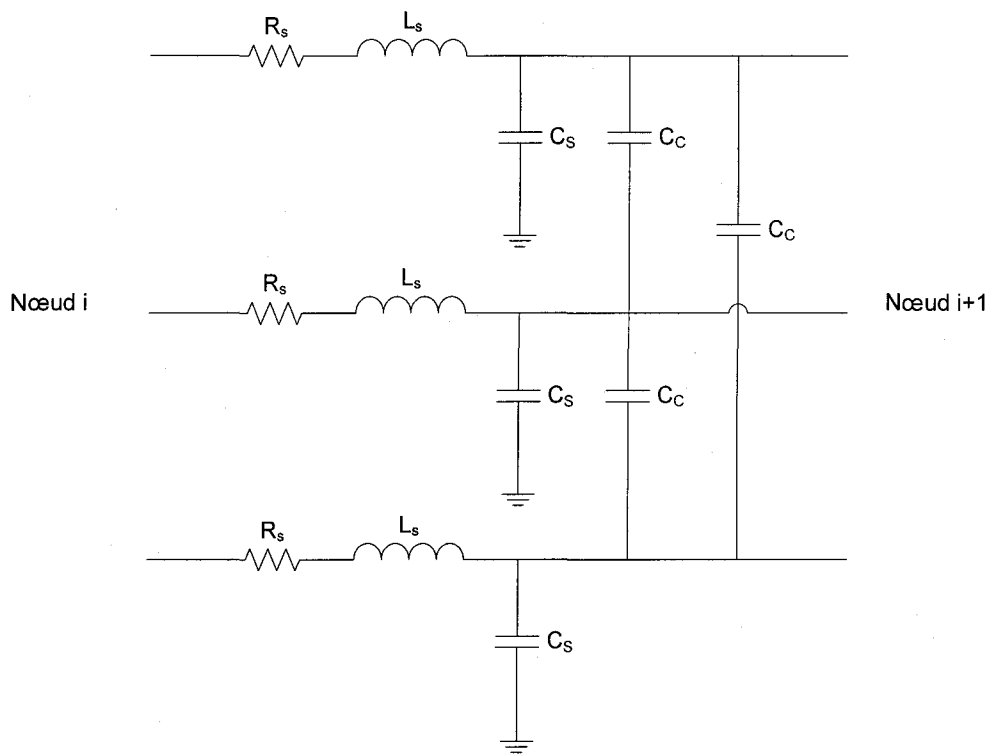


Figure 26 Représentation du câble

Nous effectuons cette mesure à  $10\text{KHz}$ , car c'est la fréquence de notre onduleur. Les mesures effectuées grâce au RLC Meter nous donnent les résultats suivants :

$$R = 9,5\text{m}\Omega$$

$$L = 0,9\mu\text{H}$$

$$C_s = 30\text{pF}$$

$$C_c = 19\text{pF}$$

## CHAPITRE 4

### SIMULATION

#### 4.1 Simulation de l'entraînement avec SPS

Maintenant que nous avons les paramètres nécessaires, nous pouvons simuler notre montage sous Simulink (voir ANNEXE 3 pour le schéma du moteur sous SPS). Pour l'onduleur, nous allons utiliser des sources programmables en tension, ce qui nous permettra de choisir le temps de montée désiré. Le schéma sous Simulink est représenté à la figure 27.

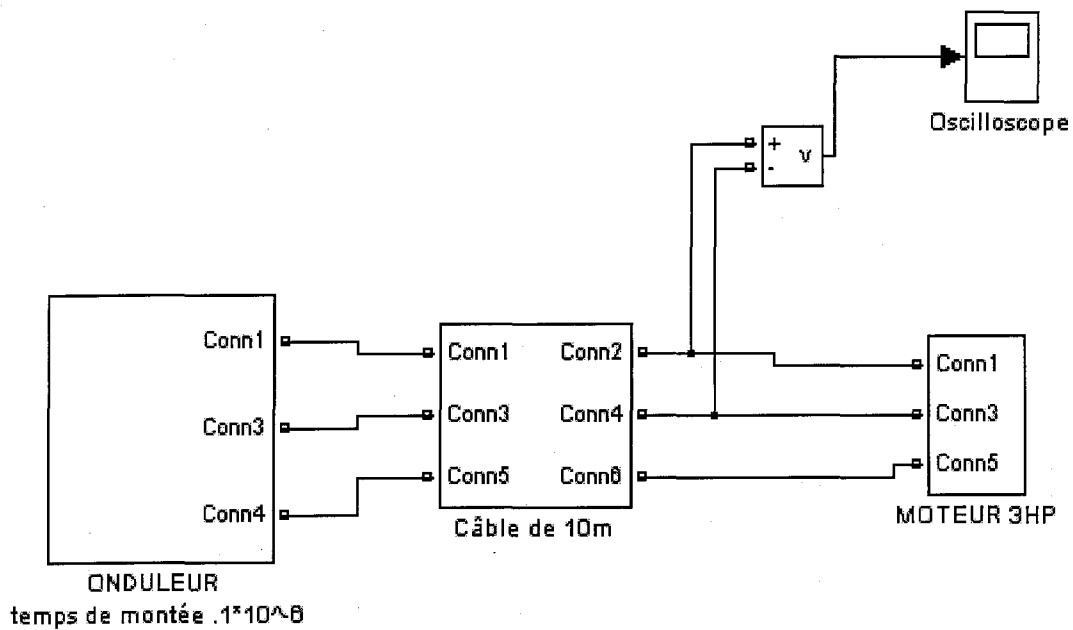


Figure 27 Montage Onduleur-câble-moteur sous SPS

Afin de déterminer l'influence de la longueur du câble pour un temps de montée fixe.



Nous allons nous fixer trois longueurs de câble pour faire nos tests. Ces longueurs seront un mètre, cinq mètres et dix mètres et le temps de montée de l'impulsion sera fixé à :

$$\tau_{Montée} = 0,1 \mu sec$$

Un oscilloscope nous permettra alors d'observer les tensions différentielles en entrée du moteur.

Nous choisissons ce temps de montée car il correspond à un paramètre souvent utilisé dans l'industrie et c'est aussi un paramètre qui permet de faire apparaître rapidement des surtensions, car il est relativement faible. Le temps de montée pour nous correspond au temps pour lequel la tension du signal MLI passe de 0 à 1 pu comme illustré à la figure 28.

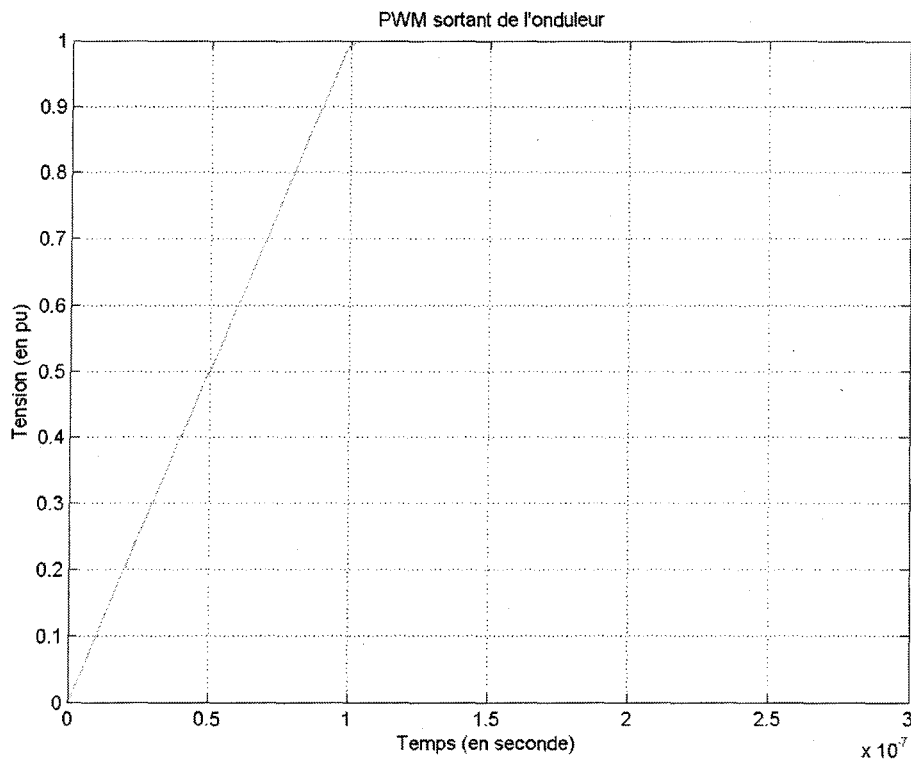


Figure 28 Signal MLI sortant de l'onduleur

Nous allons maintenant simuler notre montage et observer les résultats :

#### 4.1.1 Simulation avec un câble d'un mètre

Nous obtenons la tension différentielle illustrée à la figure 29.

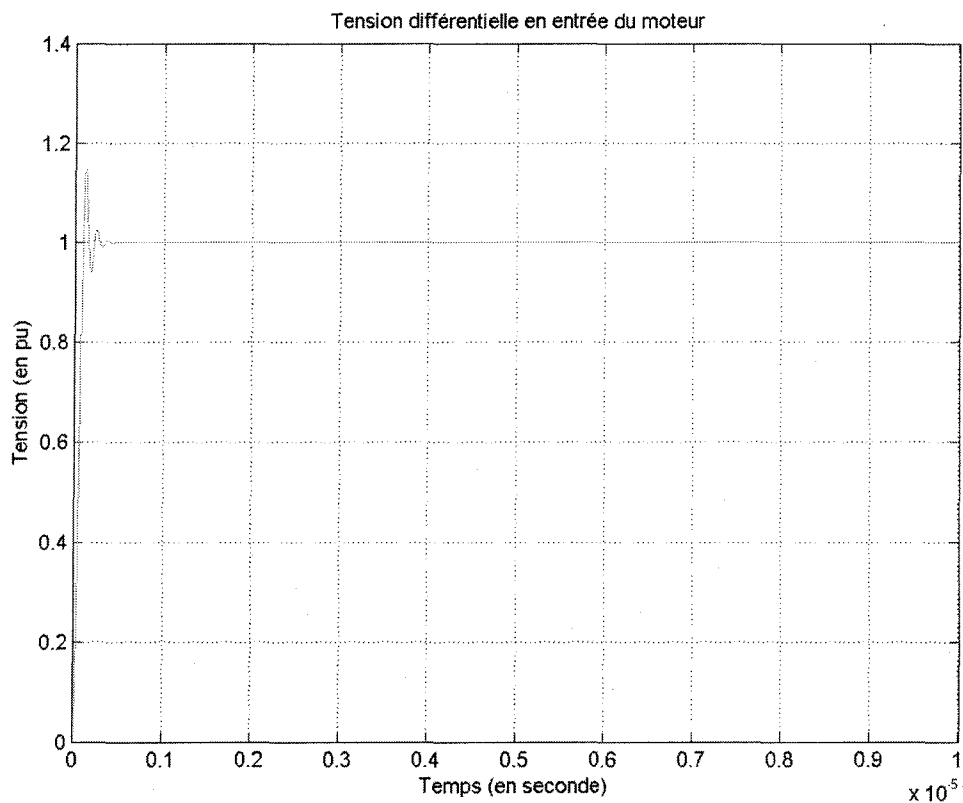


Figure 29 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre entre le moteur et l'onduleur

On constate que l'on a une surtension de l'ordre de 16%. Ce qui n'est pas une surtension très dangereuse, pour autant, on remarque que l'ajout d'un mètre de câble a pas mal d'influence. L'amortissement du système est quand à lui très rapide.

#### 4.1.2 Simulation avec un câble de cinq mètres

Nous obtenons la tension différentielle illustrée à la figure 30.

Nous constatons que l'on a une surtension de l'ordre de 70%, de plus l'amortissement est devenu beaucoup plus long que pour un mètre de câble. A ce niveau, la surtension peut déjà être relativement dangereuse.

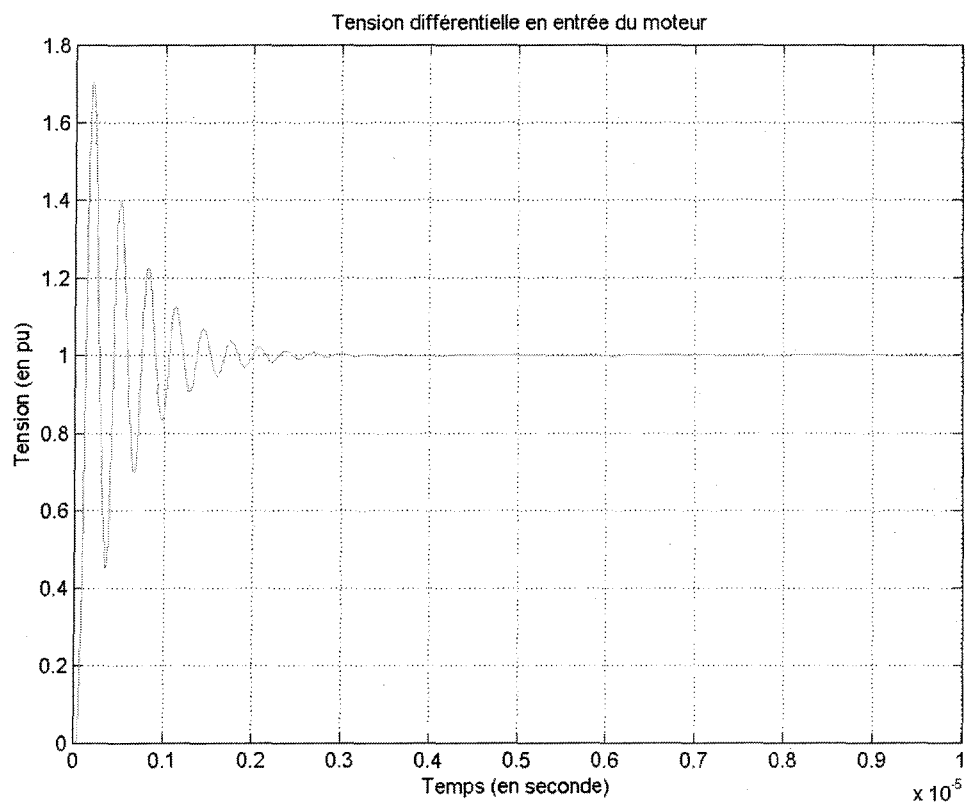


Figure 30 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres entre le moteur et l'onduleur

### 4.1.3 Simulation avec un câble de dix mètres

Nous obtenons la tension différentielle illustrée à la figure 31.

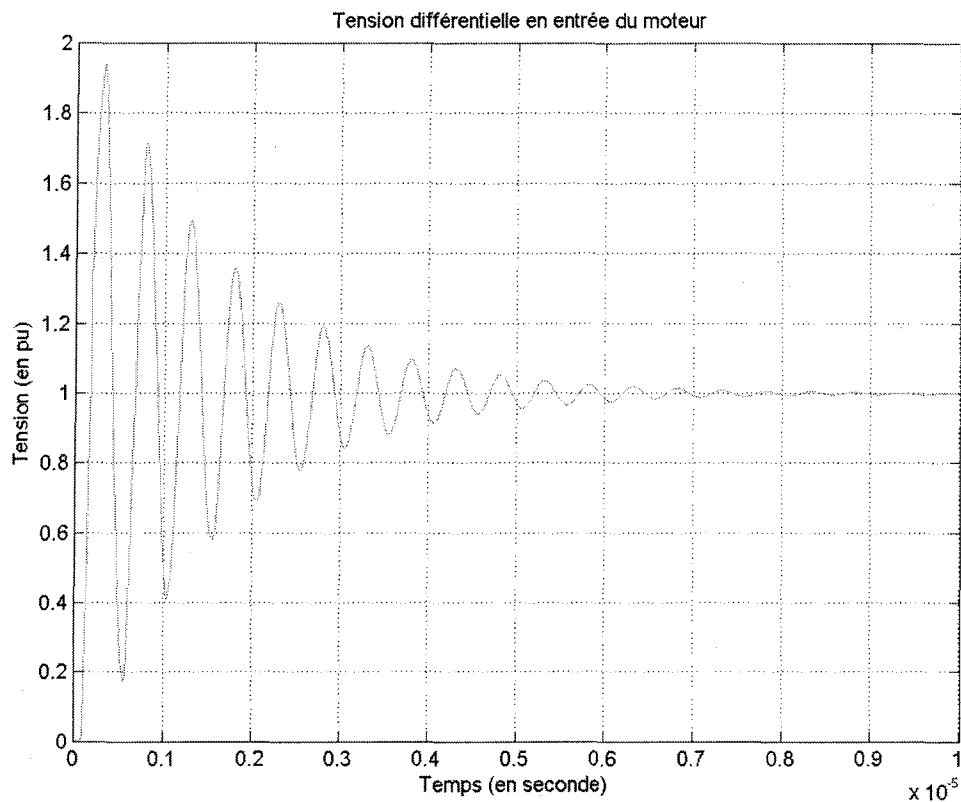


Figure 31 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur

Nous constatons que l'on a une surtension de l'ordre de 94%, de plus le temps d'amortissement a encore augmenté. On peut assimiler cette surtension à un doublement de la tension, les conséquences d'une telle surtension peuvent être très dommageables.

Donc, pour une longueur de câble de dix mètres, la tension différentielle en entrée du moteur a été doublée par rapport à celle en entrée du câble. On constate aussi qu'après

le doublement de la tension, plus l'on augmente la longueur du câble, plus le temps d'amortissement du signal augmente alors que la tension reste à peu près constante. Nous allons vérifier cela pour des longueurs de câble plus importantes.

#### 4.1.4 Simulation pour un câble de quinze mètres

Nous obtenons la tension différentielle illustrée à la figure 32.

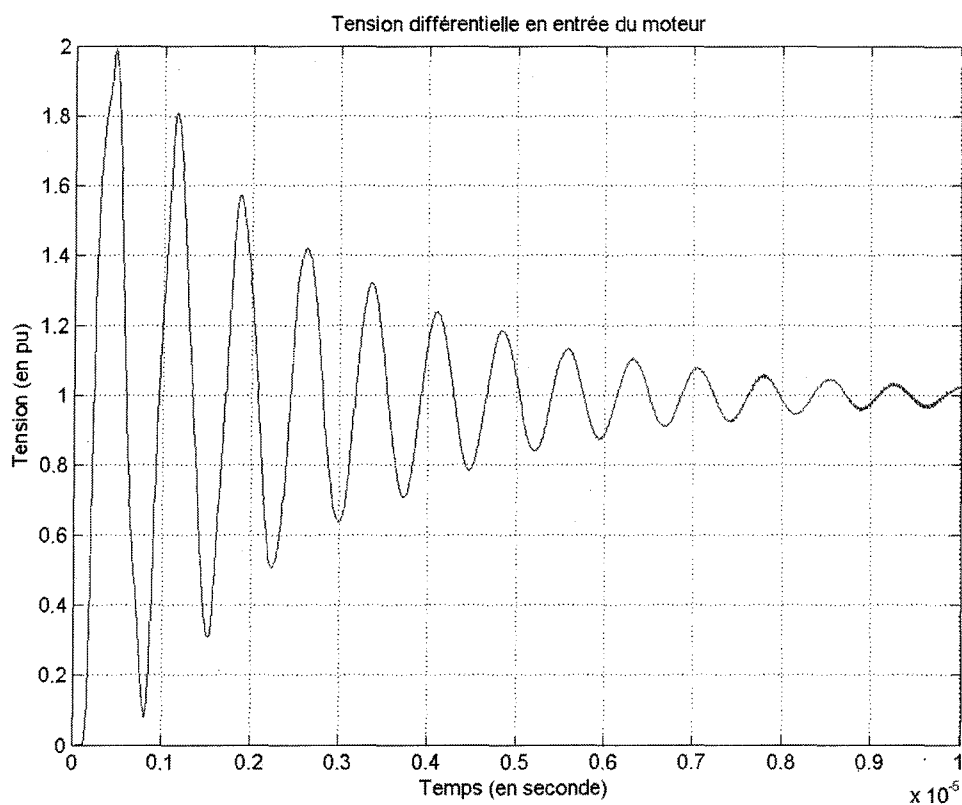


Figure 32 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de quinze mètres entre le moteur et l'onduleur

#### 4.1.5 Simulation pour un câble de vingt mètres

Nous obtenons la tension différentielle illustrée à la figure 33.

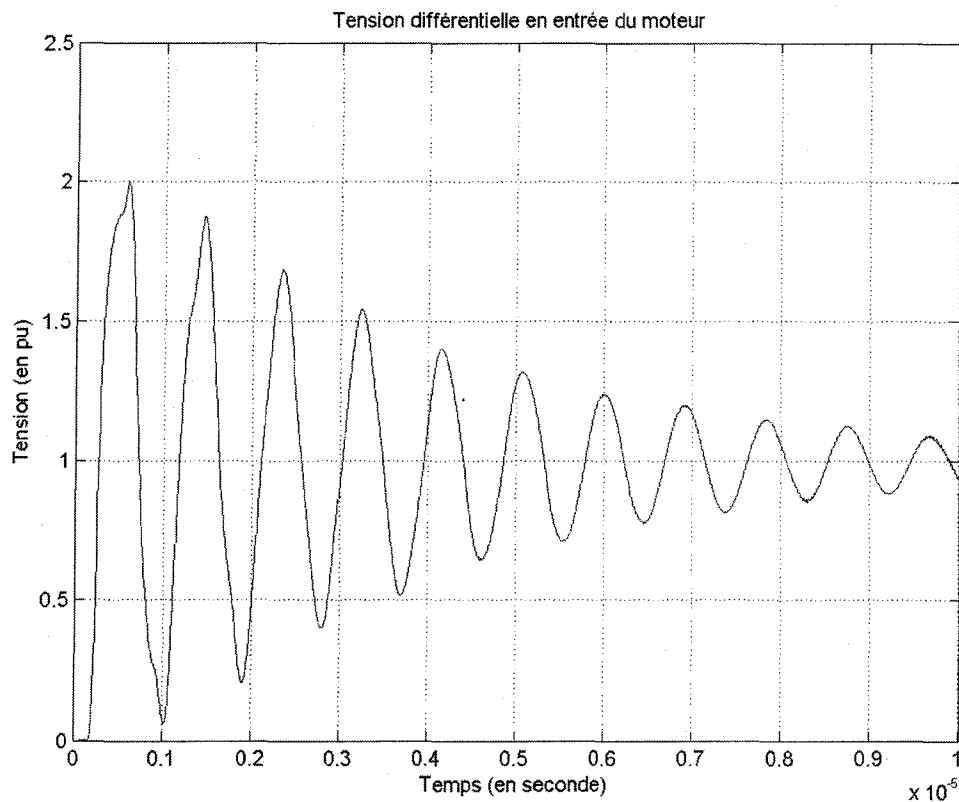


Figure 33 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de vingt mètres entre le moteur et l'onduleur

Maintenant que nous avons obtenu une surtension de l'ordre du double de la tension de sortie de l'onduleur, nous allons la réduire grâce aux filtres vus dans le chapitre deux. Cette courbe a pour expression analytique (Kawkabani, 2000) :

$$u(t) = Ae^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\omega t) \quad (4-1)$$

Où  $\tau$  représente la constante de temps, dépendant des paramètres du câble et du moteur.  $\omega$  Représente la pulsation propre du système et  $A$  est une constante dépendant des paramètres du câble et du moteur.

On constate que plus l'on augmente la longueur du câble, plus la fréquence diminue et plus la constante de temps augmente.

## **4.2 Utilisation de filtres pour réduire la surtension**

Nous allons utiliser les trois filtres étudiés dans le chapitre deux afin de réduire cette surtension. C'est-à-dire les filtres RC et RLC aux bornes du moteur et le filtre RLC en entrée du câble. Nous allons faire ces essais avec un câble de dix mètres, car il correspond à une longueur suffisante pour observer un doublement de la tension.

### **4.2.1 Utilisation d'un Filtre RC aux bornes du moteur**

Après application numérique (Lipo, 2001), c'est-à-dire en utilisant les équations (2-40) et (2-41), nous trouvons les valeurs du filtre RC :

$$R_F = 101.7095\Omega$$

$$C_F = 9.3282nF$$

Nous ajoutons alors sous Simulink notre filtre RC, le schéma sous Simulink est illustré à la figure 34.

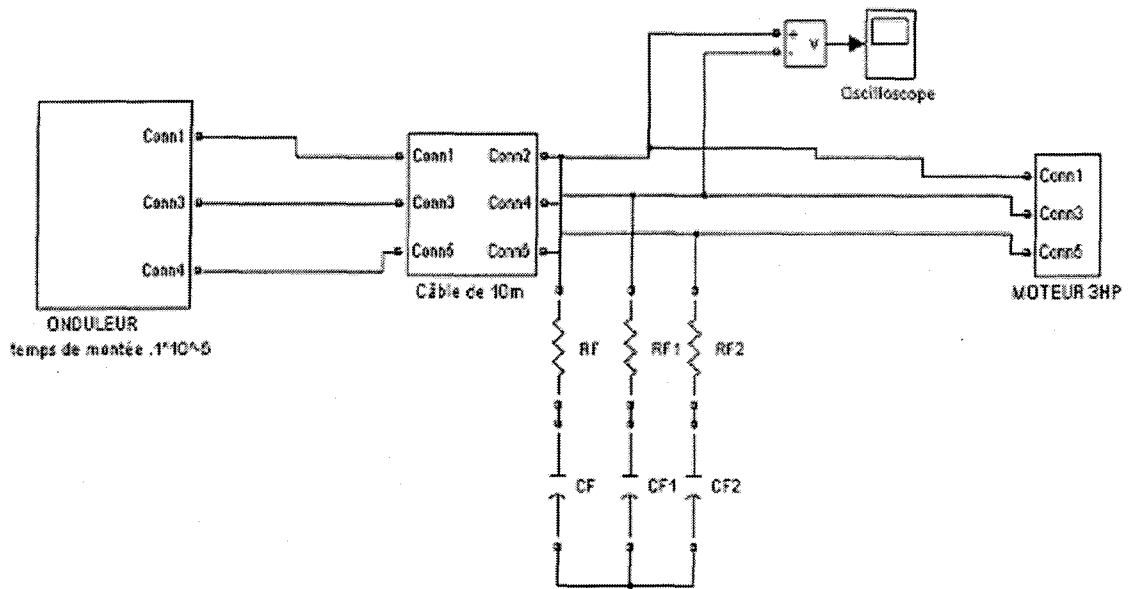


Figure 34 Montage sous Simulink avec le filtre RC aux bornes du moteur

La tension aux bornes du moteur est indiquée à la figure 35. Nous constatons que la surtension est désormais de  $1,25 pu$ . De plus l'amortissement est quasiment immédiat.



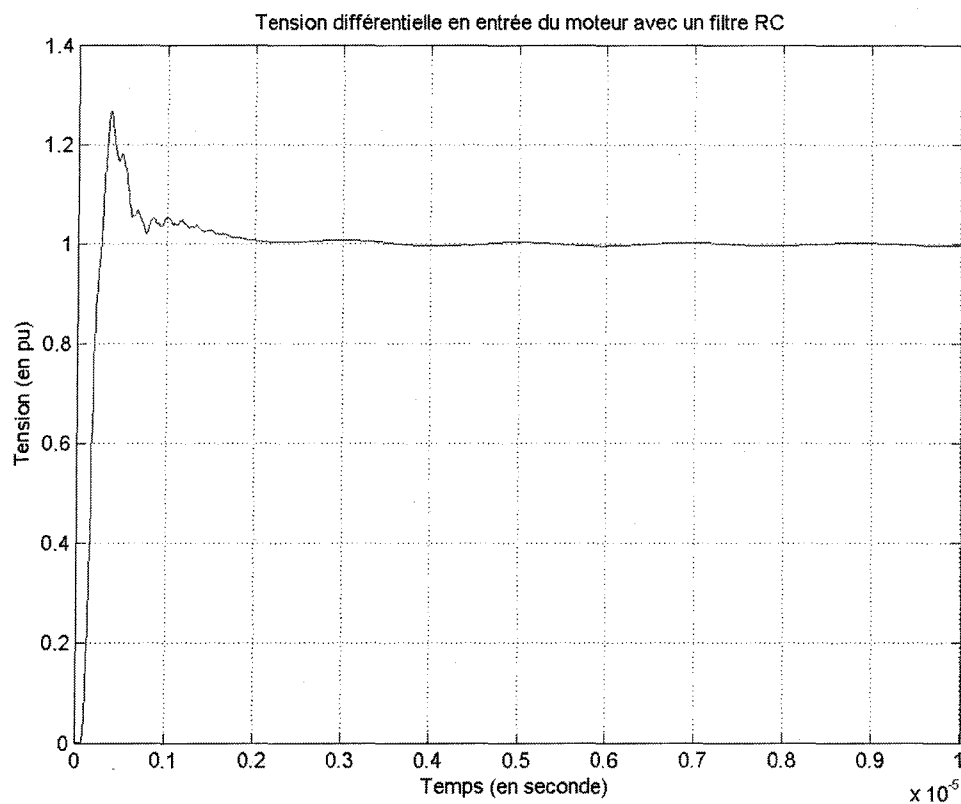


Figure 35 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre RC aux bornes du moteur

#### 4.2.2 Utilisation d'un Filtre RLC aux bornes du moteur

Après application numérique (Lipo, 2001), c'est-à-dire en résolvant le système formé par les équations (2-67), (2-68), (2-69) et (2-70) on trouve les valeurs du filtre RLC :

$$R_F = 101.7095\Omega$$

$$L_F = .169961mH$$

$$C_F = 4,10741nF$$

Nous ajoutons le filtre RLC aux bornes du moteur, le schéma sous Simulink est illustré à la figure 36.

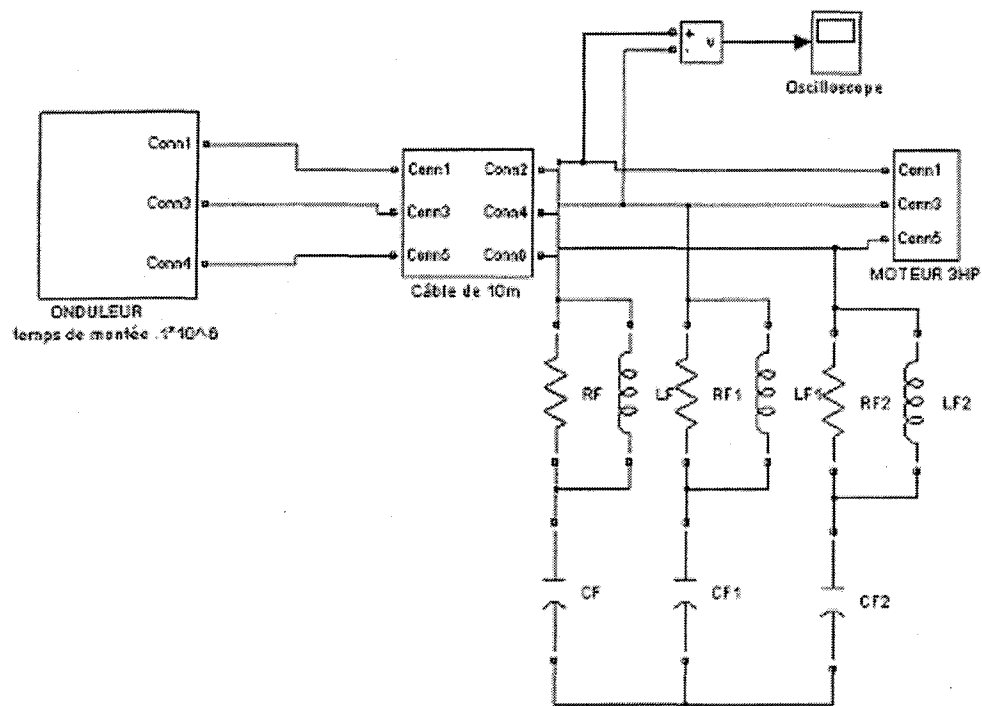


Figure 36 Montage sous Simulink avec le filtre RLC aux bornes du moteur

La tension aux bornes du moteur est indiquée à la figure 37. Nous constatons que la surtension est désormais de  $1,32 pu$ . L'amortissement est aussi rapide que dans le cas précédent.

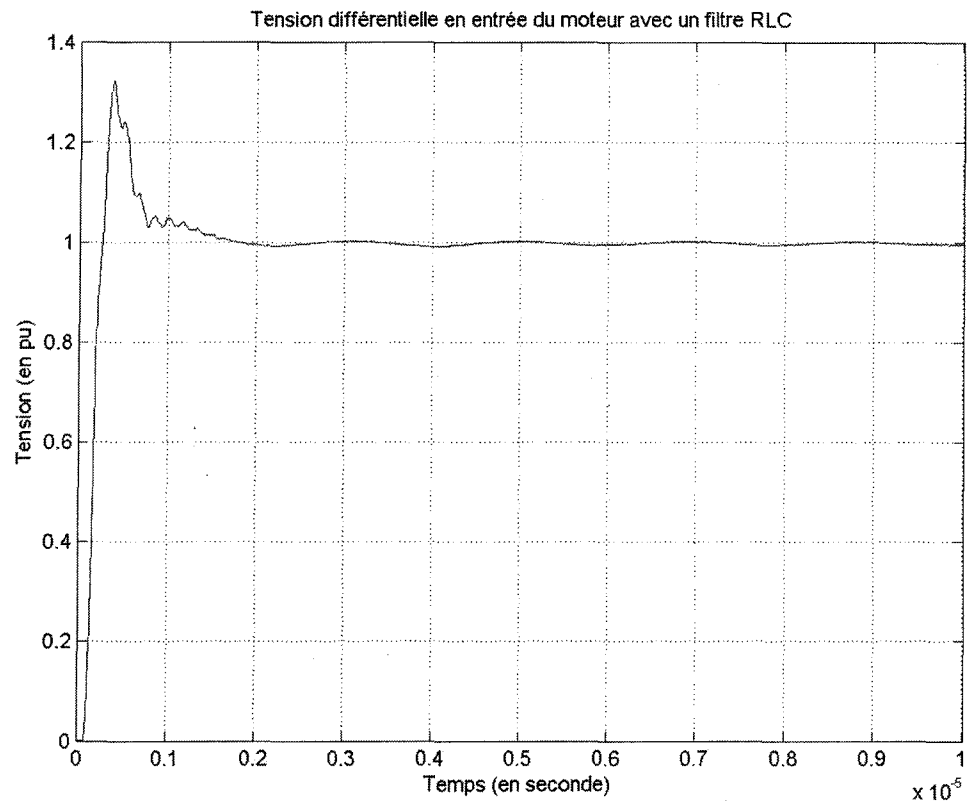


Figure 37 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre RLC aux bornes du moteur

#### 4.2.3 Utilisation d'un Filtre inductif aux bornes de l'onduleur

Comme sur le modèle du filtre RLC en sortie de l'onduleur, nous pouvons utiliser un simple filtre inductif. Le filtre inductif est un filtre très répandue dans l'industrie, il se compose d'une simple inductance de 3% d'impédance placée à la sortie de l'onduleur. Ce filtre a une capacité de filtration beaucoup moins efficace que les autres filtres, mais sa simplicité fait qu'il est très souvent utilisé. La valeur de l'inductance utilisée est la suivante :

$$L_F = 1,7mH$$

Nous ajoutons le filtre inductif en sortie de l'onduleur, le schéma sous Simulink est illustré à la figure 38.

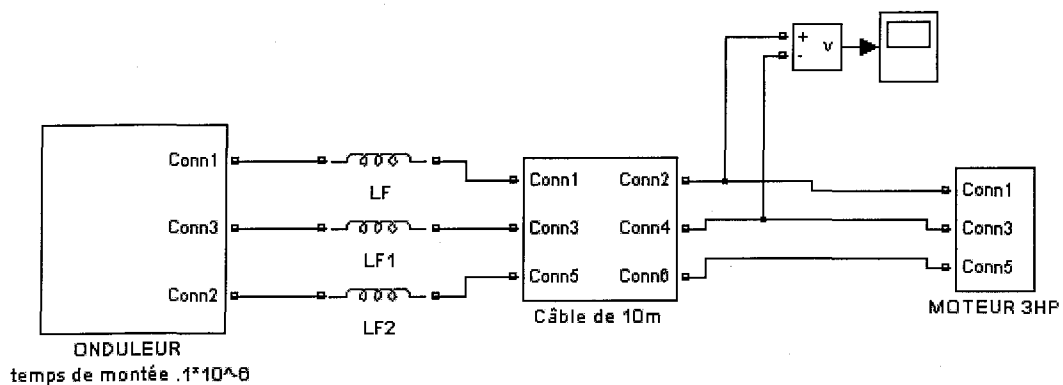


Figure 38 Montage sous Simulink avec le filtre inductif aux bornes de l'onduleur

La tension aux bornes du moteur est indiquée à la figure 39. Nous constatons que la surtension est désormais de  $1,65 pu$ . On remarque que ce filtre réduit beaucoup moins les surtensions que les filtres précédents, pour autant il doit pouvoir convenir pour certaines applications. De plus, l'amortissement est beaucoup plus long que dans le cas précédent. Pour autant, nous constatons qu'une simple inductance peut réduire considérablement la surtension.

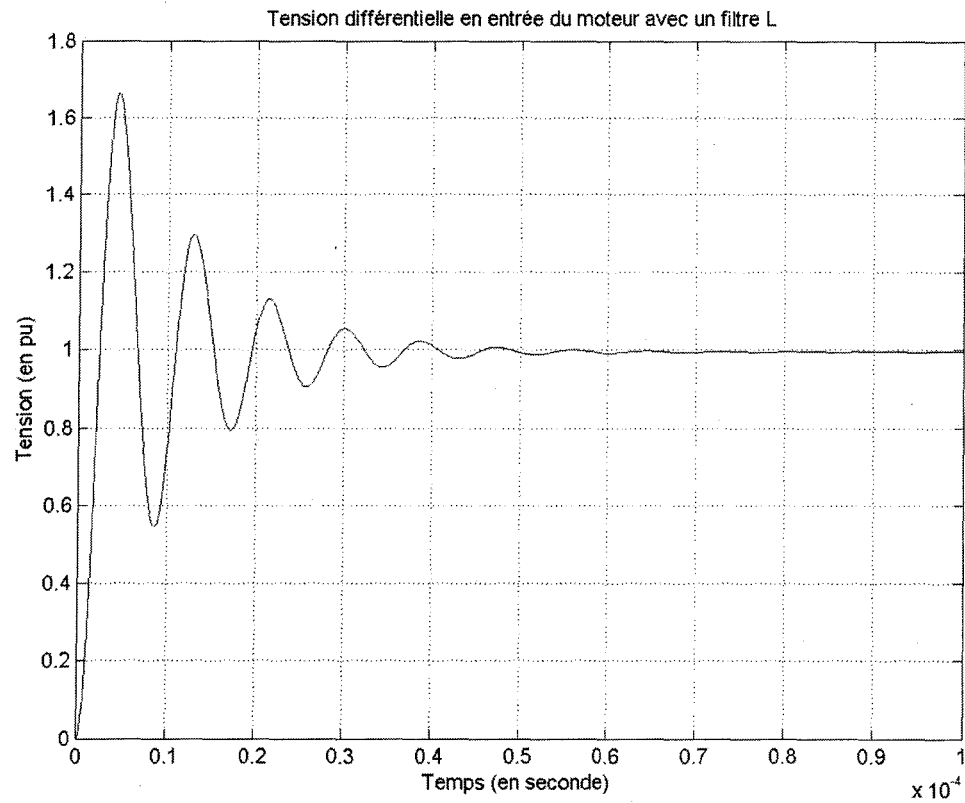


Figure 39 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre inductif en sortie de l'onduleur

#### 4.2.4 Utilisation d'un Filtre RLC en sortie de l'onduleur

Après application numérique (Lipo, 2001), c'est-à-dire en résolvant le système formé par les équations (2-63), (2-64), (2-65) et (2-66), nous trouvons les valeurs du filtre RLC :

$$R_F = 50.8548\Omega$$

$$L_F = 15,496\mu H$$

$$C_F = 3.4923nF$$

Le schéma sous Simulink est illustré à la figure 40.

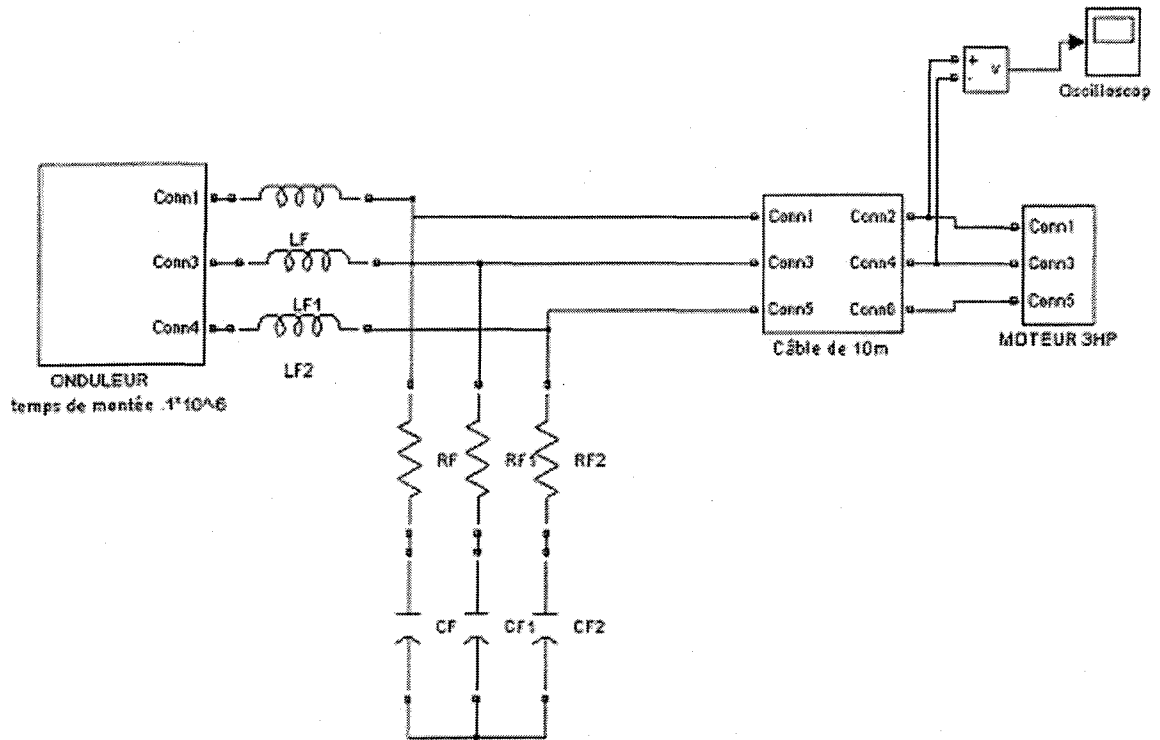


Figure 40 Montage sous Simulink avec le filtre RLC aux bornes de l'onduleur

La tension aux bornes du moteur est indiquée à la figure 41. Nous constatons que la surtension est désormais de  $1,13 pu$ . L'amortissement est un peu plus lent que dans les cas précédent. Ce filtre est donc le plus efficace car il a plus réduit la tension différentielle aux bornes du moteur que les autres filtres.

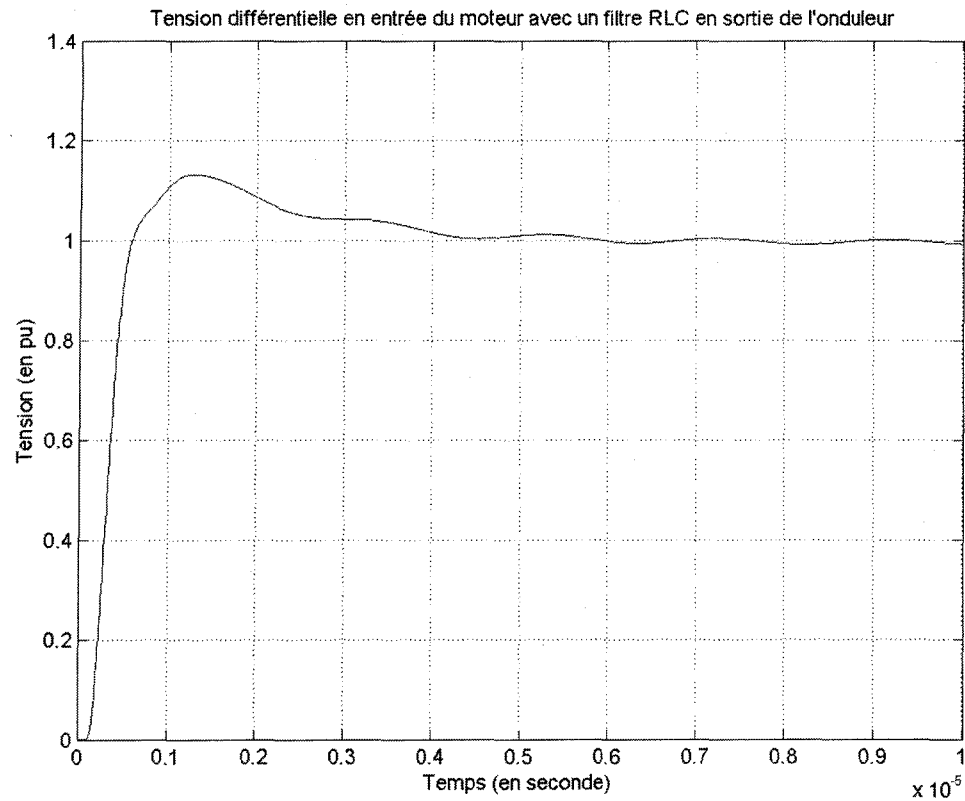


Figure 41 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un filtre RLC aux bornes de l'onduleur

Notre simulation du système a donc permis de bien représenter les surtensions pour différentes longueurs de câble et de filtrer celles-ci pour revenir à des niveaux acceptables de tension aux bornes du moteur. Maintenant, nous allons valider nos résultats de simulation à l'aide de résultats expérimentaux.

## CHAPITRE 5

### RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous allons maintenant faire le même montage que lors de la simulation, afin de valider nos résultats de simulation. La topologie du système est représentée à la figure 42.

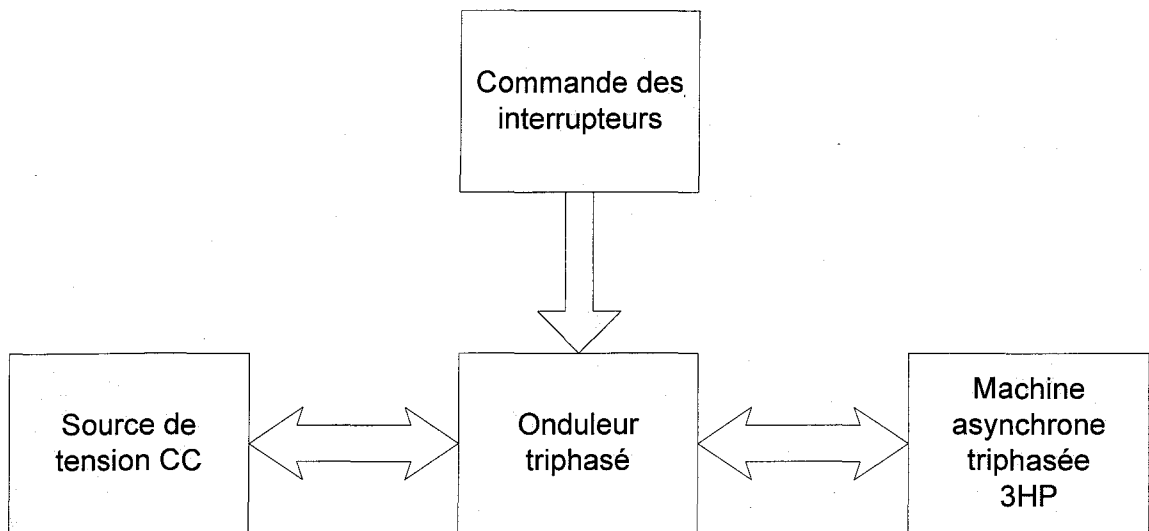


Figure 42 Topologie du montage pratique

### 5.1 Description du contrôleur

#### 5.1.1 Étude du contrôleur

Nous allons utiliser le contrôleur MC68332 (Blanchette, 2003) afin de générer les impulsions de l'onduleur. Le MC68332 fournit un système de développement et de



débugage Low-cost utilisant le moniteur installé en EPROM. Le moniteur permet à l'utilisateur de charger le code dans la RAM, mettre des points d'arrêt, des traces, afficher / modifier des registres et mémoires. Après avoir rendu le code opérationnel, l'utilisateur peut le replacer en reprogrammant l'EEPROM de la carte pour des applications dédiées. Notre code a pour but de générer les impulsions d'attaque pour les cartes de commande des IGBT. Ce contrôleur est indiqué à la figure 43.

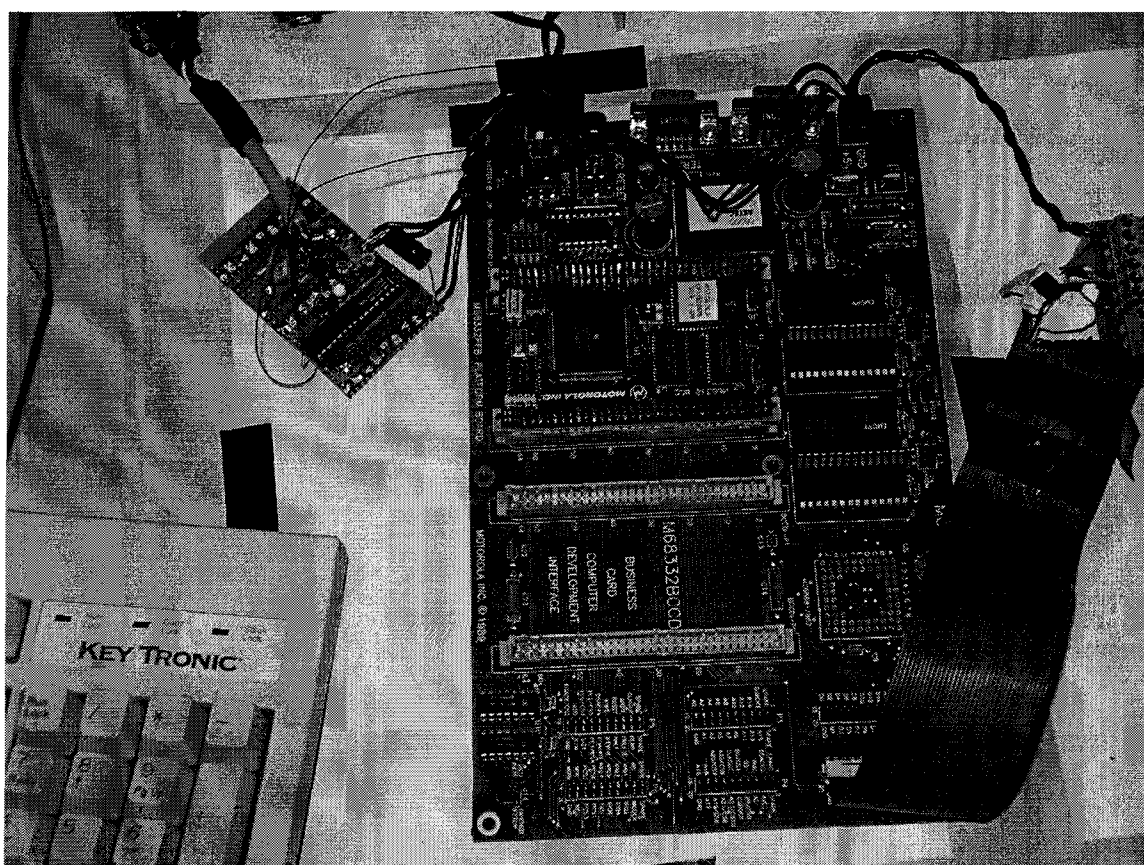


Figure 43 Photo du contrôleur MC68332

### 5.1.2 Branchement du contrôleur MC68832 au pont triphasé à IGBT

Le raccordement du contrôleur MC68332 au pont triphasé à IGBT (Blanchette, 2003) se fait selon la figure 44. Les sorties du TPU (time process unit) du contrôleur MC68332

sont branchées à une isolation galvanique. Cette isolation est composée de photos coupleurs de type 6N137. Les sorties de niveau TTL sont appliquées à un module permettant de contrôler les temps morts des interrupteurs du pont. Les six sorties de niveau TTL sont branchées aux circuits d'attaques des interrupteurs. Ces circuits sont composés de transformateurs d'isolation, de photos coupleurs et de pilotes de grilles de MOSFET. Le pont est alimenté par une source à courant continu limitée en courant .

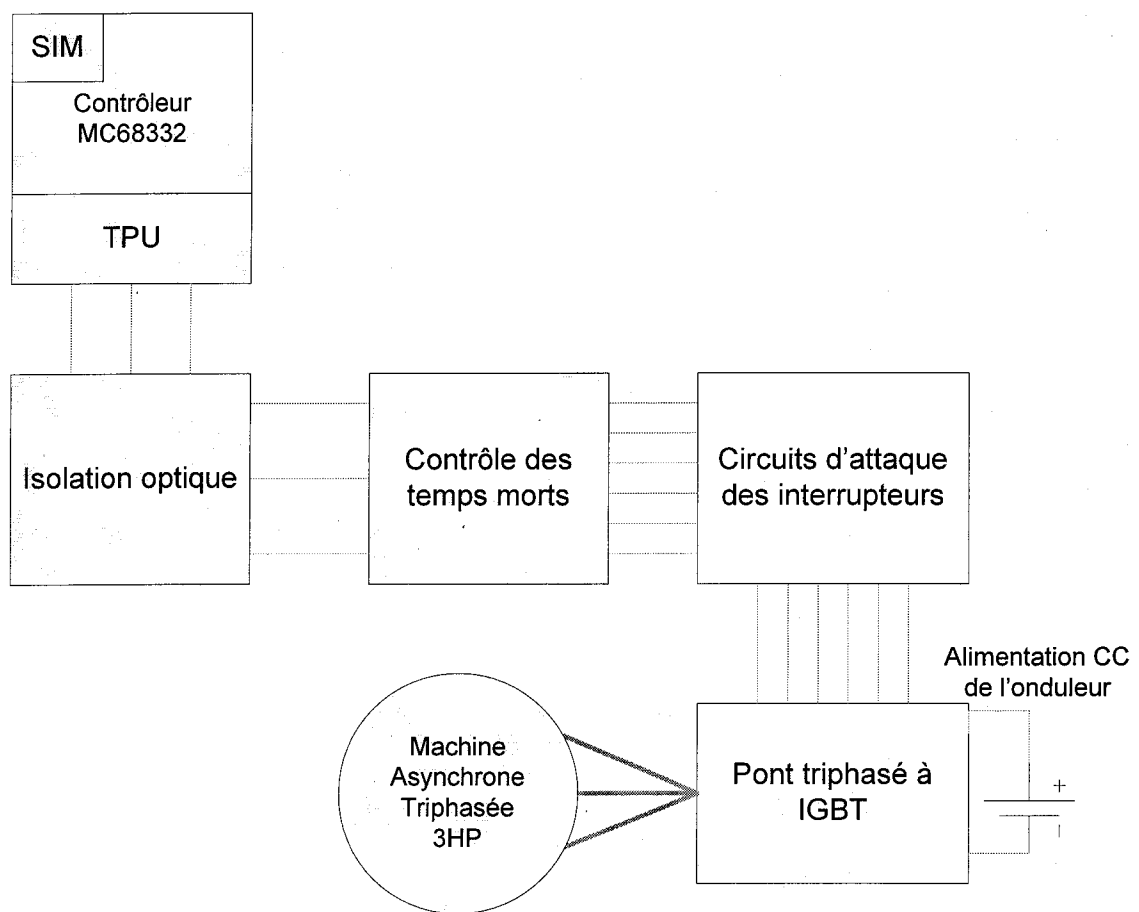


Figure 44 Schéma du branchement du contrôleur à l'onduleur

Le contrôleur sert à envoyer les impulsions en fonction des paramètres désirés. Le contrôle des temps morts est effectué grâce à un petit circuit de logique qui sert à créer des retards afin que les signaux ne se chevauchent pas. Les impulsions sont alors

transmises aux circuits d'attaque des interrupteurs (Gate drive seconde génération, voir Annexe 2). Ces impulsions contrôlent alors les IGBT de l'onduleur qui est relié à une source CC et permettent de créer les impulsions nécessaires pour faire tourner le moteur. (Voir Annexe 1 pour le schéma des IGBT).

## **5.2 Fonctionnement de l'onduleur**

Le but de cet onduleur est de générer des impulsions de type MLI afin d'alimenter un moteur. La figure 45 représente le pont à IGBT et le moteur (les impédances  $Z$  représentent le moteur) quand tous les interrupteurs sont ouverts. La figure 46 représente le pont en fonctionnement, on constate qu'il ne peut y avoir plus d'un interrupteur par bras en fonctionnement. Pour cela, il faut que le contrôleur n'active pas les interrupteurs en même temps et de plus, il faut prévoir des temps morts entre les signaux, pour qu'il n'y ait pas de chevauchement.

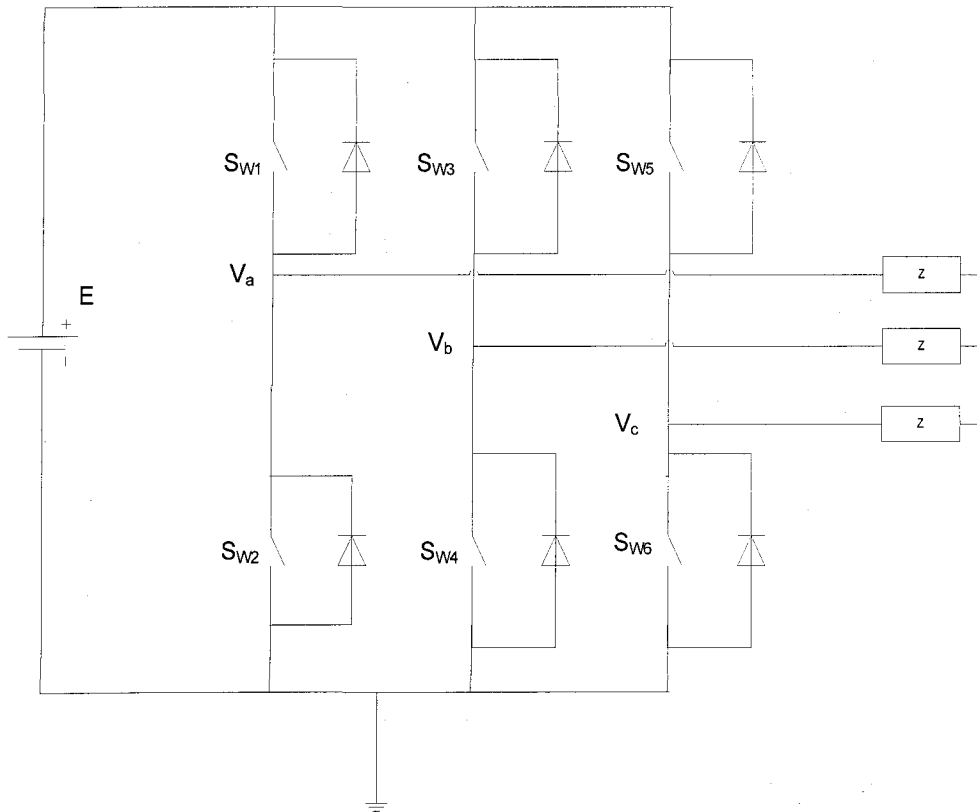


Figure 45 Charge triphasée reliée à un pont (1)

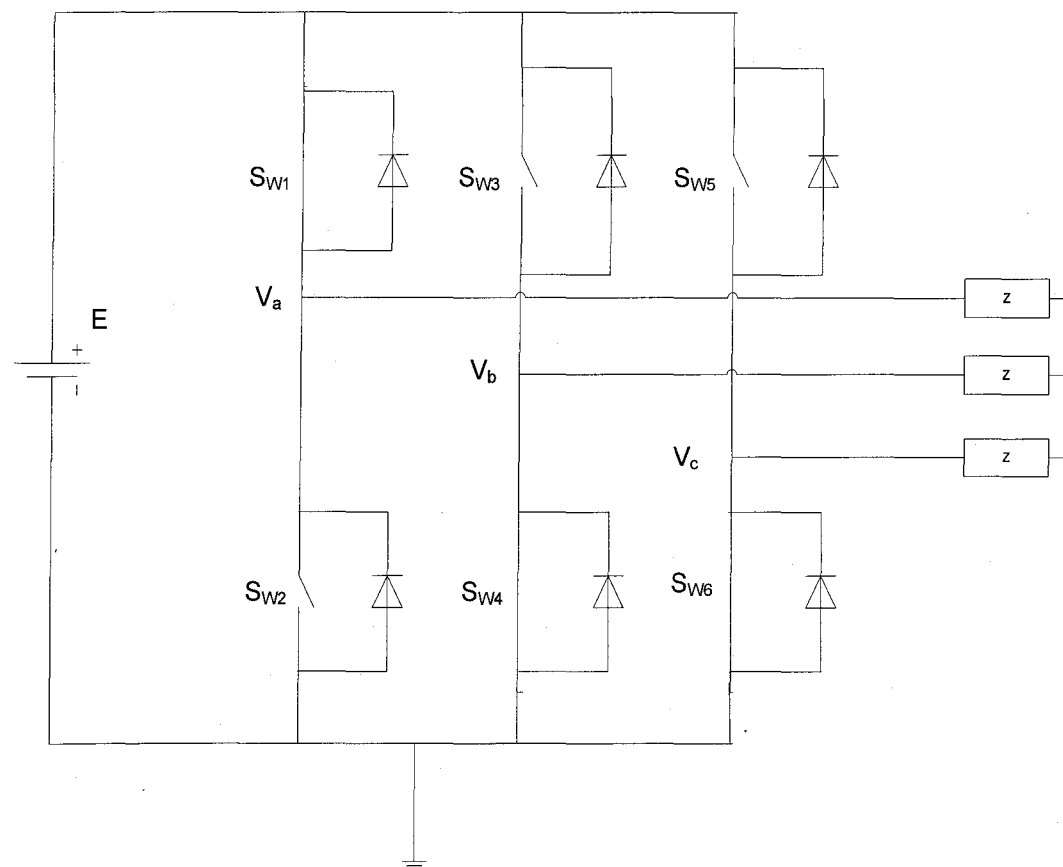


Figure 46 Charge triphasée reliée à un pont (2)

### 5.3 Description du montage pratique

Nous allons dans cette partie détailler les composants du montage expérimental en l'illustrant à l'aide de photo du banc d'essai. Le montage entier est illustré par la photo 47. La partie génération des impulsions est représentée sur les photos 48 et 49 et la partie puissance sur les photos 50, 51, 52, 53 et 55.

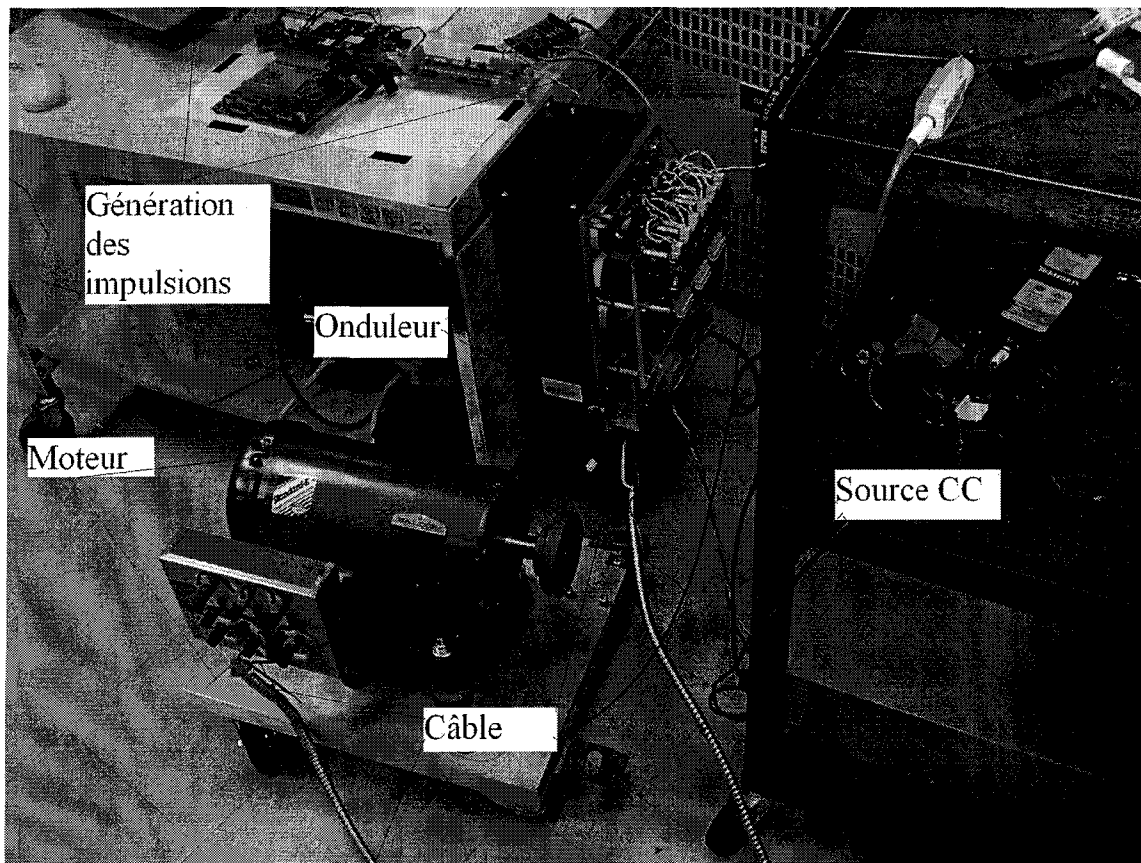


Figure 47 Photo du montage en entier

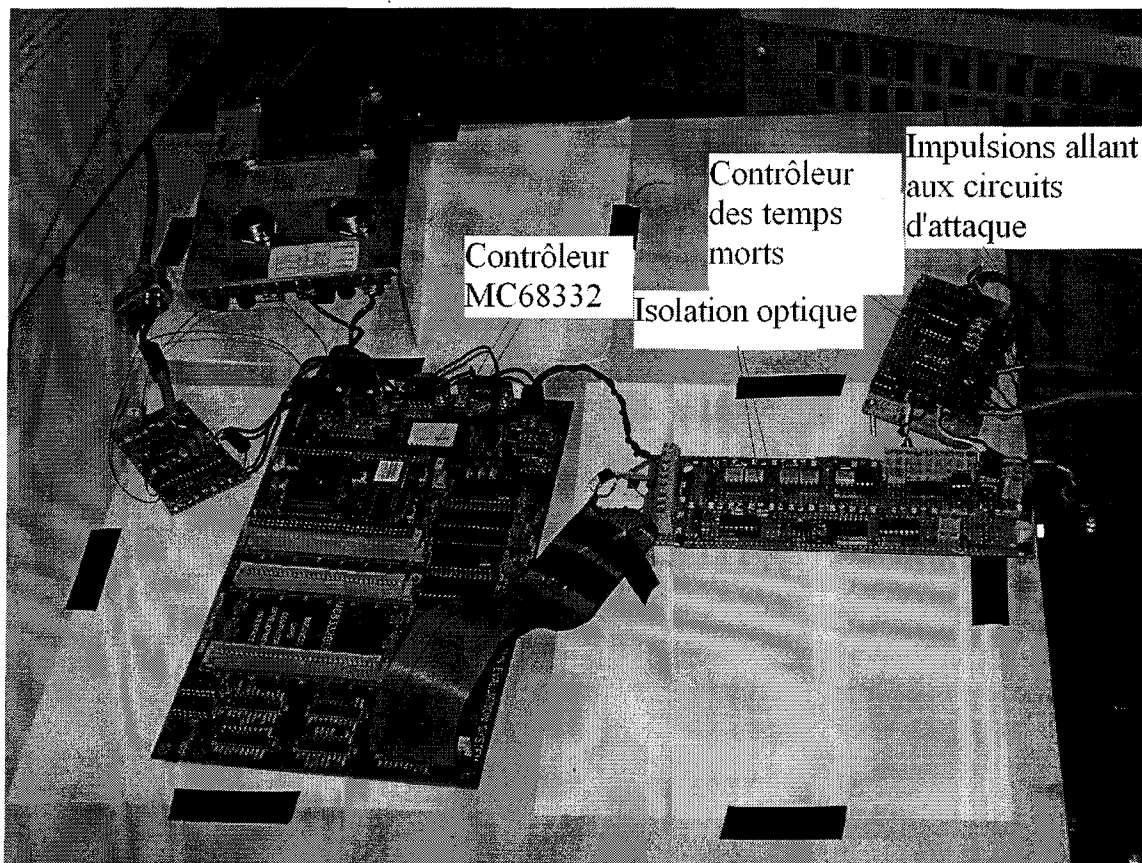


Figure 48 Photo de la partie génération des impulsions (1)

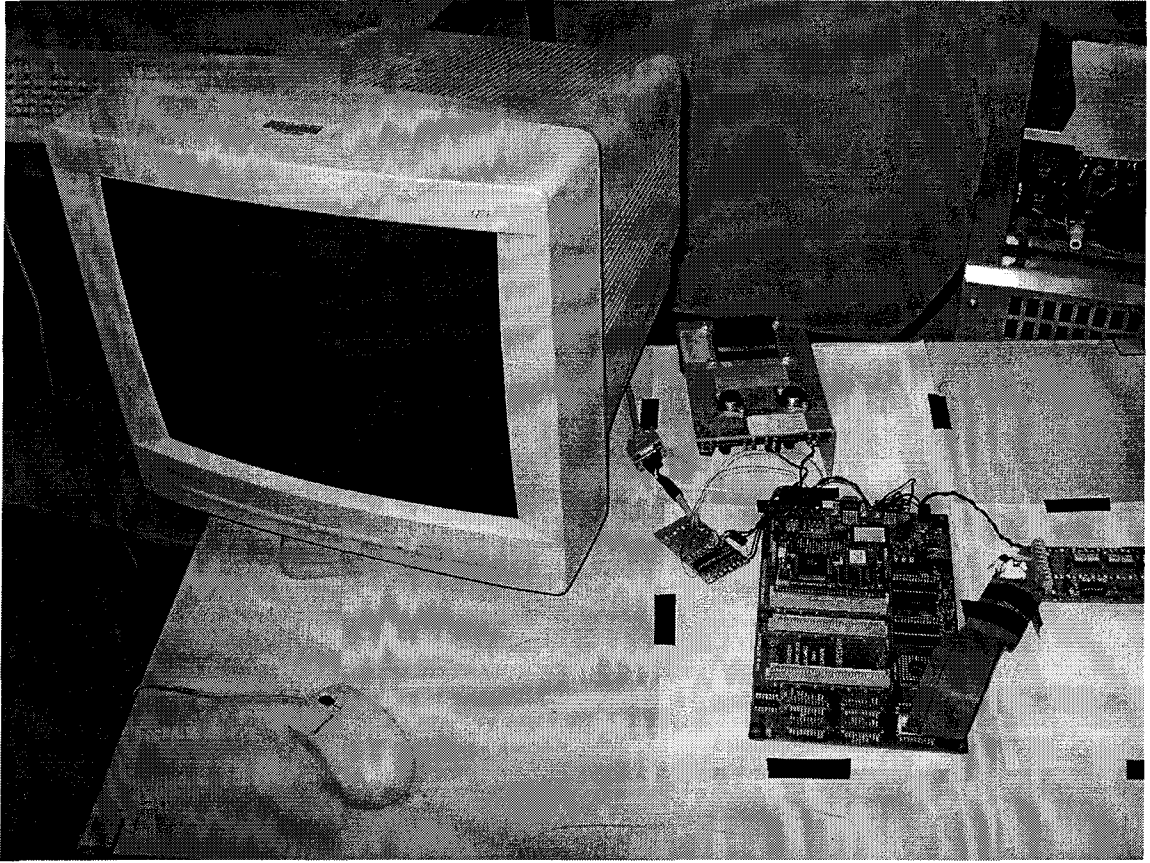


Figure 49 Photo de la partie génération d'impulsions (2)



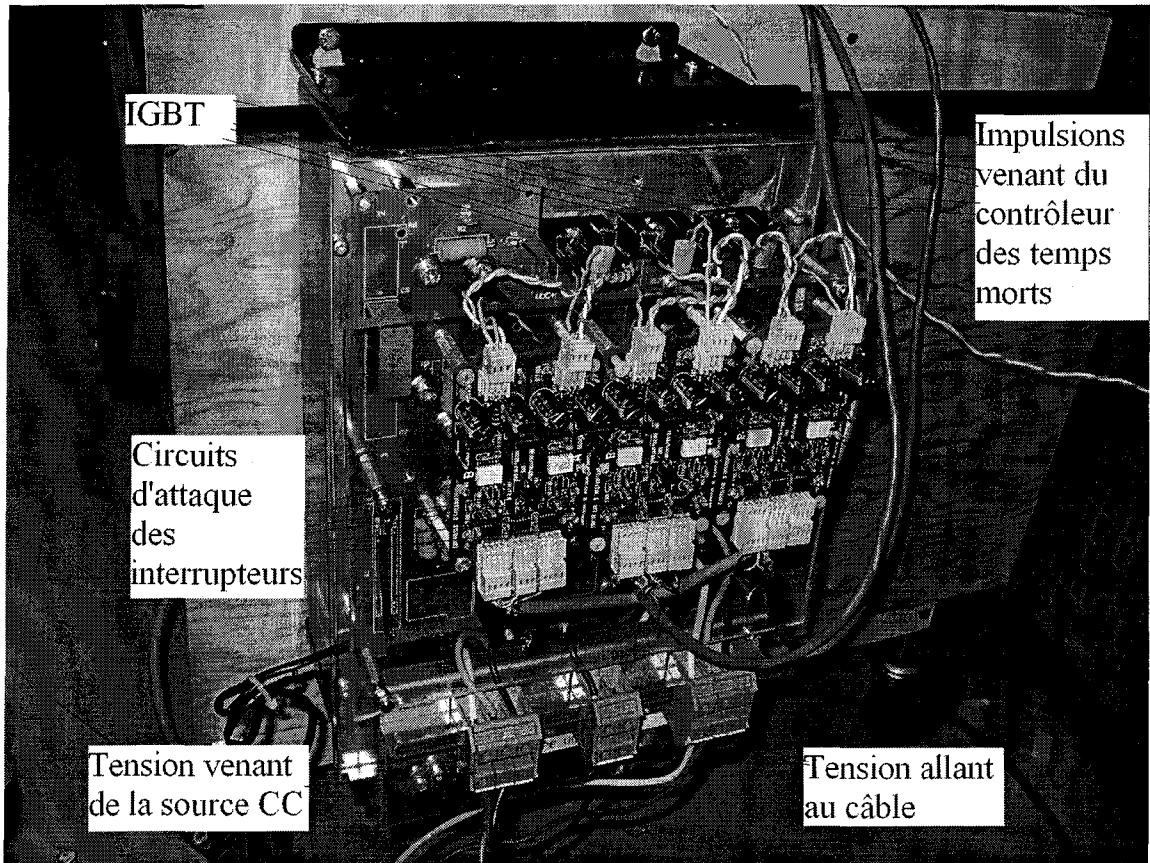


Figure 50 Photo de l'onduleur

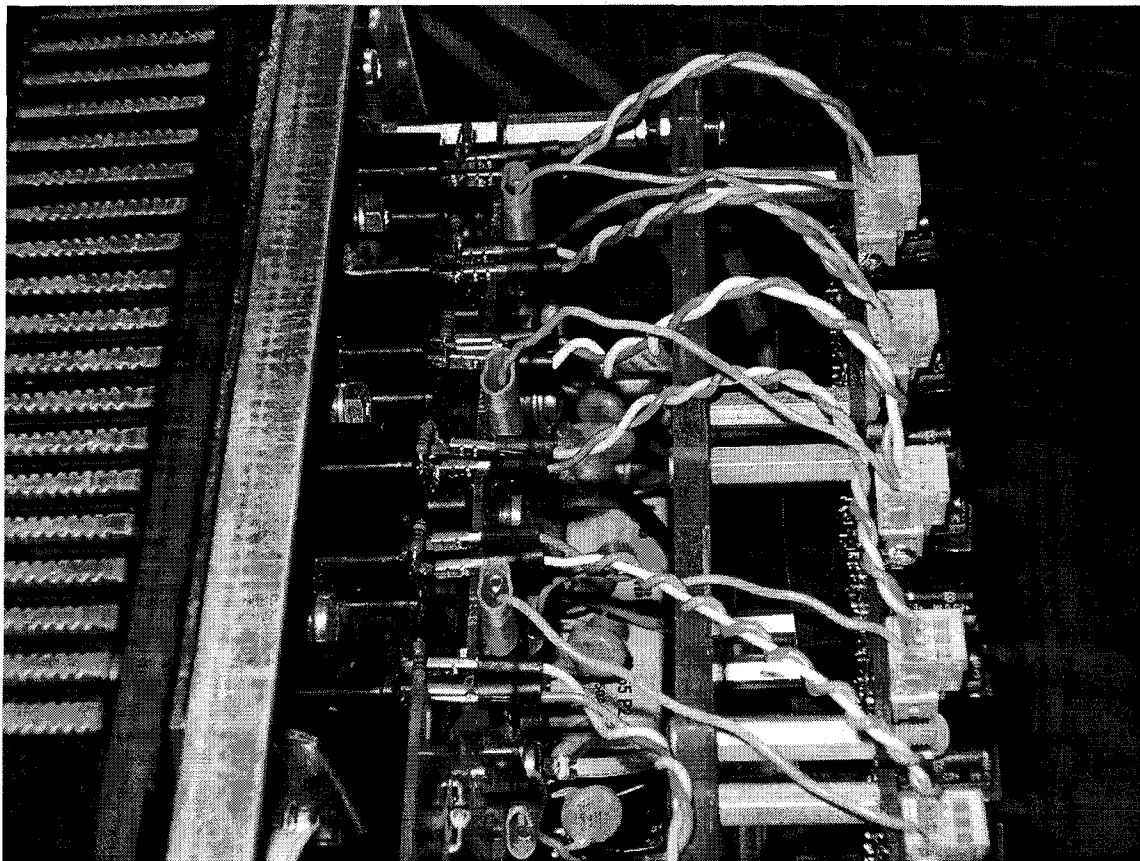


Figure 51 Photo des circuits d'attaque reliés aux IGBT

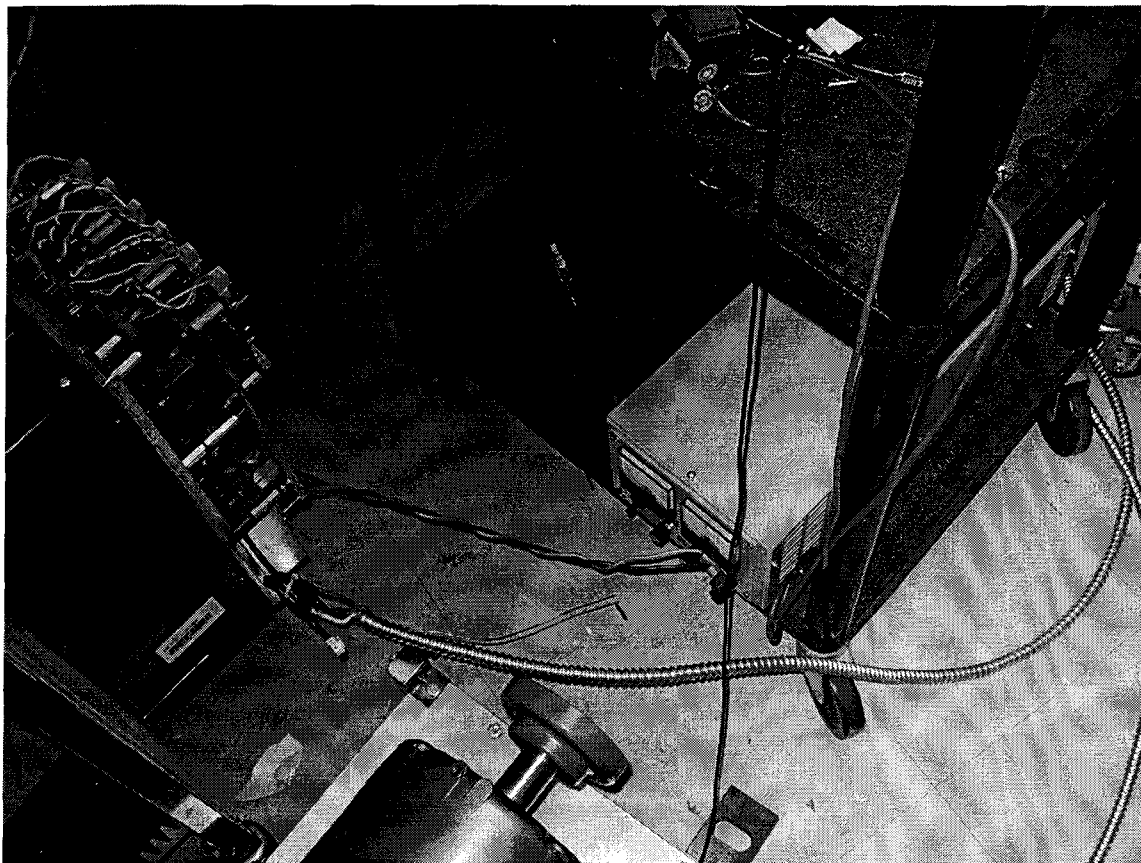


Figure 52 Photo de la source CC reliée à l'onduleur

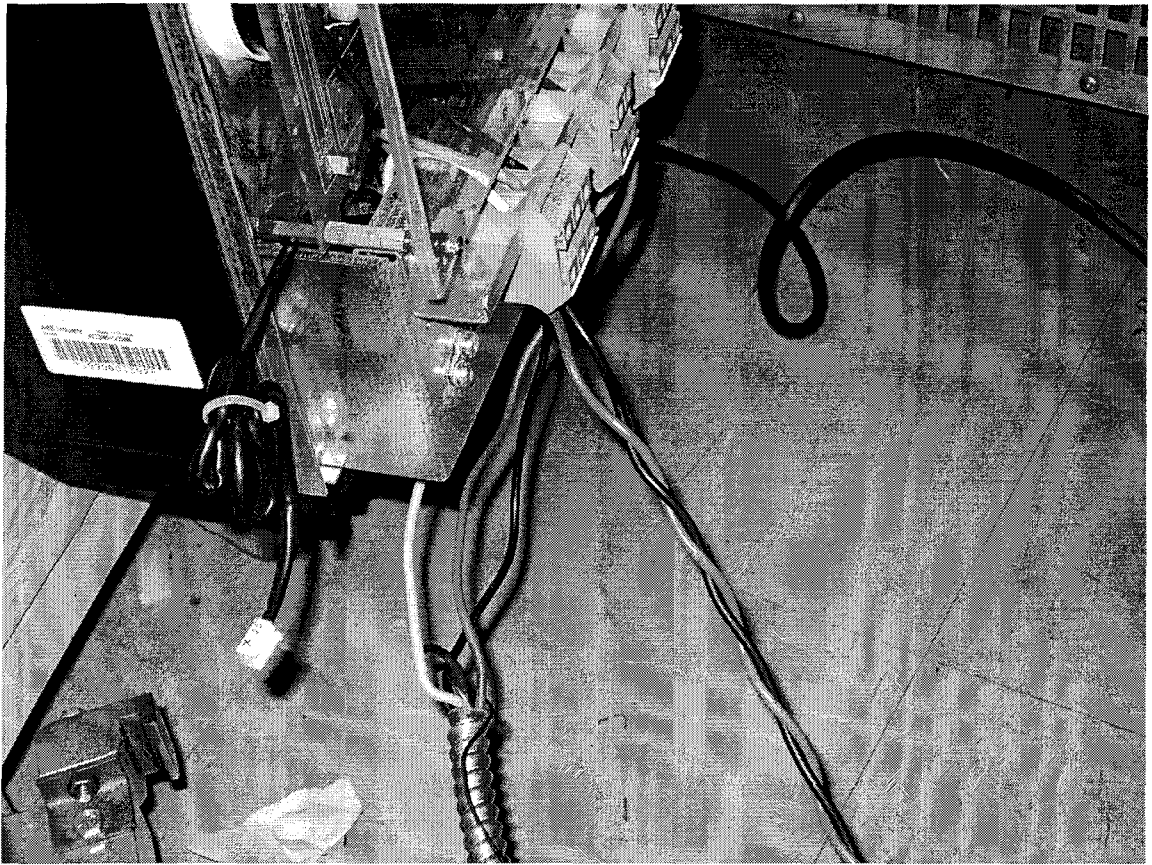


Figure 53 Photo du câble partant de l'onduleur

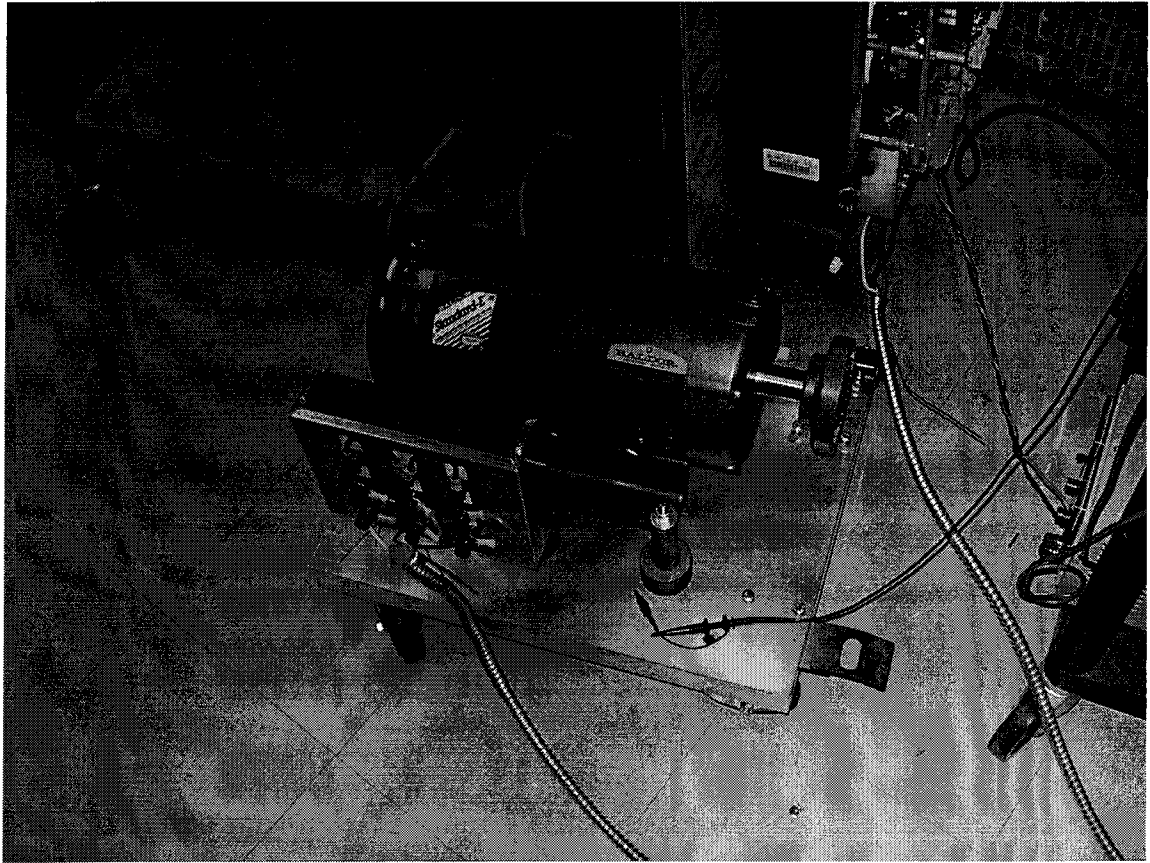


Figure 54 Photo du câble allant aux bornes du moteur

#### 5.4 Détermination des surtensions

Une fois que notre onduleur fonctionne correctement, nous pouvons commencer nos tests sur la variation des longueurs de câble. Le temps de montée du signal MLI étant fixé par les résistances de puissances présentes sur les Gate drive et le microcontrôleur MC68332. Le temps de montée des impulsions est le même que lors de la simulation afin de pouvoir ultérieurement comparer nos résultats, il est de  $0,1\mu\text{sec}$ . Nous allons prendre comme dans la partie simulation, trois différentes longueurs de câble : un mètre, cinq mètres et dix mètres.

### 5.4.1 Fonctionnement du montage avec un câble d'un mètre

Grâce à un oscilloscope, nous pouvons observer les tensions différentielles aux bornes du moteur. Tous d'abord, nous relierons l'onduleur et le moteur avec un câble d'une longueur d'un mètre. Nous constatons alors une légère surtension de l'ordre de 13%. Nous observons aussi que lorsque le régime permanent est établi, l'onde n'est pas linéaire. Ceci est dû au bruit et à l'oscilloscope. Nous allons maintenant utiliser d'autres longueurs de câble. La tension différentielle obtenue est illustrée à la figure 55.

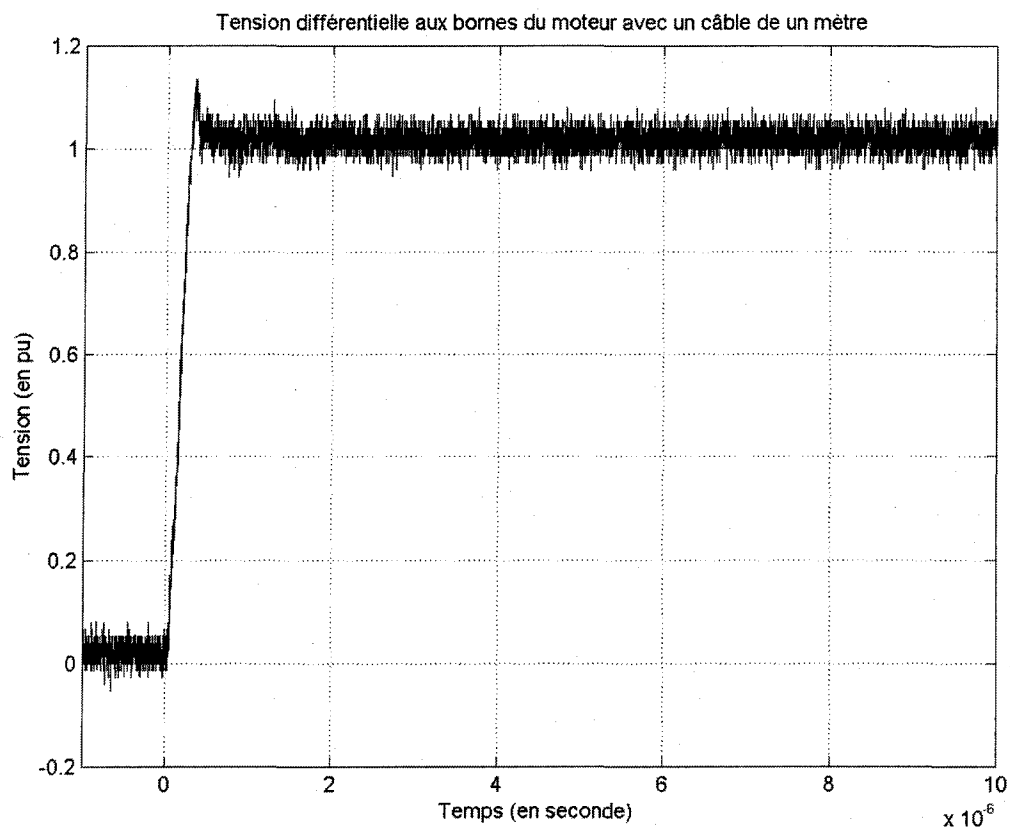


Figure 55 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre entre le moteur et l'onduleur

### 5.4.2 Fonctionnement du montage avec un câble de cinq mètres

Maintenant, nous relierons l'onduleur et le moteur avec un câble d'une longueur de cinq mètres. Nous observons alors une plus grande surtension que précédemment de l'ordre de 66%. De plus, le temps de l'amortissement s'est considérablement accru par rapport à l'expérience précédente. La tension différentielle obtenue est illustrée à la figure 56.

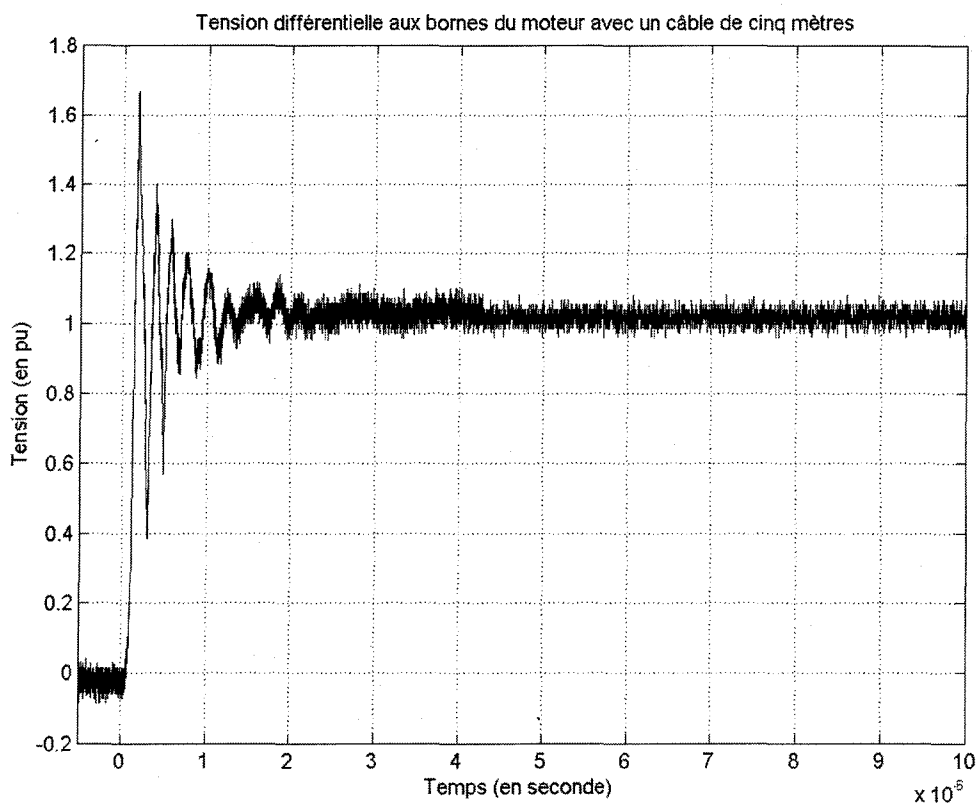


Figure 56 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres entre le moteur et l'onduleur

### 5.4.3 Fonctionnement du montage avec un câble de dix mètres

Maintenant, nous relierons l'onduleur et le moteur avec un câble d'une longueur de dix

mètres. Nous constatons alors une plus grande surtension que précédemment de l'ordre de 90%. De plus, le temps de l'amortissement s'est encore considérablement accru par rapport à l'expérience précédente. La tension différentielle obtenue est illustrée à la figure 57.

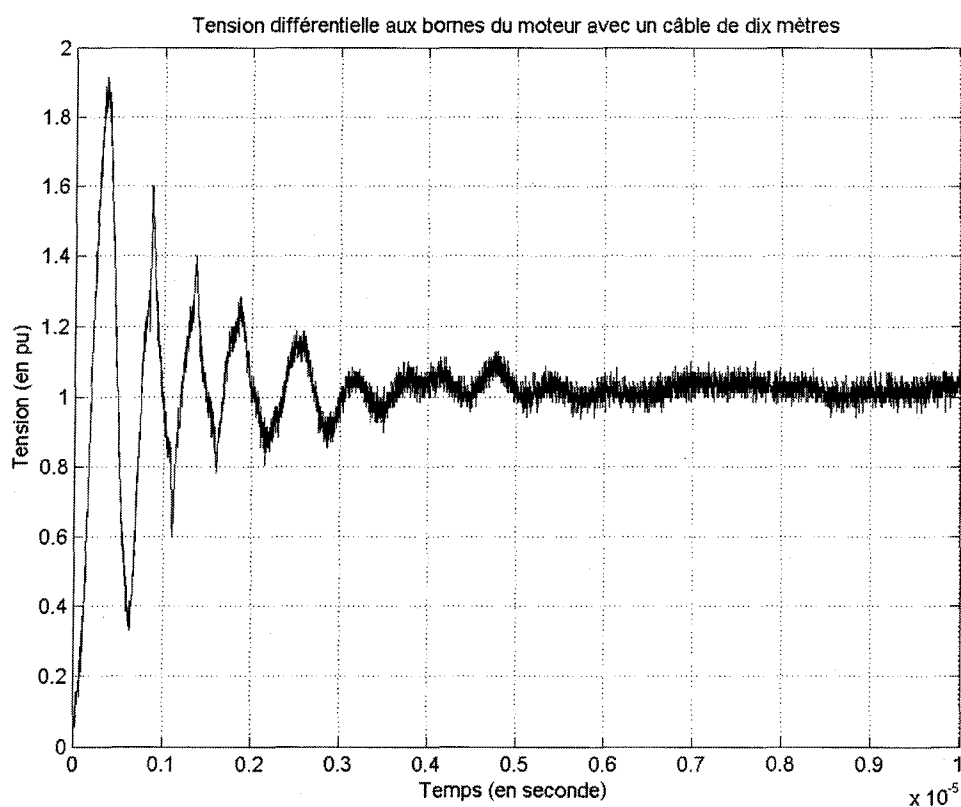


Figure 57 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur

#### 5.4.4 Réduction de la surtension avec un filtre RC

Nous avons précédemment constaté une surtension de l'ordre de 90% avec un câble de dix mètres de long. Nous allons maintenant tenter de réduire cette surtension grâce à l'utilisation d'un filtre RC que nous allons relier aux bornes du moteur. Le filtre est



illustré à la figure 58. Nous avons posé les résistances de puissance et les condensateurs sur un radiateur afin de dissiper la chaleur. La figure 58 représente ce filtre et les figures 59 et 60 représentent la façon de l'installer aux bornes du moteur. Il convient aussi de déterminer la puissance dissipée afin de bien dimensionner la résistance de puissance. Cette puissance dépend de la tension et du courant, dans notre cas comme nous avons un courant relativement faible, nous trouvons une puissance de l'ordre de  $20W$ . Nous avons donc pris des résistances de puissance qui pouvaient au moins dissiper cette puissance.

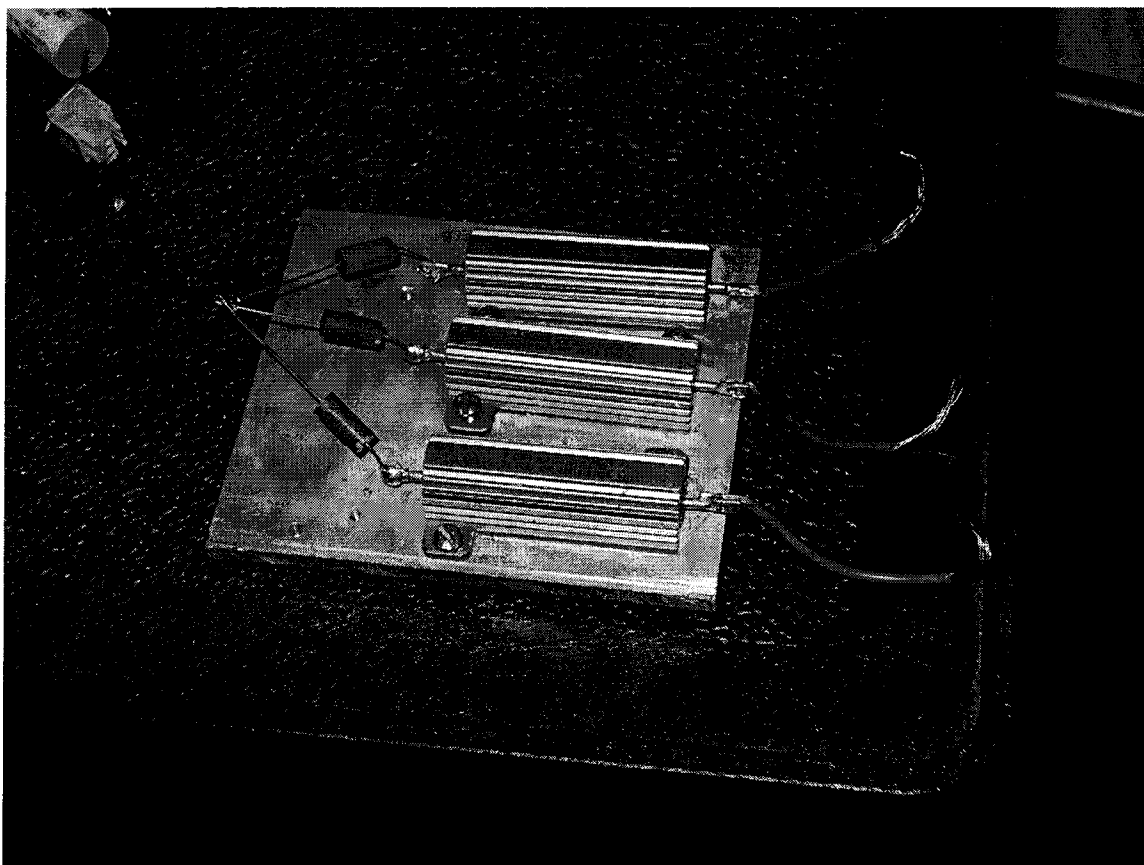


Figure 58 Photo du filtre RC

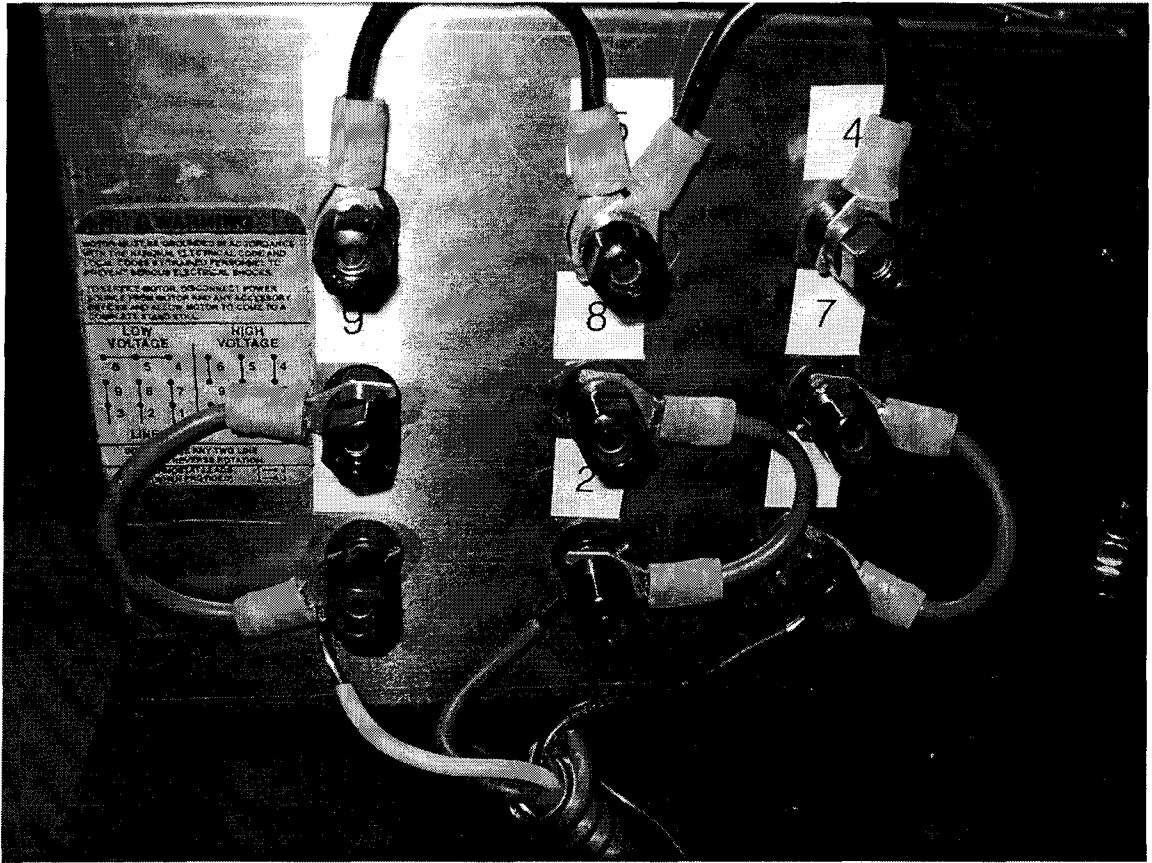


Figure 59. Photo du moteur sans filtre

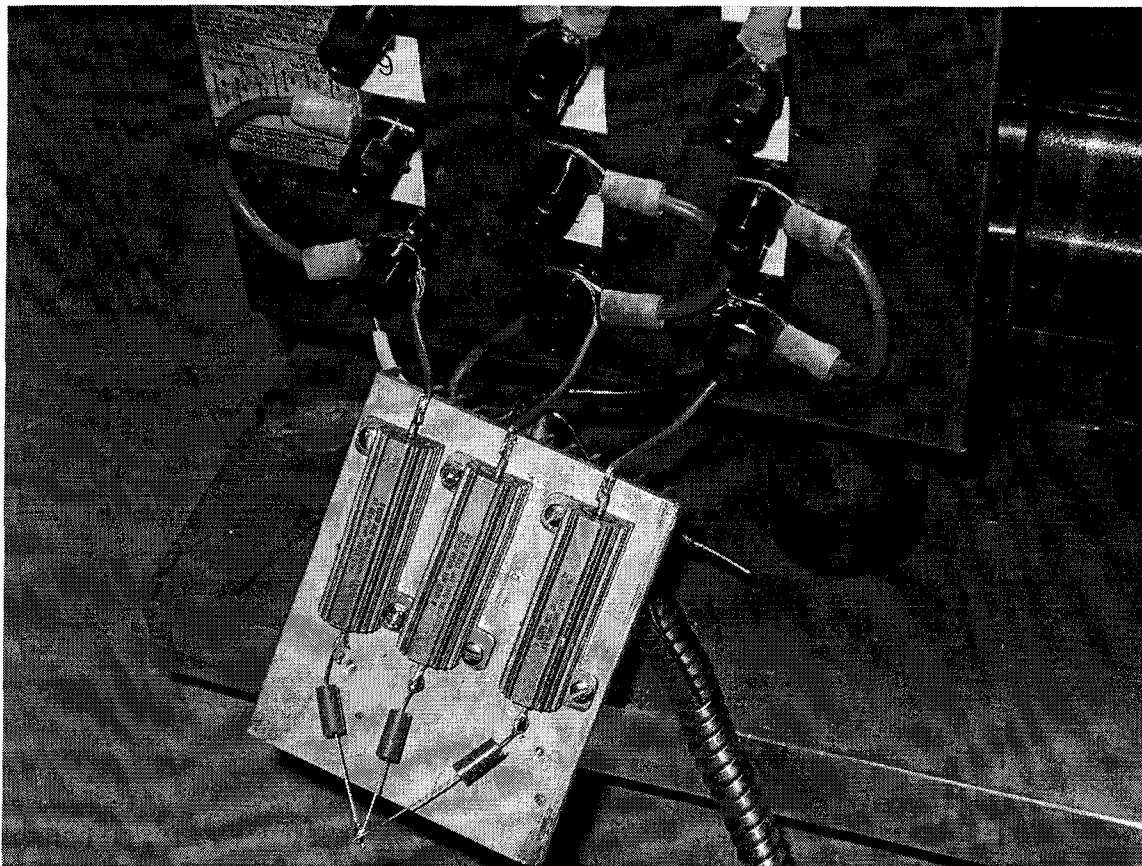


Figure 60 Photo du moteur avec un filtre RC

On constate en regardant sur l'oscilloscope que la tension différentielle aux bornes du moteur a sensiblement baissée, elle est désormais de l'ordre de 30% au lieu des 90% précédemment. De plus le temps d'amortissement a été énormément réduit. Ce filtrage est donc efficace. La tension différentielle aux bornes du moteur est illustrée à la figure 61.

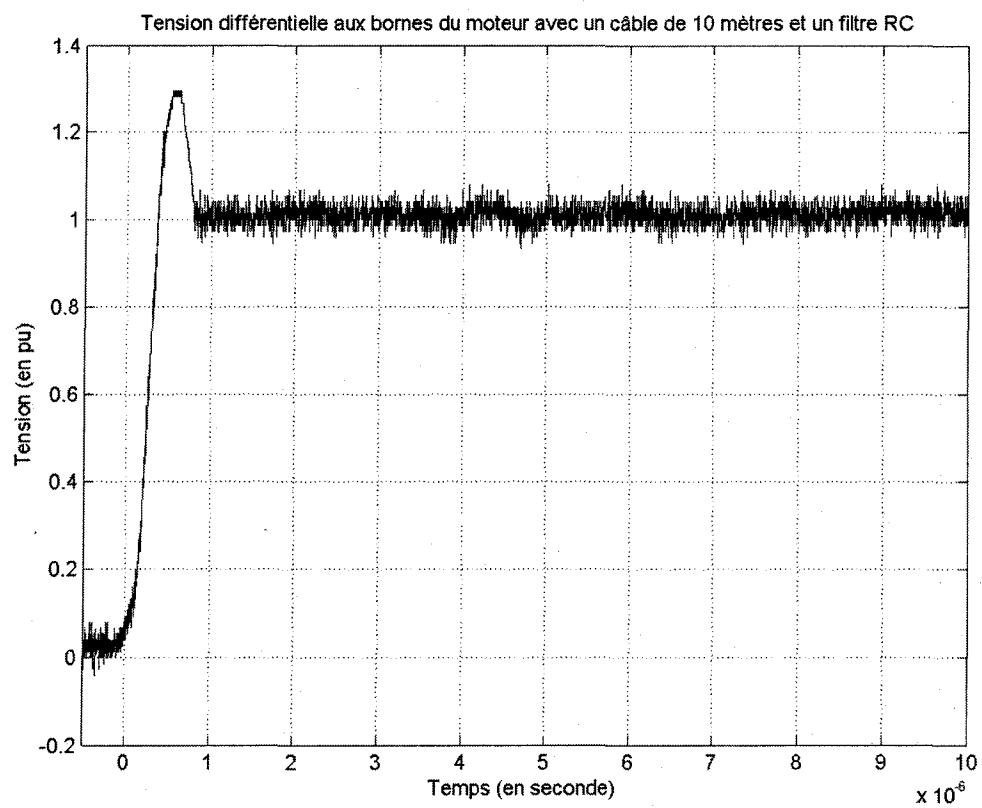


Figure 61 Tension différentielle aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur et un filtre RC aux bornes du moteur.

## **CHAPITRE 6**

### **COMPARAISON DES RÉSULTATS ET RECOMMANDATION**

#### **6.1 Comparaison des résultats**

Nous allons sur une même figure représenter nos résultats de simulation et pratiques pour les quatre essais effectués avec notre banc d'essai. Ainsi, nous pourrions déterminer si nos résultats sont cohérents.

##### **6.1.1 Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble d'un mètre**

Les tensions différentielles aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre entre le moteur et l'onduleur obtenues grâce à la simulation et en pratique sont indiquées à la figure 62. On constate une différence de l'ordre de 3% entre les résultats pratiques et ceux de la simulation pour ce qui est de l'amplitude maximum.

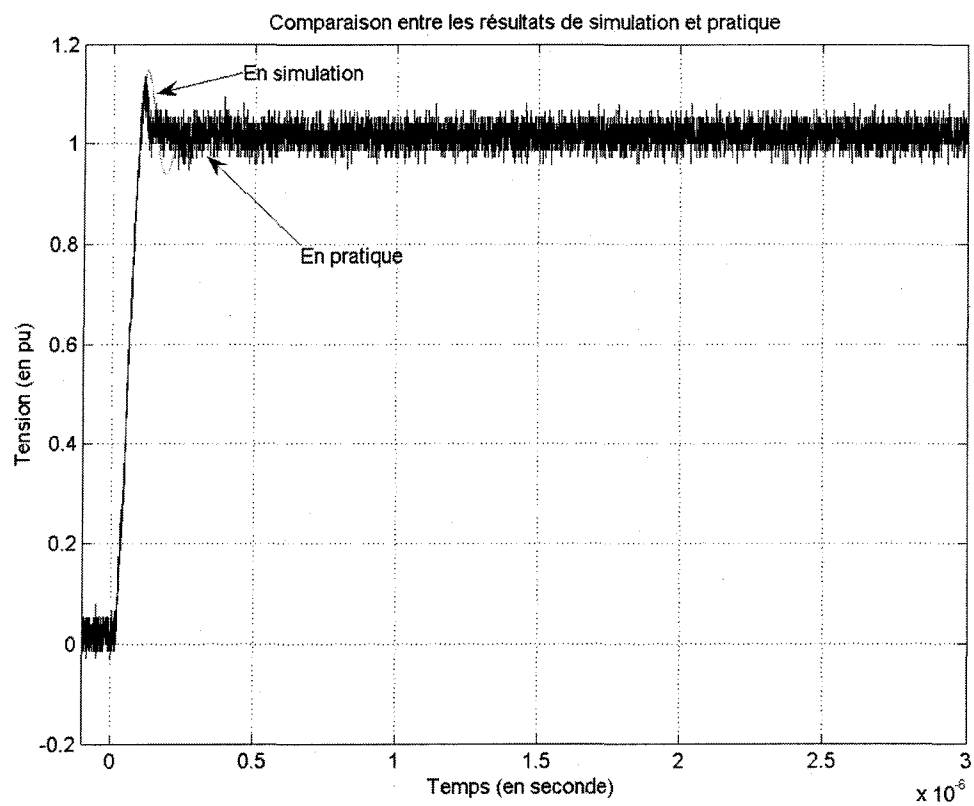


Figure 62 Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre

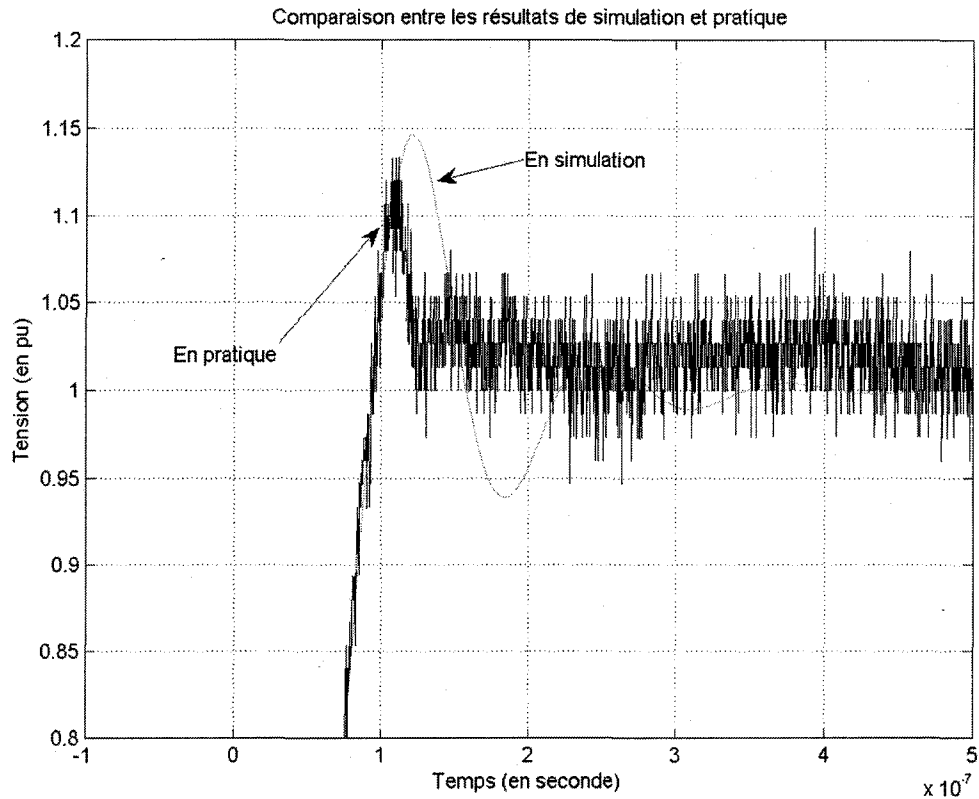


Figure 63 Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble d'un mètre (zoom)

### 6.1.2 Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de cinq mètres

Les tensions différentielles aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres entre le moteur et l'onduleur obtenues grâce à la simulation et en théorie sont indiquées à la figure 64. Pour ce qui est de l'amplitude maximum, on constate une différence de l'ordre de 3% entre les résultats pratiques et théoriques. A partir de la formule (4-1), on peut comparer nos résultats avec la formule suivante :

$$u(t) = Ae^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (6-1)$$

Où  $\varphi$ , représente le déphasage.

On constate alors, que les deux courbes de tension ne sont pas en phase, que la constante de temps  $\tau$  diffère, elle est un peu plus faible en pratique car l'amortissement est plus prononcé. Quand à la fréquence, elle est à peu près constante.

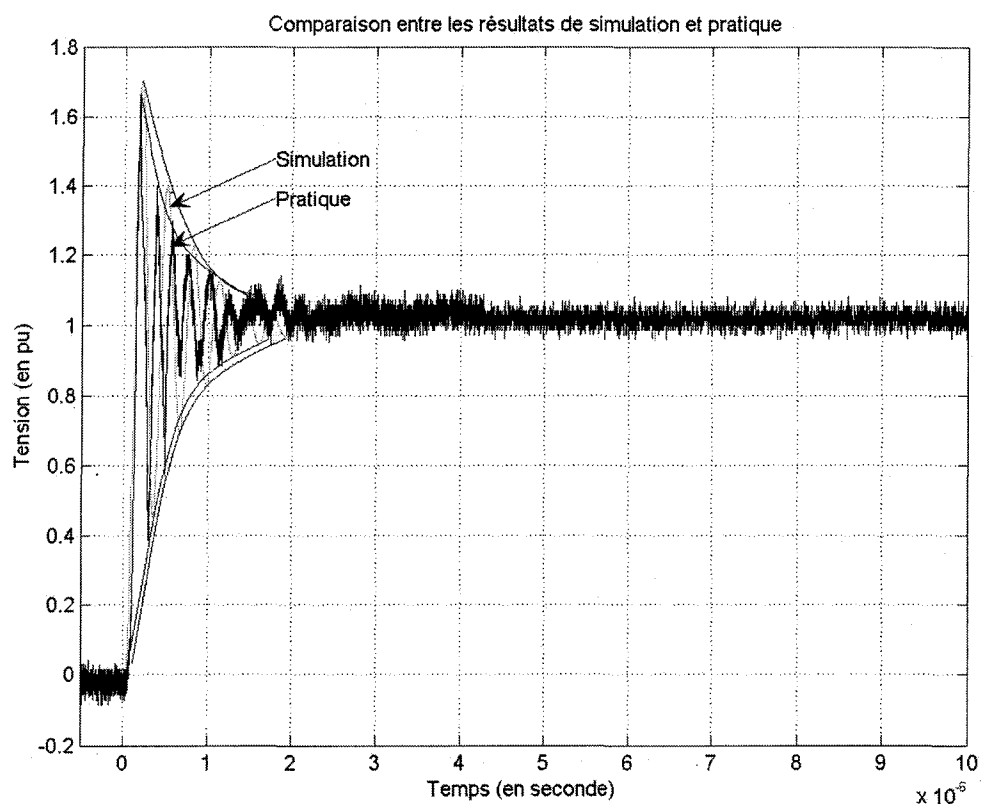


Figure 64 Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble de cinq mètres

### 6.1.3 Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de dix mètres

Les tensions différentielles aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur obtenues grâce à la simulation et en pratique sont indiquées à la figure 65. On constate une différence de l'ordre de 3% entre les résultats pratiques et de simulation pour ce qui est de l'amplitude maximum. A partir de la formule (6-1) de la tension différentielle aux bornes du moteur, on constate que les deux courbes de tension



ne sont pas en phase, que la constante de temps  $\tau$  diffère, elle est sensiblement plus faible en pratique car l'amortissement est plus rapide. Quand à la fréquence, elle est à peu près égale. Le fait que l'amortissement soit plus élevé en pratique qu'en théorie doit certainement être due à des réflexions additionnelles.

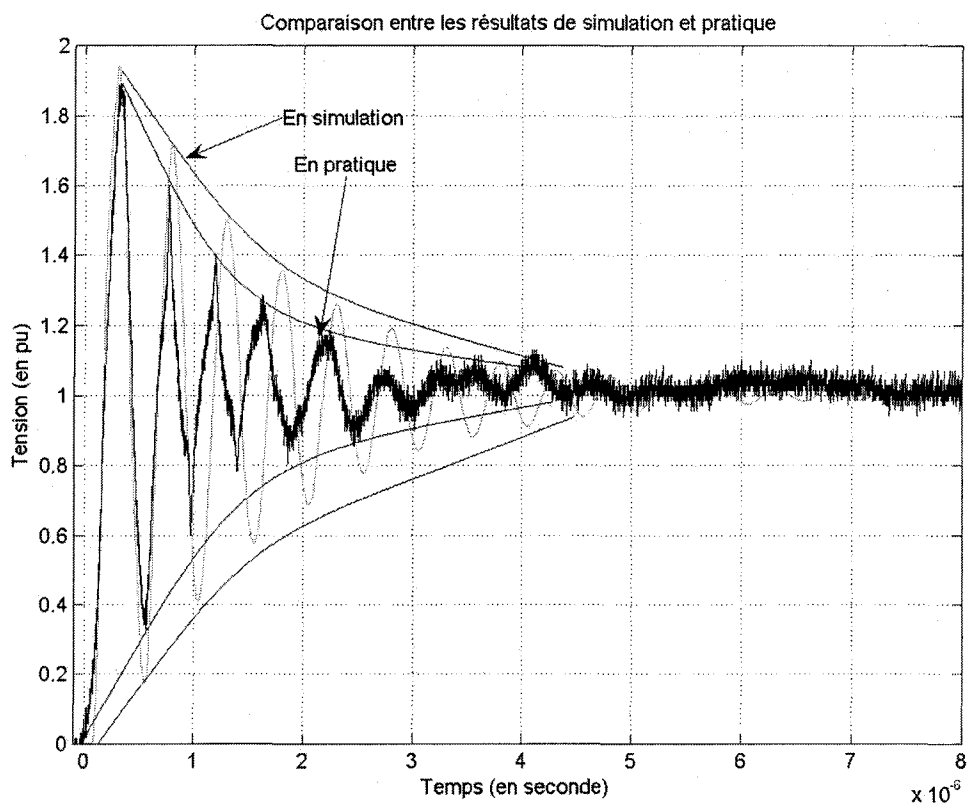


Figure 65 Tension différentielles aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres

#### 6.1.4 Comparaison des résultats de simulation et pratique pour le câble de dix mètres avec un filtre RC aux bornes du moteur

Les tensions différentielles aux bornes du moteur avec un câble de dix mètres entre le moteur et l'onduleur obtenues grâce à la simulation et en pratique sont indiquées à la figure 66. On constate une différence de l'ordre de 3% entre les résultats pratiques et de

simulation pour ce qui est de l'amplitude maximum. De plus on observe que les résultats ne sont pas en phase.

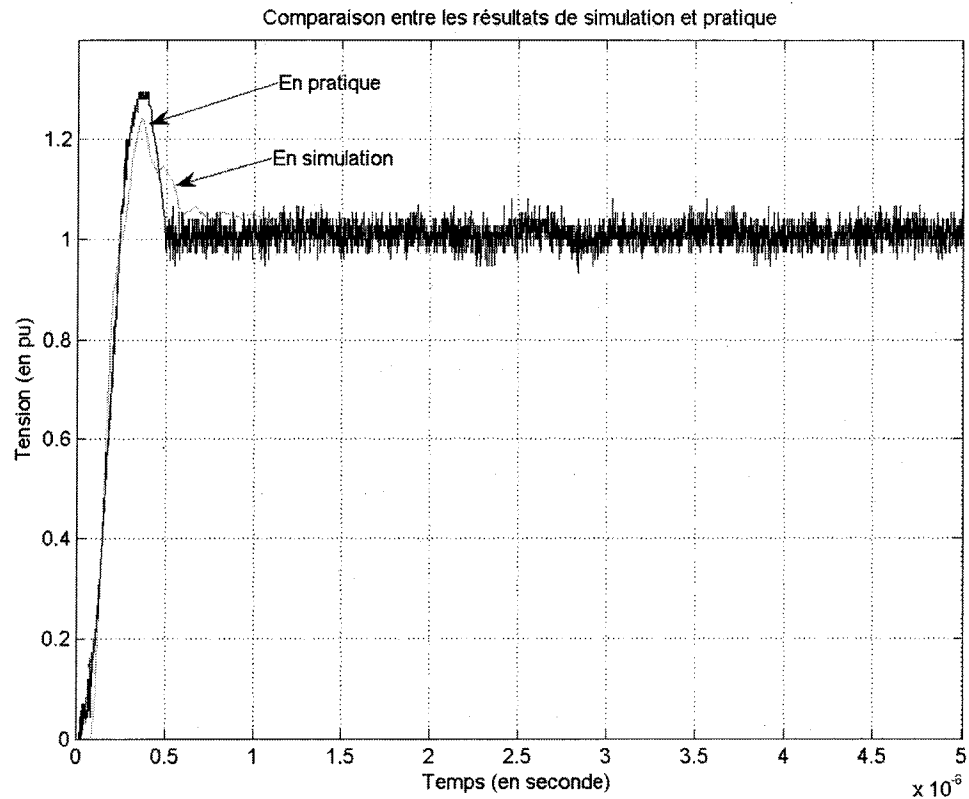


Figure 66 Tension différentielles aux bornes du moteur avec un filtre RC

Donc nos résultats de simulation et pratiques sont relativement proche pour ce qui est de l'amplitude maximum. L'amortissement du signal se fait à peu près en même temps, la différence est qu'ils ne sont pas en phase. Pour autant l'objectif principal qui était d'obtenir la tension maximale est atteint. Le tableau 6-1 résume ces données. On constate d'assez grande différence pour ce qui est de la fréquence et de légères différences pour ce qui est de la constante de temps.

Tableau I  
Tableau récapitulatif des résultats

	Amplitude maximale (en pu)	Écart pour l'amplitude maximale (en %)	Fréquence (en MHz)	Écart (en %)	Constante de temps	Écart (en %)
Simulation avec un câble d'un mètre	1.16					
Pratique avec un câble d'un mètre	1.13	3				
Simulation avec un câble de cinq mètres	1.70		3.4		0.481	
Pratique avec un câble de cinq mètres	1.66	2,4	3.8	10.5	0.444	7.69
Simulation avec un câble de dix mètres	1.94		2.1		0.585	
Pratique avec un câble de dix mètres	1.90	2,1	2.4	12.5	0.629	6.99
Simulation avec un filtre RC	1.26					
Pratique avec un filtre RC	1.30	3,17				

## 6.2 Recommandation

À la vue des résultats, nous pouvons valider le modèle du moteur utilisé sous Simulink. Le problème des surtensions est donc prévisible et comme nous l'avons vu, il peut être

très dangereux, même pour de courtes longueurs de câble si le temps de montée du signal MLI est faible. Il convient donc de prévoir des filtres afin de se protéger contre ce phénomène. Un filtre RC aux bornes du moteur peut donc faire l'affaire, mais au vu des résultats, filtrer le signal MLI en sortie de l'onduleur avec un filtre RLC est la solution la plus performante. Il faut aussi signaler qu'il existe aussi une autre façon de réduire ces surtensions qui est l'utilisation de câbles spéciaux empêchant les réflexions. Pour autant ces câbles sont relativement onéreux.

## CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de représenter et de réduire les surtensions qui apparaissent aux bornes du moteur asynchrone triphasé lorsque celui-ci est alimenté par des longs câbles. Grâce au modèle de simulation de Lipo, Moreira, Venkataramanan et Bernet, nous avons réussi à représenter ces surtensions. Nous avons tout d'abord démontré que le modèle de moteur haute fréquence était valide et qu'il reproduisait bien les phénomènes de surtensions susceptibles d'apparaître dans le système Onduleur-Câble-Moteur. Ceci en validant nos résultats de simulation par des résultats pratiques. En effet, la différence entre nos résultats de simulation et pratiques est relativement faible. Nous pouvons donc conclure que cette méthode de représentation des surtensions est fiable et donne de bons résultats. Notons, qu'avec d'autres types de moteurs et de câbles (en effet, nous n'avons utilisé qu'un type de câble et un type de moteur de 3 HP), nous aurions pu étudier l'influence de la puissance du moteur aux phénomènes de surtensions.

Ensuite, nous avons démontré que l'on pouvait filtrer ces surtensions de quatre façons et les ramener à des niveaux acceptables qui ne mettaient pas le moteur en danger. Ces quatre filtres étant :

- Un filtre RC aux bornes du moteur
- Un filtre RLC aux bornes du moteur
- Un filtre inductif à la sortie de l'onduleur
- Un filtre RLC à la sortie de l'onduleur

Ces quatre filtres baissant de manière très significative le niveau de surtension, pour autant l'utilisation du filtre RC est très faible, car il entraîne d'important risque de brûlure (en effet, il peut dissiper jusqu'à 10% de la puissance motrice en chaleur).

Finalement en comparant ces filtres, nous avons pu en choisir un qui apporte sensiblement de meilleurs résultats en baissant plus que les autres le niveau de surtension. Ce filtre est un filtre RLC en sortie de l'onduleur.

## **ANNEXE 1**

### **IGBT utilisés**

**TOSHIBA****MG30V2YS40**

TOSHIBA GTR MODULE SILICON N CHANNEL IGBT

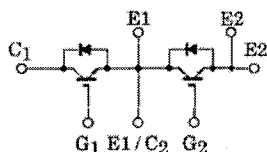
**MG30V2YS40**

HIGH POWER SWITCHING APPLICATIONS

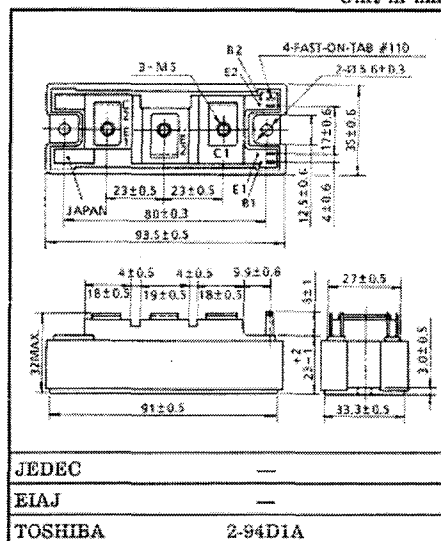
MOTOR CONTROL APPLICATIONS

- The Electrodes are Isolated from Case.
- High Input Impedance
- Includes a Complete Half Bridge in One Package.
- Enhancement-Mode
- High Speed :  $t_f = 1.5\mu\text{s}$  (Max.) ( $I_C = 30\text{A}$ )  
 $t_{rr} = 0.3\mu\text{s}$  (Max.) ( $I_F = 30\text{A}$ )

EQUIVALENT-CIRCUIT



Unit in mm



Weight : 202g (TYP.)

MAXIMUM RATINGS ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	1700	V
Gate-Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 20$	V
Collector Current	DC	$I_C$	30
	1ms	$I_{CP}$	60
Forward Current	DC	$I_F$	30
	1ms	$I_{FM}$	60
Collector Power Dissipation ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )	$P_C$	500	W
Junction Temperature	$T_j$	150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	$-40 \sim 125$	$^\circ\text{C}$
Isolation Voltage	$V_{Isol}$	4000 (AC 1 min.)	V
Screw Torque (Terminal / Mounting)	—	3 / 3	N·m

961001EAA2

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and the reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to observe standards of safety, and to avoid situations in which a malfunction or failure of a TOSHIBA product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property. In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

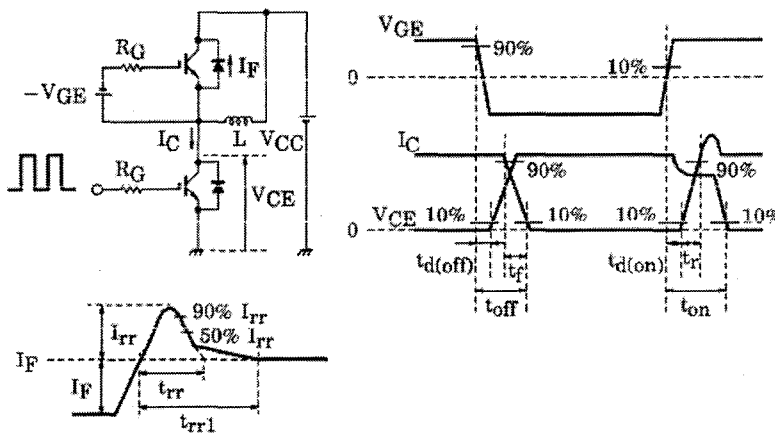
1997-03-03 1/5



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)

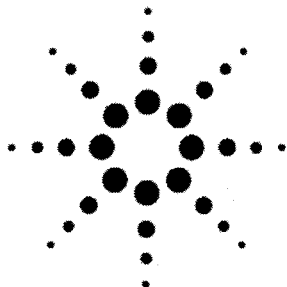
CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Gate Leakage Current		$I_{GES}$	$V_{GE} = \pm 20V, V_{CE} = 0$	—	—	$\pm 50$	nA
Collector Cut-off Current		$I_{CES}$	$V_{CE} = 1700V, V_{GE} = 0$	—	—	0.5	mA
Gate-Emmitter Cut-off Voltage		$V_{GE} (off)$	$I_C = 30mA, V_{CE} = 5V$	4.0	—	8.0	V
Collector-Emmitter Saturation Voltage		$V_{CE} (sat)$	$I_C = 30A, V_{GE} = 15V$	—	3.2	4.5	V
Input Capacitance		$C_{ies}$	$V_{CE} = 10V, V_{GE} = 0, f = 1MHz$	—	4400	—	pF
Switching Time	Turn-on Delay Time	$t_d (on)$	Inductive Load $V_{CC} = 900V$ $I_C = 30A$ $V_{GE} = \pm 15V$ $R_G = 24\Omega$ (Note 1)	—	0.1	—	$\mu s$
	Rise Time	$t_r$		—	0.1	—	
	Turn-on Time	$t_{on}$		—	0.5	—	
	Turn-off Delay Time	$t_d (off)$		—	0.4	—	
	Fall Time	$t_f$		—	0.5	1.5	
	Turn-off Time	$t_{off}$		—	1.0	—	
Forward Voltage		$V_F$	$I_F = 30A, V_{GE} = 0$	—	3.2	4.5	V
Reverse Recovery Time		$t_{rr}$	$I_F = 30A, V_{GE} = -15V$ $di/dt = 500A/\mu s$ (Note 1)	—	0.1	0.3	$\mu s$
Thermal Resistance		$R_{th(j-c)}$	Transistor Stage	—	—	0.25	$^{\circ}C/W$
			Diode Stage	—	—	1.0	

Note 1 Switching Time and Reverse Recovery Time Test Circuit & Timing Chart



**ANNEXE 2**

**HCPL-316J**



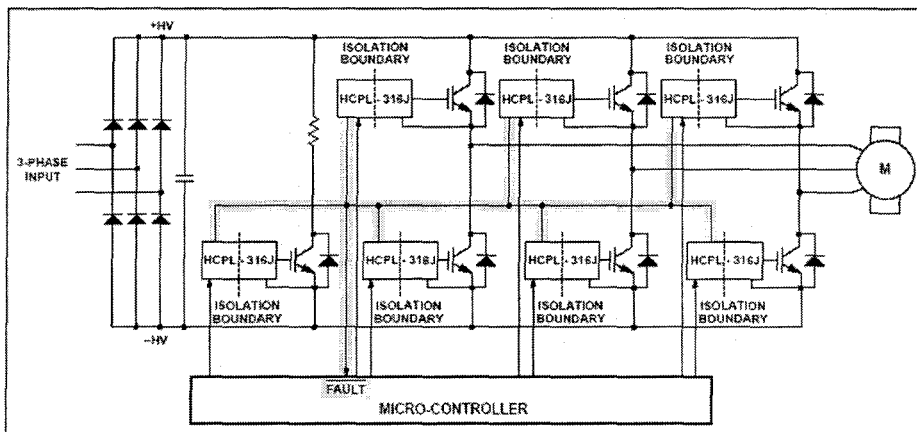
## Agilent HCPL-316J 2.5 Amp Gate Drive Optocoupler with Integrated ( $V_{CE}$ ) Desaturation Detection and Fault Status Feedback

### Data Sheet

#### Features

- 2.5 A maximum peak output current
- Drive IGBTs up to  $I_C = 150$  A,  $V_{CE} = 1200$  V
- Optically isolated,  $\overline{\text{FAULT}}$  status feedback
- SO-16 package
- CMOS/TTL compatible
- 500 ns max. switching speeds
- "Soft" IGBT turn-off
- Integrated fail-safe IGBT protection
  - Desat ( $V_{CE}$ ) detection
  - Under Voltage Lock-Out protection (UVLO) with hysteresis
- User configurable: inverting, noninverting, auto-reset, auto-shutdown
- Wide operating  $V_{CC}$  range: 15 to 30 Volts
- $-40^\circ\text{C}$  to  $+100^\circ\text{C}$  operating temperature range
- 15 kV/ $\mu\text{s}$  min. Common Mode Rejection (CMR) at  $V_{CM} = 1500$  V
- Regulatory approvals: UL, CSA, IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 (891 V<sub>peak</sub> Working Voltage)

Fault Protected IGBT Gate Drive



Agilent's 2.5 Amp Gate Drive Optocoupler with Integrated Desaturation ( $V_{CE}$ ) Detection and Fault Status Feedback makes IGBT  $V_{CE}$  fault protection compact, affordable, and easy-to-implement while satisfying worldwide safety and regulatory requirements.

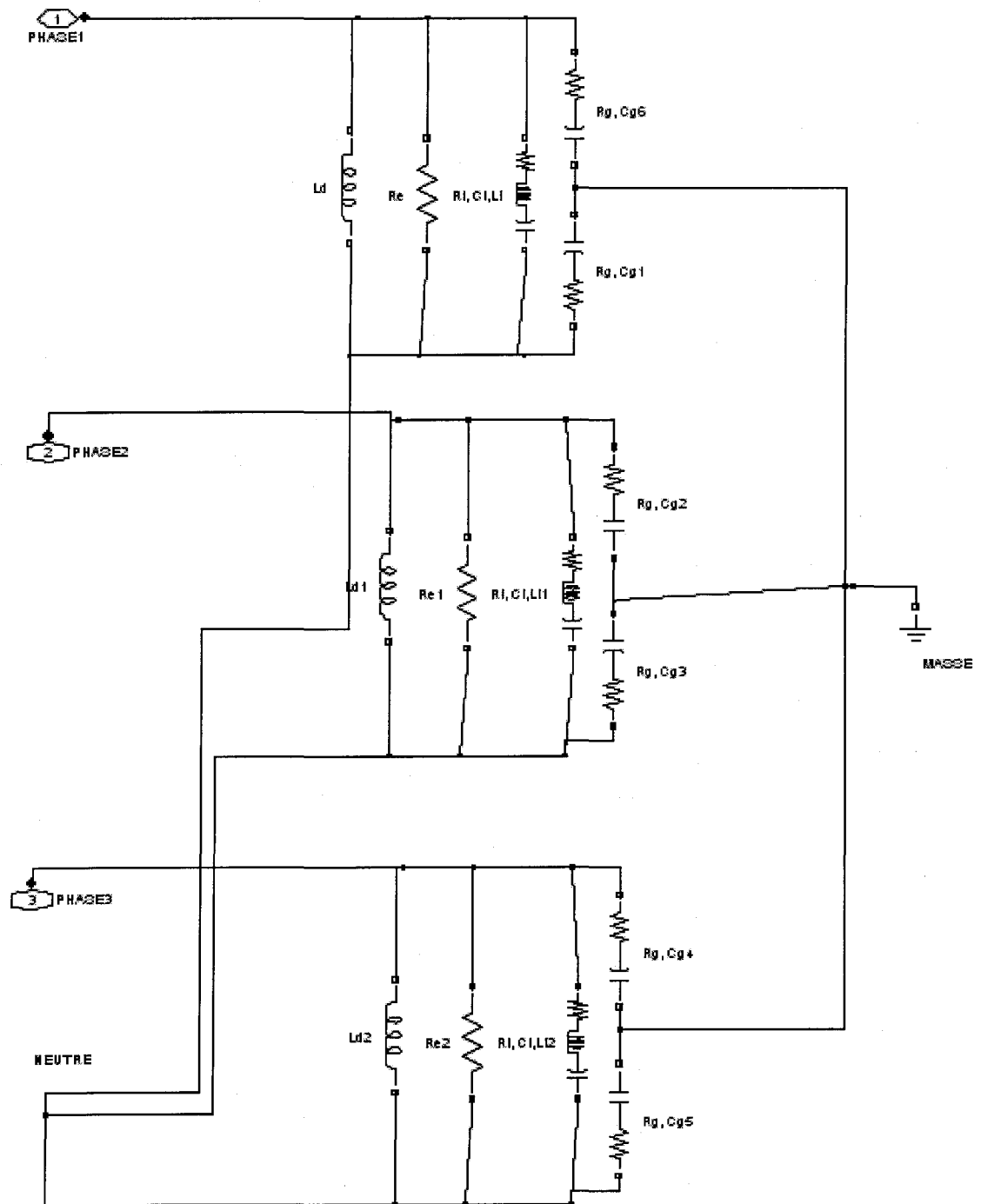
**CAUTION:** It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.



Agilent Technologies

## **ANNEXE 3**

### **Moteur triphasé sous SPS**



## BIBLIOGRAPHIE

Blanchette, H. F. (2003). "Interfaçage d'une commande externe à un simulateur en temps réel d'entraînements électriques." Mémoire de l'école de technologie supérieure.

Kawkaban, B., Simond, J.-J., Wetter, R. (2000). " Investigation of transient overvoltages of low voltage induction motors due to IGBT-Inverter supply." IEEE Press.

Lee, S, Nam, K. (2000). "An Overvoltage Suppression Scheme for AC Motor Drives Using a Half DC-Link Voltage Level at Each PWM Transition." IEEE Press.

Lee, S, Nam, K. (2003). "Overvoltage Suppression Filter Design Methods Based on Voltage Reflection Theory." IEEE Press.

Lipo, T. A., Moreira, A.F., Venkataramanan, G., Bernet, S. (2001). "High frequency modeling for cable and induction motor ove-voltage studies in long cable drives." Chicago: IEEE Press.

Sueker, K. H. (1999). "Traveling Waves on Transmission Lines." PE Consulting Engineer.

Von Jouanne, A (1996). "Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications." IEEE Press.

Von Jouanne, A, W. Gray, P. E. (1995). "The effects of motor leads on PWM inverter fed AC motor drive systems." IEEE Press.