

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
CHRISTIAN THIFFAULT

DÉSENSIBILISATION D'UN SYSTÈME DE BOBINAGE AUX CREUX DE  
TENSION ET CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE GESTION D'UN BANC  
D'ESSAIS EXPÉRIMENTAL

AOÛT 2006

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce au support financier du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG). De plus, il est à noter que des simulations ont été effectuées sur un système obtenu avec le support d'Opal-RT Technologies inc., de la Fondation Canadienne d'Innovation, du Gouvernement du Québec ainsi que du Japanese Research Institute.

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de recherche, le professeur Pierre Sicard, pour m'avoir proposé ce projet. Je le remercie également de m'avoir guidé tout au long de mon cheminement à la maîtrise et dans mes recherches, ainsi que pour ses grandes compétences techniques.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes que j'ai côtoyées au sein du laboratoire, plus particulièrement M. Moussa Zerbo pour son incroyable générosité et ses connaissances, ainsi que M. Guy Boisclair, du département de génie électrique, pour son soutien technique.

Je désire remercier plusieurs personnes de la compagnie Opal-RT Technologies dont M. Jean Bélanger et M. Martin Bélanger pour nous avoir fourni du matériel et des licences de logiciels au moment où nous en avions besoin. Je remercie tout autant les gens du support technique qui ont su me dépanner à quelques reprises.

Je tiens également à remercier et à dédier ce mémoire à mes parents, Monique et Réjean, ainsi qu'à mes sœurs, Nathalie et Marilyne, qui ont toujours cru en moi et m'ont sans cesse encouragé à me dépasser et à persévéérer, durant mes nombreuses années d'études.

Je veux aussi remercier et dédier ce mémoire à mes amis qui sont très importants pour moi et avec qui j'ai passé de nombreuses heures à étudier et à effectuer des travaux, qui ont donné de leur temps pour m'aider, ou tout simplement pour profiter de la vie : Anne, Alexis, Mylène, Simon, Sébastien et tous les autres.

## **SOMMAIRE**

La désensibilisation aux creux de tension des systèmes multimoteurs fortement couplés, tels que les bobineuses à papier, est une avenue pour réduire les pertes et arrêts de production. Le premier objectif de ce mémoire consiste à développer une technique de modification mineure des équipements et des algorithmes de contrôle existant dans un système de bobinage afin de maintenir le procédé opérationnel en présence d'une alimentation électrique perturbée. Un actionneur linéaire dédié au contrôle de la tension mécanique du matériau est modélisé à l'aide de la représentation énergétique macroscopique (REM). Le développement d'une nouvelle stratégie de commande qui incorpore l'actionneur permet de rencontrer le premier objectif. Le second objectif de ce mémoire consiste à définir l'architecture d'un système de gestion d'un banc d'essais expérimental représentatif d'un système de bobinage, pour le développement et l'étude de différentes lois de commande. Les gestionnaires sont définis dans une structure hiérarchique qui respecte la théorie des machines intelligentes. Ainsi, situés au niveau supérieur, ils échangent des données et des commandes avec l'usager et avec le niveau inférieur, soit le niveau de coordination. Ce dernier génère les signaux de consigne du système et gère l'acquisition des données tout comme l'affichage des résultats. Ce système de gestion permettra la réalisation future de tests de sensibilité aux creux de tension sur le banc d'essais.

**TABLE DES MATIÈRES**

REMERCIEMENTS .....	i
SOMMAIRE .....	ii
TABLE DES MATIÈRES .....	iii
INDEX DES FIGURES .....	vi
INDEX DES TABLEAUX .....	ix
LISTE DES SYMBOLES .....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	xiii
1 - INTRODUCTION .....	1
1.1- Problématique .....	1
1.2- Objectifs .....	2
1.3- Méthodologie .....	3
1.4- Organisation du mémoire .....	5
2 - LES SYSTÈMES DE BOBINAGE .....	7
2.1- Creux de tension et méthodes de correction .....	8
2.2- Mise en équation de la bande de couplage .....	11
2.3- Modélisation de la structure classique d'un système de bobinage .....	14
2.3.1- Structure de commande .....	15
2.3.2- Contrôleurs de vitesse .....	16
2.3.3- Contrôleur de tension .....	18
2.4- Conclusion .....	20

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>3 - DÉSENSIBILISATION DU SYSTÈME DE BOBINAGE AUX CREUX DE TENSION .....</b>	<b>22</b>
3.1- Structure proposée .....	23
3.2- Modélisation du rouleau danseur actif .....	25
3.2.1- Modification de l'équation de la bande de couplage .....	25
3.2.2- Représentation énergétique macroscopique du rouleau danseur .....	26
3.2.3- Structure maximale de commande du rouleau danseur .....	31
3.2.3.1- Boucle de tension .....	32
3.2.3.2- Boucle de vitesse .....	34
3.2.3.3- Boucle de courant .....	36
3.2.4- Contrôleur de position .....	38
3.3- Stratégie de gestion du système .....	41
3.3.1- Stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	41
3.3.2- Gestionnaire de trajectoires .....	43
3.4- Conclusion .....	46
<b>4 - RÉSULTATS DE SIMULATIONS .....</b>	<b>47</b>
4.1- Système de bobinage classique .....	48
4.2- Système de bobinage classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	51
4.3- Système de bobinage avec rouleau danseur actif .....	55
4.4- Système de bobinage avec rouleau danseur actif et stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	58
4.5- Conclusion .....	61
<b>5 - ARCHITECTURE DU BANC D'ESSAIS EXPÉRIMENTAL .....</b>	<b>62</b>

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

5.1- Architectures de gestion intelligente .....	63
5.2- Théorie des machines intelligentes .....	65
5.3- Architecture du banc d'essais .....	67
5.3.1- Interface utilisateur .....	69
5.3.2- Communication entre l'interface utilisateur et le système RT-LAB .....	72
5.4- Validation du niveau organisationnel de l'architecture .....	73
5.5- Conclusion .....	76
 6 - CONCLUSION GÉNÉRALE .....	 77
 BIBLIOGRAPHIE .....	 81
 ANNEXES .....	 88
ANNEXE A : Définition des types de creux de tension .....	89
ANNEXE B : Méthodes de correction des creux de tension .....	94
ANNEXE C : Commande à flux orienté .....	96
ANNEXE D : Principes de la REM et de la SMC .....	100
ANNEXE E : Générateur de trajectoires .....	103
ANNEXE F : Paramètres de simulation .....	108
ANNEXE G : Utilisation du système RT-LAB .....	112
ANNEXE H : Nouvelle structure de contrôle du système de bobinage .....	121

## INDEX DES FIGURES

Figure 2.1 : Creux de tension sur une seule phase .....	8
Figure 2.2 : Types de creux de tension .....	9
Figure 2.3 : Effort de tension dans la toile sur le rouleau .....	12
Figure 2.4 : Structure typique d'un système de bobinage .....	14
Figure 2.5 : Structure de commande d'un système de bobinage classique .....	15
Figure 2.6 : Structure des contrôleurs de vitesse des moteurs à induction .....	16
Figure 2.7 : Structure d'un contrôleur IP .....	17
Figure 2.8 : Structure du contrôleur de tension .....	19
Figure 3.1 : Structure proposée d'un système de bobinage .....	23
Figure 3.2 : Structure de commande proposée d'un système de bobinage .....	24
Figure 3.3 : REM du rouleau danseur actif .....	26
Figure 3.4 : SMC du rouleau danseur actif .....	31
Figure 3.5 : Structure du modèle inverse de la toile .....	33
Figure 3.6 : Structure du modèle inverse de l'arbre .....	35
Figure 3.7 : Structure du modèle inverse de l'induit du mcc .....	37
Figure 3.8 : Structure du contrôleur de position .....	39
Figure 3.9 : Structure d'un contrôleur PI .....	39
Figure 3.10 : Algorithme de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	42
Figure 3.11 : Algorithme du générateur de trajectoires .....	45
Figure 4.1 : Modèle Simulink du système de bobinage classique .....	48
Figure 4.2 : Réponse en effort de tension pour la structure classique .....	49
Figure 4.3 : Tension du bus cc pour la structure classique (creux de 5 cycles) .....	50
Figure 4.4 : Vitesse des moteurs pour la structure classique (creux de 5 cycles) .....	50

Figure 4.5 : Modèle Simulink du système de bobinage classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	51
Figure 4.6 : Réponse en effort de tension pour la structure classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	52
Figure 4.7 : Vitesse de l'étage de pinçage pour la structure classique (creux de 5 cycles) .....	53
Figure 4.8 : Courant de ligne pour la structure classique (creux de 5 cycles) .....	53
Figure 4.9 : Modèle Simulink du système de bobinage proposé .....	55
Figure 4.10 : Réponse en effort de tension pour la structure proposée .....	56
Figure 4.11 : Vitesse des moteurs pour la structure proposée (creux de 5 cycles) .....	57
Figure 4.12 : Modèle Simulink du système de bobinage proposé incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	58
Figure 4.13 : Réponse en effort de tension pour la structure proposée incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension .....	59
Figure 4.14 : Vitesse de l'étage de pinçage pour la structure proposée (creux de 5 cycles) .....	60
Figure 4.15 : Courant de ligne pour la structure proposée (creux de 5 cycles) .....	60
Figure 5.1 : Théorie des machines intelligentes .....	66
Figure 5.2 : Architecture hiérarchique du banc d'essais .....	68
Figure 5.3 : Interface utilisateur principale .....	69
Figure 5.4 : Interface pour les sections de toile .....	70
Figure 5.5 : Interface pour les entraînements .....	71
Figure 5.6 : Interface pour les contrôleurs .....	71
Figure 5.7 : Interface du simulateur RT-LAB .....	72
Figure 5.8 : Modèle discret .....	73
Figure 5.9 : Modèle discret – SM_Modele .....	74
Figure 5.10 : Modèle discret – SC_LabVIEW .....	74

Figure 5.11 : Interface des mesures .....	75
Figure A.1 : Types de creux de tension .....	89
Figure E.1 : Premier gabarit de vitesse .....	103
Figure E.2 : Second gabarit de vitesse .....	103
Figure G.1 : Intégration du système RT-LAB au travers certaines applications .....	113
Figure G.2 : Système RT-LAB du laboratoire .....	114
Figure G.3 : Modélisation sous RT-LAB – Création des sous-systèmes .....	116
Figure G.4 : Modélisation sous RT-LAB – Ajout des blocs de communication .....	117
Figure G.5 : Exécution sous RT-LAB .....	118
Figure G.6 : Bloc de contrôle ARTEMIS Guide .....	119
Figure G.6 : Boîte de dialogue du bloc de contrôle ARTEMIS Guide .....	119
Figure H.1 : Nouvelle structure de commande .....	123
Figure H.2 : Structure du contrôleur de vitesse de l'enrouleur .....	124
Figure H.3 : Structure du contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage .....	124
Figure H.4 : Nouvelle structure du contrôleur de vitesse de l'enrouleur .....	124
Figure H.5 : Nouvelle structure du contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage .....	125
Figure H.6 : Modèle de la nouvelle structure de commande .....	127
Figure H.7 : Contrôleur à flux orienté de l'enrouleur .....	128
Figure H.8 : Structure parallèle de contrôle de l'enrouleur .....	128
Figure H.9 : Contrôleur de tension de la structure parallèle de l'enrouleur .....	129
Figure H.10 : Contrôleur de vitesse de la structure parallèle de l'enrouleur .....	129
Figure H.11 : Vitesse de l'enrouleur .....	130
Figure H.12 : Vitesse de l'étage de pinçage .....	131
Figure H.13 : Effort de tension dans le matériau .....	132
Figure H.14 : Logique de gestion durant les creux de tension .....	133

## INDEX DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Sommaire des solutions de correction des EVV face aux creux de tension .....	10
Tableau 3.1 : Premier gabarit du générateur de trajectoires .....	44
Tableau 3.2 : Second gabarit du générateur de trajectoires .....	44
Tableau 5.1 : Structures de gestion intelligentes .....	63

## LISTE DES SYMBOLES

Symbol	Description	Unité
$C_{frM}$	Couple engendré par les forces de frottement	(N·m)
$C_{im\ i-ch}$	Couple de charge du moteur à induction i	(N·m)
$C_{im\ i-ref}$	Couple de référence du moteur à induction i	(N·m)
$C_{mcc2}$	Couple électromagnétique du moteur cc	(N·m)
$C_{mcc2-ch}$	Couple de charge du moteur cc	(N·m)
$C_{mcc2-ref}$	Couple électromagnétique de référence du moteur cc	(N·m)
$E$	Module de Young	(N/m <sup>2</sup> )
$e_{mcc2}$	Force électromotrice du moteur cc	(V)
$F_{lm2}$	Forces agissant sur l'actionneur linéaire	(N)
$F_{lm2-grav}$	Force de gravité agissant sur l'actionneur linéaire	(N)
$i_h$	Courant à la sortie du hacheur	(A)
$i_{mcc2}$	Courant à la sortie de l'induit du moteur cc	(A)
$i_{mcc2-ref}$	Courant de référence pour l'induit du moteur cc	(A)
$i_{min}$	Seuil minimum de courant à la sortie du redresseur	(A)
$i_{red}$	Courant à la sortie du redresseur de courant	(A)
$J_{totale}$	Inertie vue au moteur cc	(kg/m <sup>2</sup> )
$J_{arbre\ i}$	Inertie du moteur i	(kg/m <sup>2</sup> )
$k$	Constante du moteur cc	([N·m]/[Wb A])
$K_{arbre}$	Constante de l'arbre du moteur	(1/[N m s])

LISTE DES SYMBOLES

---

$K_i$	Gain intégrateur	sans unité
$K_p$	Gain proportionnel	sans unité
$L$	Longueur	(m)
$L_{eq}$	Inductance équivalente du moteur cc	(H)
P.D.	Pourcentage de dépassement	(%)
$P_{lm2}$	Position du rouleau danseur	(m)
$R_{eq}$	Résistance équivalente du moteur cc	( $\Omega$ )
$S$	Section de la toile	( $m^2$ )
$T_e$	Effort de tension de l'étage précédent	(N)
$T_s$	Temps de stabilisation	(s)
$T_{toile1}$	Effort de tension dans la section de toile	(N)
$T_{toile1-ref}$	Effort de tension de référence de la section de toile	(N)
$U_h$	Tension à la sortie du hacheur	(V)
$U_{h-ref}$	Tension de référence pour le hacheur de tension	(V)
$V_{Bus}$	Tension sur le bus cc	(V)
$V_{Bus-t}$	Seuil de tension d'opération normal sur le bus cc	(V)
$V_{cc}$	Tension à la sortie de la source courant continue	(V)
$V_{lm2}$	Vitesse linéaire de l'actionneur linéaire	(m/s)
$V_{lm2-ref}$	Vitesse linéaire de référence de l'actionneur linéaire	(m/s)
$V_{roll\ i}$	Vitesse linéaire relative au rouleau i	(m/s)
$V_{rolls}$	Vecteur de vitesses des étages agissant sur la toile	(m/s)
$\alpha_h$	Rapport cyclique hacheur	(%)

## LISTE DES SYMBOLES

---

$\beta_{\text{arbre } i}$	Coefficient de frottement du moteur $i$	(N·m·s)
$\Delta F_{\text{roll } i}$	Différence de force de charge appliquée au moteur $i$	(N)
$\Delta L$	Variation de longueur	(m)
$\Delta T_i$	Variation de l'effort de tension relative au rouleau $i$	(N)
$\varepsilon_i$	Allongement relatif au rouleau $i$	sans unité
$\phi$	Flux d'induction magnétique	(Wb)
$\tau_{\text{arbre}}$	Constante de temps relative au moteur	(s)
$\Omega_{\text{im } i}$	Vitesse angulaire relative au moteur $i$	(rad/s)
$\Omega_{\text{im } i\text{-ref}}$	Vitesse angulaire de référence du moteur $i$	(rad/s)
$\Omega_{\text{mcc2}}$	Vitesse angulaire du moteur cc	(rad/s)
$\Omega_{\text{mcc2-ref}}$	Vitesse angulaire de référence du moteur cc	(rad/s)
$\omega_n$	Pulsation naturelle	(rad/s)
$\zeta$	Facteur d'amortissement	sans unité

---

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Description
cc	Courant continu
CFO	Commande à flux orienté
EVV	Entraînement à vitesse variable
im <sub>i</sub>	Moteur à induction i
mcc <sub>2</sub>	Moteur courant continu du rouleau danseur actif
p.u.	Par unité
REM	Représentation énergétique macroscopique
RMS	<i>Root mean square</i> (moyenne quadratique; tension efficace)
SMC	Structure maximale de commande

# ***Chapitre 1***

## ***Introduction***

### **1.1 Problématique**

Les procédés continus de nombreuses industries, tels que ceux retrouvés dans les pâtes et papiers, le textile et le plastique requièrent le travail en synchronisme de plusieurs entraînements pour l'obtention d'un produit fini de qualité. De plus, dans le but d'améliorer le rendement énergétique, l'efficacité et le contrôle de ces procédés, l'utilisation des entraînements à vitesse variable (EVV) est de plus en plus préconisée [Belchior-03, Jouanne-99]. Cependant, les EVV sont grandement sensibles aux perturbations sur l'alimentation électrique. En effet, les baisses soudaines de tension, ou creux de tension, constituent le problème de perturbation le plus fréquent [Arrillaga-00, Duran-99, Jouanne-99]. Elles sont définies par la norme IEEE 1159 [IEEE-95] comme étant une diminution de 0.1 à 0.9 p.u. de la tension RMS pour une durée variant de 0.5 cycle à 1 minute.

Ces perturbations électriques engendrent des répercussions économiques considérables. Les industries rapportent des pertes allant de 10K à 1M de dollars (devise américaine) par perturbation [Jouanne-99]. Les creux de tension, qui représentent la majorité de ces perturbations, sont principalement causés par le démarrage de charges motrices importantes et par des fautes sur le réseau électrique telles que la foudre. Étant donné qu'il n'est jamais possible d'éliminer ces fautes sur le système électrique, nous devons donc concevoir des équipements capables de résister aux creux de tension les plus communs [McGranaghan-93].

C'est pourquoi, plusieurs travaux ont déjà été mis en œuvre au sein du laboratoire de commande de l'UQTR pour contrer les conséquences de ces perturbations. En effet, des mémoires portant sur la « Modélisation et commande d'un système multimoteur en présence de creux de tension » [ElOuariachi-03] et sur un « Système auxiliaire de compensation de creux de tension » [Nanga-05a] ont été rédigés ainsi que des stages d'étudiants portant sur la « Modélisation et commande d'un étage d'un système de bobinage » [Leclercq-03] et sur la « Modélisation et commande d'un étage d'un système de transport de bande comportant un actionneur linéaire » [Djani-04] ont été réalisés.

## 1.2 Objectifs

La désensibilisation des systèmes d'entraînement multimoteur fortement couplés aux creux de tension, tels que les bobineuses, constitue le principal objectif de ce mémoire. Ainsi, il consiste à développer une technique de modification mineure des équipements et des algorithmes de commande existant dans un système de bobinage afin de maintenir le procédé opérationnel en présence d'une alimentation électrique perturbée.

Le second objectif consiste à définir un système de gestion d'un banc d'essais expérimental représentatif d'un système de bobinage à échelle réduite, dédié au développement et à l'étude de différentes lois de commande. En effet, il consiste à décrire l'architecture d'un gestionnaire de simulation et d'un gestionnaire du banc d'essais. Ces gestionnaires doivent être modulaires et flexibles pour faciliter les ajouts et les modifications futurs. Par le fait même, le système de gestion doit être en mesure de communiquer avec l'utilisateur à l'aide d'une interface dédiée.

### **1.3 Méthodologie**

Pour la réalisation des objectifs du mémoire, nous réaliserons tout d'abord une revue bibliographique sur les systèmes de bobinage et les stratégies de compensation de creux de tension. Ces aspects permettront de mieux comprendre les problèmes existants et d'exposer les solutions qui leurs sont apportées. Une étude littéraire portera également sur les structures de gestion intelligentes des systèmes. Celle-ci permettra de relater les structures couramment utilisées et de bien cerner celles qui conviennent aux spécifications et aux contraintes de notre système de gestion.

Par la suite, ces recherches nous permettront de réaliser la modélisation d'un exemple typique d'un système de bobinage, composé d'un étage de pinçage, d'une section de matériau flexible (par exemple le papier) et d'un enrouleur. Les équations mathématiques de la bande de couplage élastique seront traitées pour bien représenter le phénomène. La modélisation de l'exemple sera effectuée à l'aide de l'outil Matlab/Simulink. Ceci nous permettra de réaliser différentes simulations du système et d'observer son comportement en présence d'une alimentation électrique perturbée.

Ensuite, afin de désensibiliser ce système de bobinage aux creux de tension, nous proposerons l'intégration d'un rouleau danseur actif dans le procédé. Cet axe linéaire sera également modélisé sous Matlab/Simulink et il sera basé sur la représentation énergétique macroscopique (REM) des systèmes multimachines [Bouscayrol-00a, Bouscayrol-02]. De cette approche, nous réaliserons la conception des boucles de contrôle basées sur la Structure Maximale de Commande (SMC) selon le principe de l'inversion. De plus, nous présenterons une stratégie de désensibilisation aux creux de tension qui permettra d'effectuer une gestion des contrôleurs et des consignes pendant les creux de tension. Un gestionnaire de trajectoires sera également réalisé par programmation en utilisant l'outil de développement « S-Function Builder » de Simulink afin de générer des consignes douces.

Enfin, dans le but d'accomplir de futurs essais pratiques, le laboratoire se dotera d'un banc d'essais représentatif d'un système multimoteur. C'est pourquoi, une section de ce mémoire se concentrera sur l'architecture informatique du banc d'essais expérimental. Les gestionnaires de ce dernier seront développés selon une architecture respectant la théorie des machines intelligentes [Saridis-98]. Au plus haut niveau de cette structure, nous retrouverons une interface utilisateur développée sous LabVIEW. Cette interface permettra à l'utilisateur de gérer le système, de transmettre les consignes et de recevoir les mesures à partir d'un système d'acquisition ou du modèle simulé.

## 1.4 Organisation du mémoire

Il est proposé de développer une méthode de désensibilisation aux creux de tension des systèmes de bobinages classiques et de concevoir l'architecture informatique d'un banc d'essais expérimental représentant un tel système.

Ainsi, ce mémoire s'articule comme suit.

Le chapitre 2 présente une étude sur les perturbations électriques et les systèmes de bobinage. Plus spécifiquement, il traite des creux de tensions, de leurs méthodes de correction, de la mise en équation de la bande élastique de couplage (ici le papier) et de la modélisation de la structure classique d'une bobineuse.

Le chapitre 3 décrit une méthode de modification mineure de la structure précédente, permettant ainsi une désensibilisation du procédé face aux creux de tension. Tout d'abord, il est question d'une proposition de modification de la structure mécanique du système de bobinage classique. Ensuite, nous présentons la modification de l'équation de la bande de couplage permettant d'accueillir le nouvel élément, un rouleau danseur actif. La modélisation et le développement de la boucle de commande de ce dernier y sont exposés. Cette section du mémoire présente également une stratégie de désensibilisation du système de bobinage aux creux de tension, permettant ainsi d'enrayer certains phénomènes indésirables durant les perturbations électriques. Le développement d'un générateur de trajectoires y est aussi présenté. Ce générateur permet d'imposer au système des consignes suivant certaines contraintes.

Le chapitre 4 expose les résultats de simulation des différentes structures. En effet, il présente des simulations réalisées sur la structure décrite au chapitre 2 ainsi que les problèmes engendrés par les perturbations électriques sur cette dernière. Ensuite, des simulations démontrant la rencontre de l'objectif de désensibilisation, avec la structure proposée ainsi que la stratégie de désensibilisation aux creux de tension développée au chapitre 3, y sont présentées.

Le chapitre 5 porte sur la conception de l'architecture d'un banc d'essais. Plus particulièrement, sur la conception d'un système de gestion ayant une architecture respectant la théorie des machines intelligentes. Les différents niveaux du modèle sont présentés : l'interface utilisateur, les divers gestionnaires et le système de commande. Cependant, seul le premier niveau de l'architecture est exploré plus en détail.

Ce mémoire se termine au chapitre 6 par une conclusion générale portant sur les travaux de recherches réalisés, sur les principaux résultats obtenus et sur les contributions du projet.

## ***Chapitre 2***

# ***Les systèmes de bobinage***

Un creux de tension est un type de perturbation électrique imprévu causé par de forts appels de courant tels que le démarrage d'une charge importante, un court-circuit, la foudre, etc. Il n'est donc jamais possible d'éliminer ces fautes sur le système électrique. C'est pourquoi nous devons concevoir des équipements capables de parer les creux de tension afin de maintenir le procédé industriel opérationnel durant et après l'apparition de ceux-ci.

Les systèmes de bobinage sont très sensibles aux perturbations de l'alimentation électrique puisque le procédé demande une très grande synchronisation entre les différents entraînements qui le composent. La qualité du produit est assurée par le contrôle de la force de tension mécanique du matériau à enrouler à l'aide de la synchronisation entre les moteurs. C'est pourquoi la décélération ou l'emballement d'une des machines provoque des stress qui peuvent causer la rupture du matériau et donc, du procédé. Tel que mentionné précédemment, ces arrêts de production engendrent des pertes économiques considérables pour les entreprises.

## 2.1 Creux de tension et méthodes de correction

Les creux de tension sont des baisses de 0.1 à 0.9 p.u. de la tension RMS pour une durée variant de 0.5 cycle à 1 minute [IEEE-95]. La figure 2.1 présente l'exemple d'un creux de tension sur une seule phase du réseau électrique.

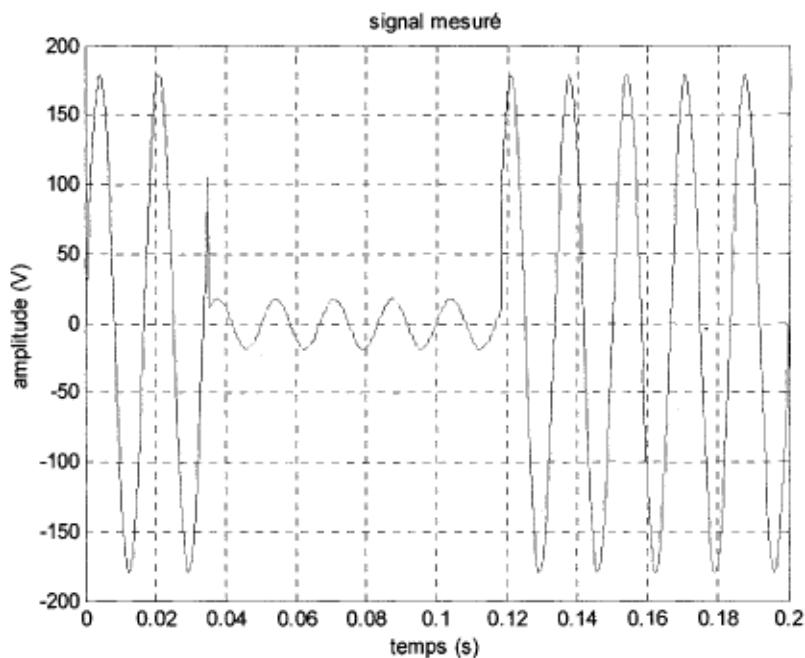


Figure 2.1 : Creux de tension sur une seule phase.

Il existe plusieurs types de creux de tension classés selon deux catégories : équilibrés et déséquilibrés. Un creux de tension est équilibré lorsque la diminution de la tension est identique sur chacune des phases. Par le fait même, un creux de tension est déséquilibré lorsque la diminution de la tension sur les trois phases n'est pas égale et/ou lorsque ces dernières ne sont plus déphasées de 120 degrés les unes par rapport aux autres. Selon Bollen [Bollen-99], il existe sept types de creux de tension et ils sont présentés à la figure 2.2. La définition de chacun de ces types de creux de tension est présentée en annexe A.

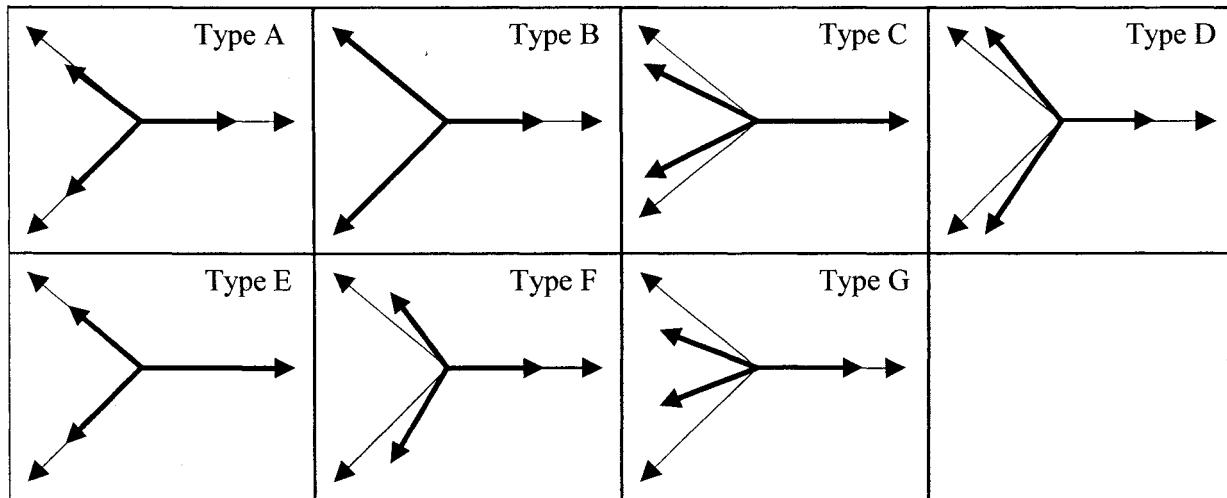


Figure 2.2 : Types de creux de tension.

Plusieurs méthodes de correction sont présentées dans la littérature [Belchior-03, Arrillaga-00, Jouanne-99]. En général, elles peuvent se diviser en trois catégories : la modification des topologies existantes de convertisseurs, l'utilisation d'unité de stockage d'énergie et la modification des algorithmes de commande ou des conditions d'opération. Ces méthodes sont expliquées d'une manière plus exhaustive en annexe B. De son côté, le tableau 2.1 expose un résumé des différentes alternatives pour la désensibilisation des EVV aux creux de tension. Ainsi, il est possible de constater que pour conserver les mêmes conditions d'opération sur notre système (vitesse, charge, inertie), les solutions proposées sont très coûteuses et dans la majorité des cas, elles ne peuvent tout simplement pas garantir le maintien du procédé pour des perturbations d'une durée de plus de quelques cycles.

TABLEAU 2.1

Sommaire des solutions de correction des EVV face aux creux de tension [Jouanne-99]

Méthode de correction d'un EVV	Coût (\$/kW)	Durée maximale de la correction	Gamme de puissance
Ajout de capacité*	600 \$/kW	0.1s	100 kW
Inertie de la charge	≈ 0	2s	1-1000 kW
Réduction de la vitesse/charge	≈ 0	0.01s	5-10 kW
Moteur à plus faible tension*	≈ 0	0.01s	5-10 kW
Hacheur élévateur de tension**	100-200 \$/kW	5s	5-200 kW
Redresseur actif**	100-200 \$/kW	5s	5-200 kW
Batterie de secours*	100-200 \$/kW	5s - 1h	5-1000 kW
Super capacité*	300-400 \$/kW	5s	5-100 kW
Ensemble moteur-générateur*	200-300 \$/kW	15s	100 kW
Volant d'inertie*	200-300 \$/kW	15s - 1h	1-10000 kW
SMES*	600-800 \$/kW	10s	300-1000000 kW
Pile à combustible*	1500 \$/kW	1h	10-2000 kW

\* Fournit la pleine puissance pendant le creux de tension

\*\* Peut fournir la pleine puissance pendant un creux de tension sur une seule phase &lt; 50%

## 2.2 Mise en équation de la bande de couplage

Tout d'abord, avant de réaliser la modélisation d'un système de bobinage, nous développerons le modèle mathématique de la bande de couplage présente dans le procédé. Ce modèle de couplage mécanique entre deux rouleaux est développé pour des matériaux flexibles tels que le papier et le textile, ainsi que pour prendre en compte le modèle dynamique de chacun des rouleaux.

Les différents modèles permettant d'obtenir la force de tension mécanique présente dans la bande de couplage du système, sont basés sur trois lois [Koç-02] :

- loi de Hooke, pour modéliser l'élasticité du matériau;
- loi de Coulomb, pour modéliser les variations de tension dues à la friction ainsi qu'à la force de contact entre la bande et le rouleau;
- loi de conservation des masses, pour établir le couplage entre la vitesse de la bande et l'effort de tension.

Ainsi, selon Koç [Koç-02] (Fig. 2.3):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{L(t)}{1 + \varepsilon_3} \right) = \frac{v_{roll1}}{1 + \varepsilon_1} - \frac{v_{roll3}}{1 + \varepsilon_3} . \quad (2.1)$$

En dérivant le terme de gauche nous obtenons :

$$\frac{(1 + \varepsilon_3)^2}{1 + \varepsilon_3} \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - L \frac{d(\varepsilon_3)}{dt} = v_{roll1} \frac{(1 + \varepsilon_3)^2}{1 + \varepsilon_1} - v_{roll3} (1 + \varepsilon_3) . \quad (2.2)$$

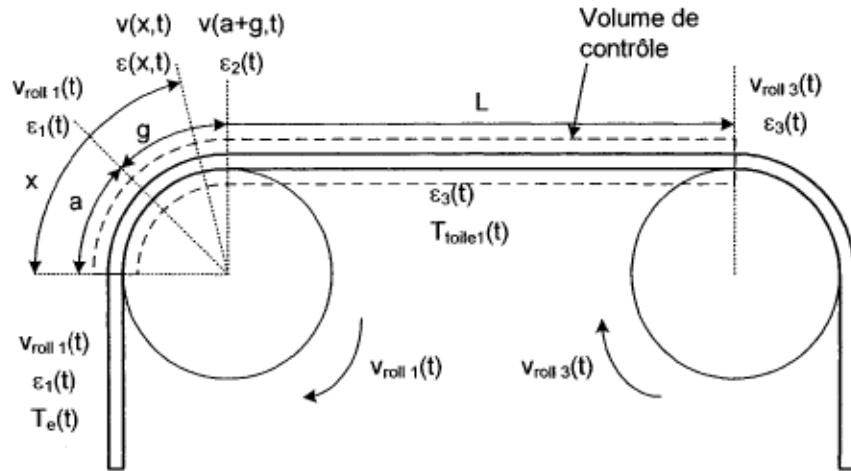


Figure 2.3 : Effort de tension dans la toile sur le rouleau.

En considérant que

$$\varepsilon_1 \ll 1 \quad \varepsilon_3 \ll 1 \quad (2.3)$$

nous pouvons déduire que

$$\frac{(1+\varepsilon_3)^2}{1+\varepsilon_1} \approx (1-\varepsilon_1)(1+2\varepsilon_3) \quad (2.4)$$

De plus,

$$\varepsilon_1 = \frac{T_e}{ES} \quad \varepsilon_3 = \frac{T_{toile1}}{ES} \quad (2.5)$$

Donc, en considérant (2.4) et (2.5), nous pouvons réécrire (2.2) comme suit :

$$(1 + \varepsilon_3) \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - \frac{L}{ES} \frac{d(T_{toile1})}{dt} = v_{roll1} (1 - \varepsilon_1) (1 + 2\varepsilon_3) - v_{roll3} (1 + \varepsilon_3) \quad (2.6)$$

$$(1 + \varepsilon_3) \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - \frac{L}{ES} \frac{d(T_{toile1})}{dt} = v_{roll1} (1 - \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 - 2\varepsilon_1 \varepsilon_3^0) - v_{roll3} (1 + \varepsilon_3) \quad (2.7)$$

$$(1 + \varepsilon_3) \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - \frac{L}{ES} \frac{d(T_{toile1})}{dt} = v_{roll1} - v_{roll3} - v_{roll1} \varepsilon_1 + (2v_{roll1} - v_{roll3}) \varepsilon_3 \quad (2.8)$$

Ainsi, nous manipulons (2.8) comme suit :

$$\left( 1 + \frac{T_{toile1}}{ES} \right) \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - \frac{L}{ES} \frac{d(T_{toile1})}{dt} = v_{roll1} - v_{roll3} - v_{roll1} \frac{T_e}{ES} + (2v_{roll1} - v_{roll3}) \frac{T_{toile1}}{ES} \quad (2.9)$$

$$\frac{L}{ES} \frac{d(T_{toile1})}{dt} = \left( 1 + \frac{T_{toile1}}{ES} \right) \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - v_{roll1} + v_{roll3} + v_{roll1} \frac{T_e}{ES} - (2v_{roll1} - v_{roll3}) \frac{T_{toile1}}{ES} \quad (2.10)$$

Ce qui finalement nous permet d'obtenir l'équation mathématique de l'effort de tension présente dans la bande de couplage élastique :

$$\frac{d(T_{toile1})}{dt} = \frac{ES}{L} \left[ \left( 1 + \frac{T_{toile1}}{ES} \right) \left( \frac{d(L)}{dt} \right) - v_{roll1} \left( 1 - \frac{T_e}{ES} + 2 \frac{T_{toile1}}{ES} \right) + v_{roll3} \left( 1 + \frac{T_{toile1}}{ES} \right) \right] \quad (2.11)$$

À l'aide de cette équation, il est facile de constater que l'effort de tension dans la section de toile étudiée ( $T_{toile1}$ ) est produit par le couplage de plusieurs variables dans le système. En effet, il dépend de la longueur (L), de la section (S) et de l'élasticité (E) de la toile, de la vitesse des étages précédent ( $v_{roll1}$ ) et suivant ( $v_{roll3}$ ) la section de toile ainsi que de l'effort de tension présent dans la section de toile précédente ( $T_e$ ).

## 2.3 Modélisation de la structure classique d'un système de bobinage

Typiquement, la méthode de contrôle des systèmes de bobinage s'effectue par la structure illustrée à la figure 2.4. Elle consiste à commander l'enrouleur ( $im_3$ ) en consigne de vitesse ( $\Omega_{im3}$ ) et le moteur de l'étage de pinçage ( $im_1$ ) en consigne de tension mécanique ( $T_{toile1}$ ). La vitesse de l'étage de pinçage ( $\Omega_{im1}$ ) sera alors approximativement obtenue par le principe suivant :

- Pour une augmentation de la force de tension dans le matériau,

$$v_{roll1} < v_{roll3}$$

- Pour une diminution de la force de tension dans le matériau,

$$v_{roll1} > v_{roll3}$$

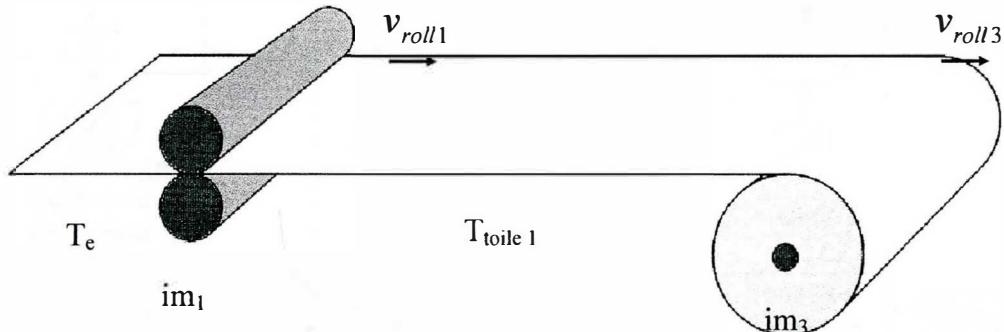


Figure 2.4 : Structure typique d'un système de bobinage.

### 2.3.1 Structure de commande

La figure 2.5 présente plus en détail la structure de commande utilisée. Donc, nous remarquons que chaque moteur possède son contrôleur de vitesse et son contrôleur à flux orienté (CFO) qui permet de générer les impulsions commandant les onduleurs respectifs. Outre ceci, un contrôleur de tension est présent dans la boucle de commande de l'étage de pinçage afin de déterminer la vitesse de référence de ce moteur pour obtenir l'effort de tension désiré dans la bande de couplage élastique. La définition de la commande à flux orienté est présentée en annexe C.

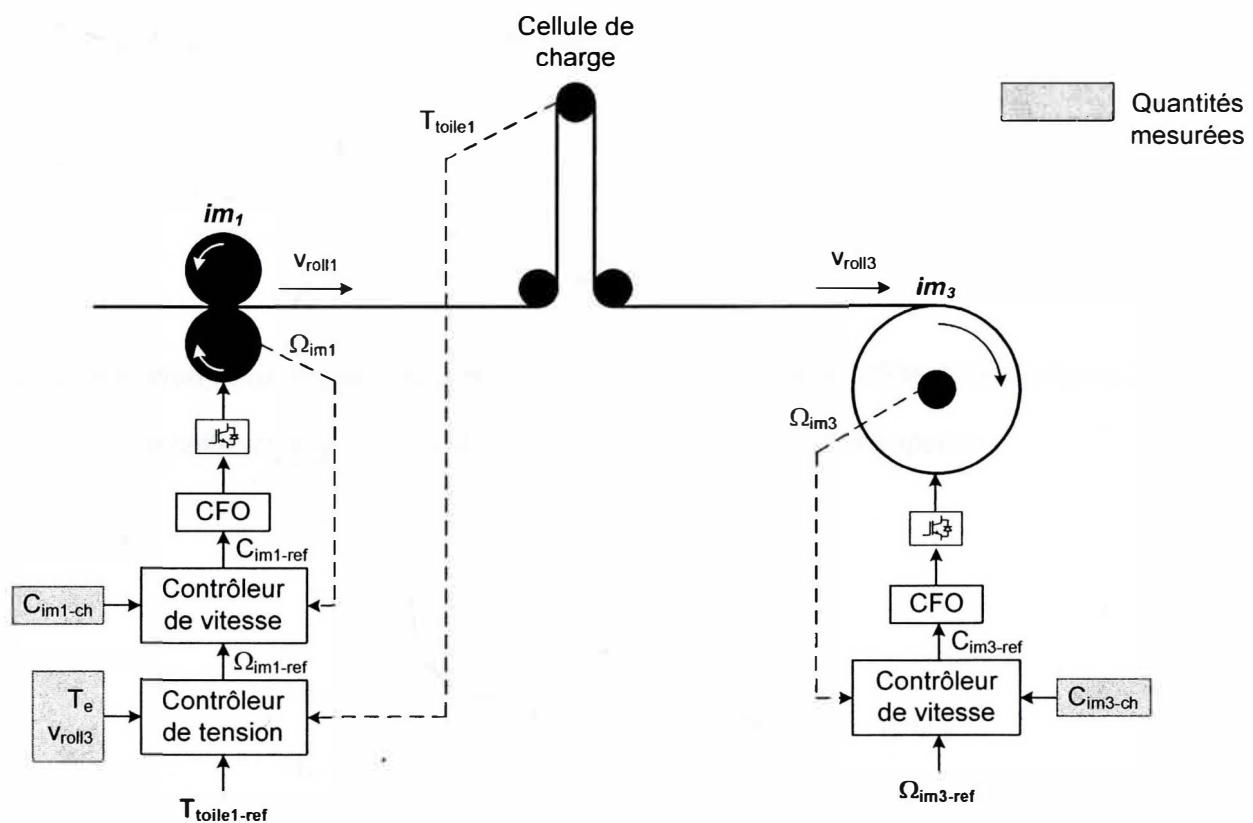


Figure 2.5 : Structure de commande d'un système de bobinage classique.

### 2.3.2 Contrôleurs de vitesse

Tout d'abord, les contrôleurs de vitesse des moteurs asynchrones sont obtenus en effectuant différentes manipulations mathématiques. Ainsi, à partir de l'équation de vitesse du moteur à induction qui suit,

$$\Omega_{im} = \frac{K_{arbre}}{\tau s + 1} (C_{im} - C_{im-ch}) , \quad (2.12)$$

nous isolons la variable du couple électromagnétique :

$$C_{im} = \frac{\Omega_{im}(\tau s + 1)}{K_{arbre}} + C_{im-ch} . \quad (2.13)$$

Cette équation nous permet d'obtenir la structure de commande présentée à la figure 2.6.

Notons que cette structure contient un contrôleur et un terme d'anticipation.

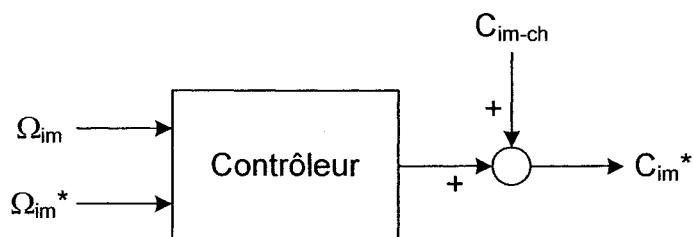


Figure 2.6 : Structure des contrôleurs de vitesse des moteurs à induction.

Nous proposons l'utilisation d'un contrôleur IP possédant l'architecture de la figure 2.7.

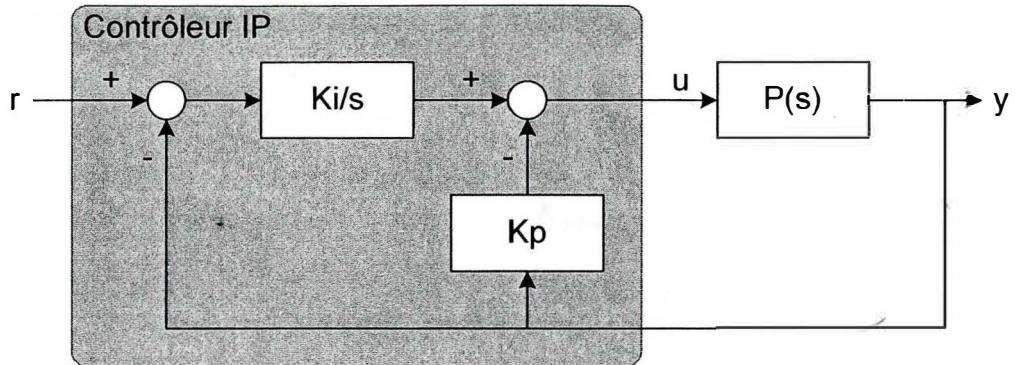


Figure 2.7 : Structure d'un contrôleur IP.

La caractéristique de transfert du contrôleur IP se définit alors comme suit :

$$u = \frac{K_i}{s} (r - y) - K_p y \quad (2.14)$$

Il est à noter que le contrôleur IP et sa caractéristique de transfert (figure 2.7 et équation 2.14) seront également utilisés dans différents contrôleurs tout au long de ce mémoire. De ce fait, ils ne seront pas répétés, une simple référence y sera alors précisée.

Pour le cas présent, selon (2.13), nous définissons la fonction du système :

$$P(s) = \frac{K_{arbre}}{\tau s + 1} \quad (2.15)$$

Ainsi la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{\frac{K_i K_{arbre}}{\tau}}{s^2 + \left( \frac{1 + K_p K_{arbre}}{\tau} \right) s + \frac{K_i K_{arbre}}{\tau}} \quad (2.16)$$

Le gain intégral et le gain proportionnel du contrôleur IP sont obtenus comme suit :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i K_{arbre}}{\tau} \Rightarrow K_i = \frac{\omega_n^2 \tau}{K_{arbre}} \quad (2.18)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{1 + K_p K_{arbre}}{\tau} \Rightarrow K_p = \frac{2\zeta\omega_n \tau - 1}{K_{arbre}} \quad (2.19)$$

Les valeurs de  $\omega_n$  et de  $\zeta$  sont alors déterminées par (2.20) et (2.21) qui permettent de définir le temps de stabilisation ainsi que le pourcentage de dépassement.

$$T_{s,(2\%)} = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.20)$$

$$P.D. = 100e^{-\left(\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \% \quad (2.21)$$

### 2.3.3 Contrôleur de tension

De son côté, le contrôleur de tension présent dans la boucle de commande de l'étage de pinçage permet d'obtenir une vitesse de référence en rapport avec la force de tension désirée.

Ainsi, nous pouvons réutiliser (2.11) comme suit, avec l'hypothèse d'une longueur L constante :

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{ES}{L} \left[ \left( 1 + \frac{T_{Toile1}}{ES} \right) \cancel{\left( \frac{d(L)}{dt} \right)} - v_{roll1} \left( 1 - \frac{T_e}{ES} + 2 \frac{T_{Toile1}}{ES} \right) + v_{roll3} \left( 1 + \frac{T_{Toile1}}{ES} \right) \right] \quad (2.22)$$

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{1}{L} \left[ -v_{roll1} (ES - T_e + 2T_{Toile1}) + v_{roll3} (ES + T_{Toile1}) \right]. \quad (2.23)$$

En réalisant la linéarisation par rétroaction, soit en opérant un changement de variable pour que (2.23) devienne linéaire en une nouvelle entrée,  $u_1 = -v_{roll1}(ES - T_e + 2T_{Toile1})$ , (2.23) devient :

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{1}{L} [u_1 + v_{roll3}(ES + T_{Toile1})]. \quad (2.24)$$

En décomposant  $u_1$  de manière à mettre en évidence le terme de compensation des couplages et des perturbations comme suit,  $u_1 = u + u_a$  où  $u_a = -v_{roll3}(ES + T_{Toile1})$ , (2.24) devient :

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{1}{L} u. \quad (2.25)$$

Cette équation nous permet de définir la structure de commande présentée à la figure 2.8, où, sous la condition que la dynamique de la boucle de contrôle de vitesse sera nettement plus rapide que celle de la boucle de contrôle de tension, la linéarisation par rétroaction en  $u$ , est approximée pour générer la vitesse de référence  $v_{roll 1-ref}$ . Notons que cette structure contient un contrôleur, un terme de compensation des couplages et des perturbations ainsi qu'une linéarisation par rétroaction.

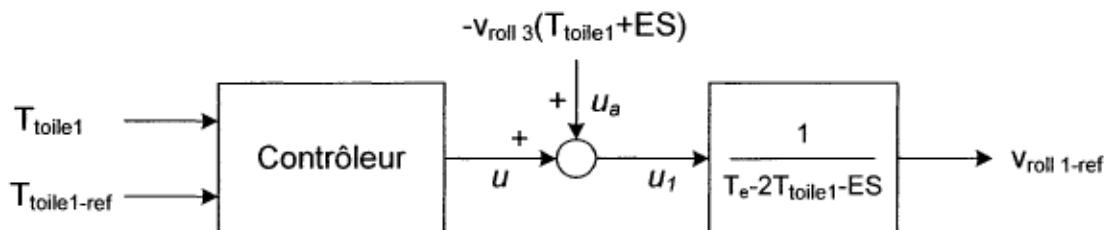


Figure 2.8 : Structure du contrôleur de tension.

Le contrôleur utilisé est de type IP tel qu'illustré à la figure 2.7. Maintenant, selon (2.25), la fonction du système se définit comme suit :

$$P(s) = \frac{1}{Ls} . \quad (2.26)$$

Ainsi la fonction de transfert en boucle fermée est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{\frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{K_p}{L}s + \frac{K_i}{L}} , \quad (2.27)$$

ce qui nous permet d'obtenir les différents gains du contrôleur IP :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{L} \quad \Rightarrow \quad K_i = \omega_n^2 L \quad (2.28)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{K_p}{L} \quad \Rightarrow \quad K_p = 2\zeta\omega_n L . \quad (2.29)$$

Les valeurs de  $\omega_n$  et de  $\zeta$  sont déterminées par (2.20) et (2.21).

## 2.4 Conclusion

Les creux de tension représentent un problème majeur face aux pertes et arrêts de production dans l'industrie. L'utilisation d'équipements sensibles à ces perturbations tels que les entraînements à vitesse variable est de plus en plus répandue. Les systèmes de bobinage représentent un procédé multimoteur possédant ce genre de technologie ainsi que de nombreuses contraintes de production.

Dans ce chapitre, nous avons donc présenté la mise en équation de la bande élastique de couplage présente dans un système de bobinage. Nous avons également réalisé la modélisation de la structure classique de ce procédé. Ce modèle nous permettra de démontrer les effets néfastes engendrés par les creux de tension sur les procédés multimoteurs et il servira de base de comparaison aux propositions qui seront développées aux cours du prochain chapitre, soit la modification de la structure mécanique d'un système de bobinage et la méthode de gestion des contrôleurs durant une perturbation électrique.

## ***Chapitre 3***

# ***Désensibilisation du système de bobinage aux creux de tension***

Les systèmes de bobinage retrouvés en industrie sont très sensibles aux perturbations sur l'alimentation électrique. Un exemple typique de ce type de procédé a été modélisé dans le chapitre précédent. La désensibilisation de ce dernier aux creux de tension est une avenue pour réduire les coûts associés aux pertes et arrêts de production. C'est pourquoi, dans le présent chapitre, nous proposerons une structure ainsi qu'une stratégie de désensibilisation aux creux de tension qui permettent de maintenir opérationnel les systèmes de bobinage en présence de creux de tension. Les solutions présentées se veulent économiques et facilement intégrables aux procédés de bobinage existants.

De ce fait, cette section du mémoire expose la nouvelle architecture du procédé de bobinage, sa modélisation à l'aide de la représentation énergétique macroscopique, sa structure maximale de commande ainsi qu'une stratégie de gestion du système de bobinage.

### 3.1 Structure proposée

La nouvelle proposition de la structure de commande des systèmes de bobinage consiste à incorporer un rouleau danseur actif dans l'architecture du procédé (figure 3.1) [Thiffault-04, Thiffault-05]. Cet actionneur linéaire permet de tendre la bande de matériau lors d'une baisse de l'effort de tension et de la relâcher lors d'une augmentation. L'enrouleur ( $im_3$ ) est toujours commandé en consigne de vitesse ( $\Omega_{im3}$ ). Cependant, c'est l'actionneur ( $mcc_2$ ) qui détermine la tension mécanique dans la toile et l'étage de pinçage ( $im_1$ ), quant à lui, agit en consigne de position du rouleau danseur ( $P_{lm2}$ ) pour le maintenir près de sa position milieu. La vitesse de l'étage de pinçage ( $\Omega_{im1}$ ) sera alors approximativement obtenue par le principe suivant :

- Pour l'abaissement de l'actionneur,

$$v_{roll\ 1} < v_{roll\ 3}$$

- Pour la montée de l'actionneur,

$$v_{roll\ 1} > v_{roll\ 3}$$

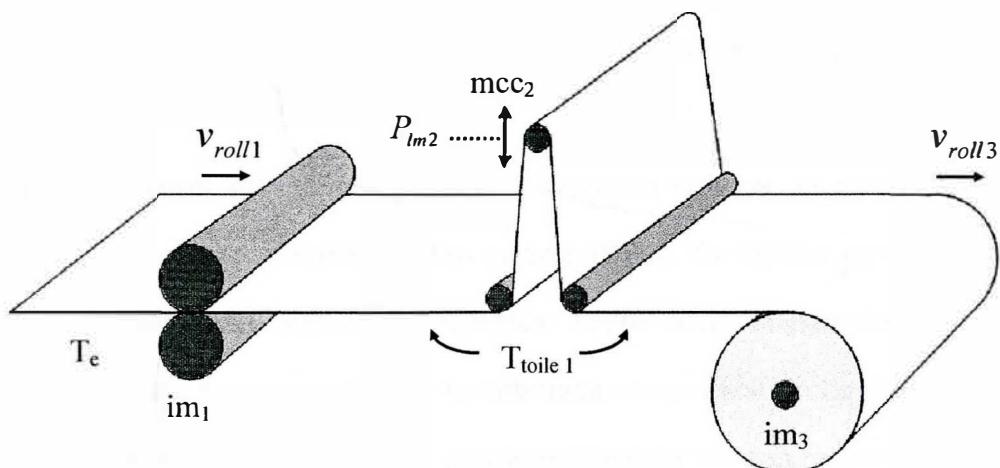


Figure 3.1 : Structure proposée d'un système de bobinage.

La figure 3.2 présente plus en détail la structure de commande utilisée en mettant en évidence les contrôleurs, les signaux de consigne ainsi que les mesures.

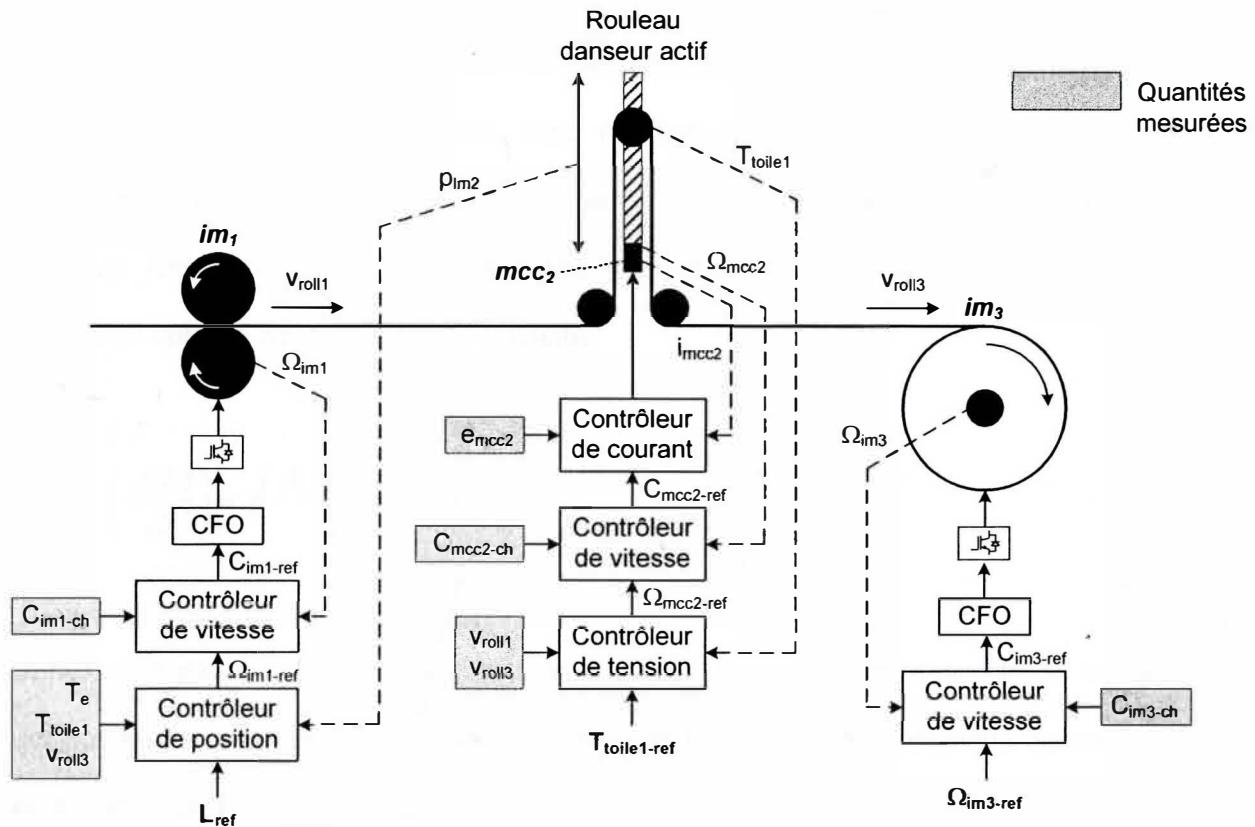


Figure 3.2 : Structure de commande proposée d'un système de bobinage.

Donc, nous remarquons que chaque moteur à induction (étages de pinçage) possède son contrôleur de vitesse et son contrôleur à flux orienté (CFO). Ce dernier permet de générer les impulsions commandant les onduleurs respectifs. Outre ceci, un contrôleur de tension est présent pour le rouleau danseur actif afin de déterminer la position de ce dernier qui engendra l'effort de tension désiré dans la bande de couplage élastique via son moteur à courant continu. En plus, un contrôleur de position est placé dans la boucle de commande de l'étage de pinçage permettant de maintenir l'actionneur du rouleau danseur près de son point milieu.

## 3.2 Modélisation du rouleau danseur actif

### 3.2.1 Modification de l'équation de la bande de couplage

Tout d'abord, pour la modification de l'architecture du système de bobinage permettant l'incorporation d'un rouleau danseur actif, nous devons modifier l'équation de la bande de couplage, afin de prendre en compte les variations de longueur et de tension mécanique du matériau. Ces variations sont causées par le déplacement du rouleau danseur actif. Ainsi, il devient possible d'établir la relation suivante :

$$\left( \frac{d(L)}{dt} \right) = 2 \left( \frac{d(p_{lm2})}{dt} \right) = 2v_{lm2} . \quad (3.1)$$

Donc, toute variation de longueur du matériau est engendrée par le double de la variation de position de l'actionneur. Ceci provient de l'effet de la configuration physique du système. Alors, en se rapportant à (2.11), nous obtenons que

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{ES}{L} \left[ 2v_{lm2} + v_{roll3} - v_{roll1} + \frac{T_e}{ES} v_{roll1} + \frac{T_{Toile1}}{ES} (2v_{lm2} + v_{roll3} - 2v_{roll1}) \right] . \quad (3.2)$$

Cette nouvelle équation nous permettra de construire le contrôleur de l'effort de tension mécanique dans le matériau par l'entremise du rouleau danseur actif. De plus, elle nous permettra d'élaborer un contrôleur de position pour ce dernier par l'intermédiaire de la boucle de commande de vitesse de l'étage de pinçage. Les prochaines sections sont donc consacrées à l'élaboration de ces contrôleurs.

### 3.2.2 Représentation énergétique macroscopique du rouleau danseur

La première étape de la modélisation consiste à représenter le rouleau danseur actif en considérant tous ses éléments. Pour ce faire, nous utiliserons une technique de modélisation basée sur la représentation énergétique macroscopique (REM). Cette approche permet une représentation unifiée des phénomènes physiques avec une mise en évidence des échanges de puissances entre les divers composants, selon le principe de l'action réaction. Les divers éléments ainsi que les règles de base de la REM sont présentés en annexe D. Notons que la REM des autres éléments du système (étages de pinçage) a été présentée dans [Thiffault-04] et ne sera pas répétée ici.

Le résultat de la modélisation du rouleau danseur et de la bande élastique réalisé à l'aide de la REM est illustré à la figure 3.3.

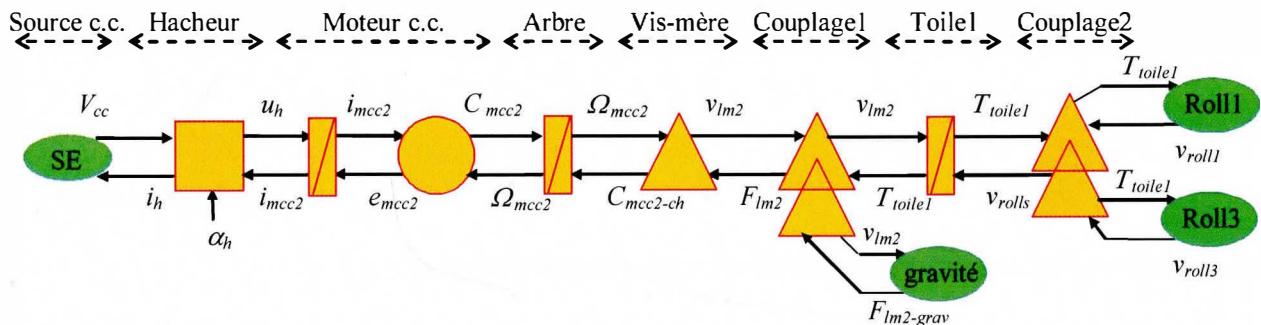
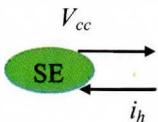


Figure 3.3 REM du rouleau danseur actif.

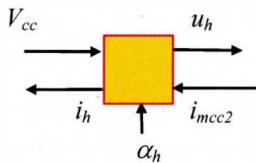
Regardons maintenant plus en détail chacun des éléments constituant cette représentation du rouleau danseur actif constitué d'une source de tension continue, d'un hacheur de tension, d'un moteur courant continu, d'un arbre et d'une vis-mère permettant la conversion de la rotation du moteur en déplacement linéaire.

- Source de tension continue



La source d'alimentation électrique est de nature continue, on la représente par un élément de source électrique. Celle-ci nous produit une tension en sortie d'action ( $V_{cc}$ ) et reçoit un courant en entrée de réaction ( $i_h$ ). Il est à noter que l'hypothèse que cet élément n'est pas affecté par les creux de tension a été posée (par exemple, l'utilisation d'une source ininteruptible).

- Hacheur de tension

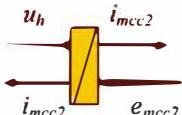


Le hacheur abaisseur de tension réversible est représenté par un élément de conversion électrique. En régime moyen, le hacheur fournit une tension réglable ( $u_h$ ) dépendante d'un rapport cyclique ( $\alpha_h$ ) et d'une tension d'alimentation ( $V_{cc}$ ). La sortie d'action est une tension ( $u_h$ ) et l'entrée de réaction est un courant ( $i_{mcc2}$ ).

$$U_h = \alpha_h V_{cc}$$

$$i_h = \alpha_h i_{mcc2}$$

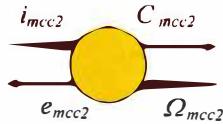
- Induit du moteur cc



La première section du moteur à courant continu est composée de l'induit, représenté par la mise en série d'une résistance ( $R_{eq}$ ), d'une inductance ( $L_{eq}$ ) et d'une force contre-électromotrice ( $e_{mcc2}$ ) représentant l'entrée de réaction. Cette section assure la mise en forme de l'énergie électrique par une accumulation inductive ayant comme variable d'état le courant ( $i_{mcc2}$ ).

$$L_{eq} \frac{d}{dt} i_{mcc2} + R_{eq} i_{mcc2} = u_h - e_{mcc2}$$

- Conversion électromécanique du moteur cc

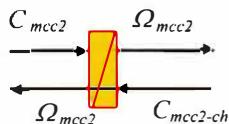


La seconde section du moteur courant continu est composée d'un élément de conversion électromécanique idéal. Il permet d'obtenir un couple en sortie d'action ( $C_{mcc2}$ ) à partir d'un courant ( $i_{mcc2}$ ). En entrée de réaction, il reçoit une vitesse ( $\Omega_{mcc2}$ ).

$$C_{mcc2} = k\phi i_{mcc2}$$

$$e_{mcc2} = k\phi \Omega_{mcc2}$$

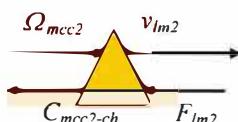
- Arbre



L'arbre est caractérisé par les coefficients qui peuvent exister entre le moteur courant continu et sa charge. La vitesse étant une variable d'état ( $\Omega_{mcc2}$ ), cet élément est alors représenté par un élément d'accumulation. Il reçoit un couple de charge en entrée de réaction ( $C_{mcc2-ch}$ )

$$\Omega_{mcc2} = \frac{1}{J_{totale}} \int (C_{mcc2} - C_{frM} - C_{mcc2-ch}) dt$$

- Vis-mère

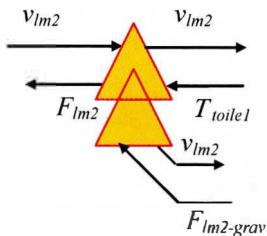


La vis-mère permet d'effectuer la conversion entre la vitesse angulaire ( $\Omega_{mcc2}$ ) du moteur et la vitesse de déplacement linéaire de l'actionneur ( $v_{lm2}$ ).

$$v_{lm2} = \frac{\Omega_{mcc2}}{2\pi P_s e}$$

$$C_{mcc2-ch} = \frac{F_{lm2}}{2\pi P_s e}$$

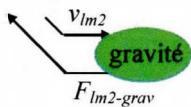
- Couplage1



Cet élément de couplage permet d'effectuer la liaison entre les différentes forces qui agissent sur le rouleau danseur actif. En effet, il y a la force de gravité ( $F_{lm2-grav}$ ) ainsi que la force de tension exercée par la bande de couplage élastique ( $T_{toile1}$ ).

$$F_{lm2} = 2T_{toile1} + F_{lm2-grav}$$

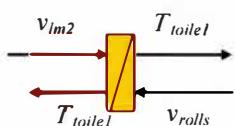
- Force de gravité



La force de gravité est représentée par un élément source. Elle est composée d'une force de gravité provenant de la masse du rouleau danseur et d'une force de frottement.

$$F_{lm2-grav} = F_{grav} + F_{fr}$$

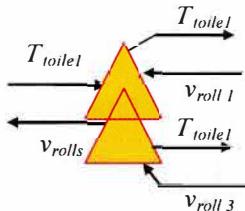
- Toile1



La section de toile est représentée par un élément d'accumulation dont la variable d'état est la force de tension dans le matériau. L'entrée d'action est la vitesse de déplacement du rouleau danseur actif ( $v_{lm2}$ ). L'entrée de réaction est un vecteur de vitesse comprenant la vitesse de chacun des étages agissant sur la section de toile ( $v_{rolls}$ ).

$$T_{toile1} = \int \left( \frac{ES}{L} \left[ 2v_{lm2} + v_{roll3} - v_{roll1} + \frac{T_e}{ES} v_{roll1} + \frac{T_{toile1}}{ES} (2v_{lm2} + v_{roll3} - 2v_{roll1}) \right] \right) dt$$

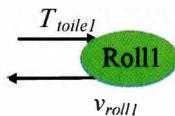
- Couplage2



Cet élément de couplage permet de générer le vecteur de vitesses comprenant les différentes vitesses des étages agissant sur la section de toile. Il y a alors la vitesse de l'étage de pinçage ( $v_{roll1}$ ) et celle de l'enrouleur ( $v_{roll3}$ ).

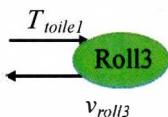
$$v_{rolls} = v_{roll1}, v_{roll3}$$

- Étage de pinçage



L'étage de pinçage est représenté par un élément source. Ceci permet de simplifier le modèle présent. Ainsi, cet élément produit une vitesse en sortie d'action ( $v_{roll1}$ ) et reçoit une tension en entrée de réaction ( $T_{toile1}$ ).

- Enrouleur



Tout comme l'élément précédent, l'enrouleur est représenté par un élément source qui produit une vitesse en sortie d'action ( $v_{roll3}$ ) et reçoit une tension en entrée de réaction ( $T_{toile1}$ ).

À partir de la représentation énergétique macroscopique du rouleau danseur actif, nous pouvons réaliser sa commande permettant le contrôle de l'effort de tension présent dans le matériau à enrouler.

### 3.2.3 Structure maximale de commande du rouleau danseur

La seconde étape de la modélisation du rouleau danseur actif consiste à réaliser son algorithme de commande. De ce fait, nous nous baserons sur la structure maximale de commande (SMC) appelée ainsi car elle demande un maximum de capteurs et un maximum d'opérations. Une structure de commande pratique peut en être déduite par simplification et estimation des grandeurs mesurables. Nous obtenons la SMC par le principe d'inversion appliqué aux deux types de blocs de la REM. Il y a l'inversion directe pour les éléments de conversion et l'inversion indirecte par asservissement pour les éléments d'accumulation. Davantage de détails concernant la SMC sont présentés en annexe D. La figure 3.4 présente le résultat des boucles de commande du rouleau danseur actif, réalisé à l'aide de la SMC.

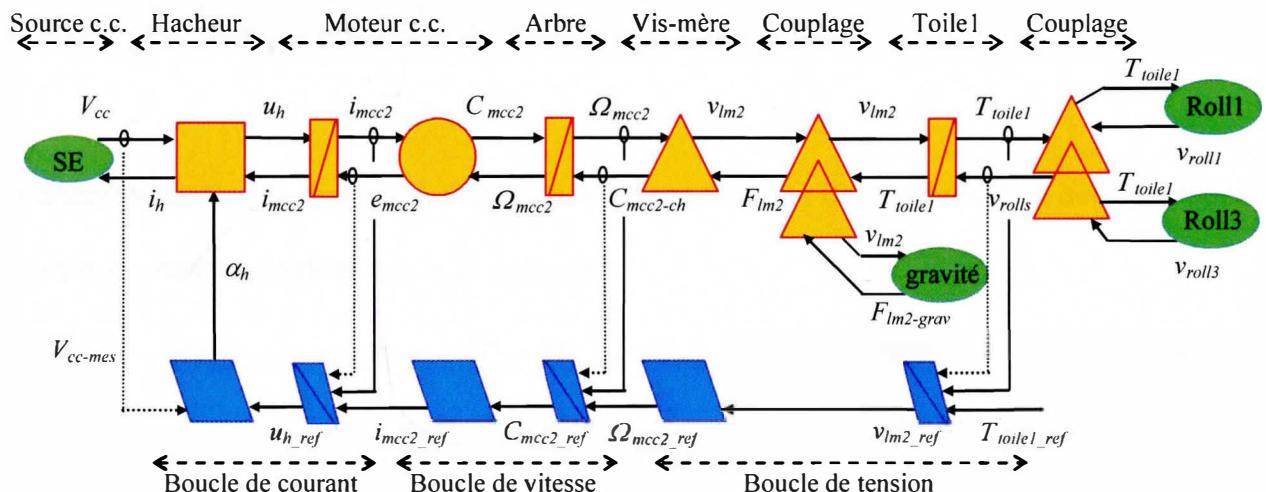


Figure 3.4 SMC du rouleau danseur actif.

Regardons maintenant plus en détail chacun des éléments constituant la commande du rouleau danseur actif, constituée de trois inversions directes et de trois inversions indirectes par asservissement.

### 3.2.3.1 Boucle de tension

La première section de la boucle de tension est constituée de l'inverse du modèle de la toile effectuée à l'aide d'un asservissement, puisqu'il s'agit d'un élément d'accumulation d'énergie. Il faut alors manipuler l'équation de cette dernière (3.2) pour identifier les mesures nécessaires ainsi que pour la constitution de son contrôleur. Nous obtenons ainsi :

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{1}{L} [ES(v_{roll3} - v_{roll1}) + v_{roll1}(T_e - 2T_{Toile1}) + T_{Toile1}v_{roll3}] + \frac{2}{L}(ES + T_{toile})v_{lm2} . \quad (3.3)$$

En réalisant la linéarisation par rétroaction  $u_1 = 2(ES + T_{Toile1})v_{lm2}$ , (3.3) devient :

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{1}{L} [ES(v_{roll3} - v_{roll1}) + v_{roll1}(T_e - 2T_{Toile1}) + T_{Toile1}v_{roll3}] + \frac{1}{L}u_1 . \quad (3.4)$$

En décomposant  $u_1$  de manière à mettre en évidence le terme de compensation des couplages et des perturbations comme suit,  $u_1 = u + u_a$  où

$u_a = -[ES(v_{roll3} - v_{roll1}) + v_{roll1}(T_e - 2T_{Toile1}) + T_{Toile1}v_{roll3}]$ , on obtient :

$$\frac{d(T_{Toile1})}{dt} = \frac{1}{L}u . \quad (3.5)$$

Cette équation nous permet de définir la structure de commande présentée à la figure 3.5. Notons que cette structure contient un contrôleur, un terme de compensation des couplages et des perturbations ainsi qu'une linéarisation par rétroaction.

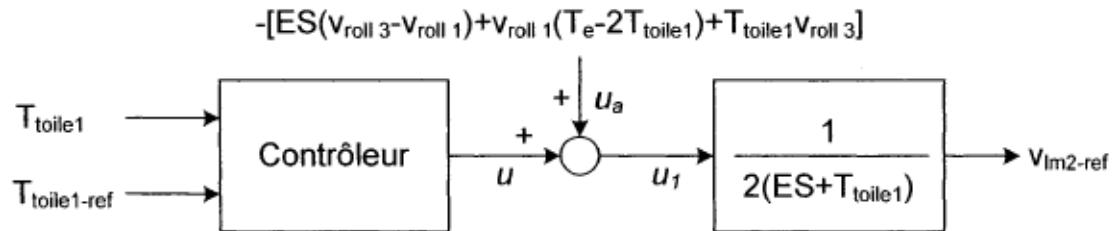


Figure 3.5 : Structure du modèle inverse de la toile.

Le contrôleur utilisé est de type IP tel qu'illustré à la figure 2.7. Maintenant, selon (3.5), la fonction du système se définit comme suit :

$$P(s) = \frac{1}{Ls} \quad (3.6)$$

Ainsi la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{\frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{K_p}{L}s + \frac{K_i}{L}} \quad (3.7)$$

d'où, les gains intégral et proportionnel du contrôleur IP :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{L} \quad \Rightarrow \quad K_i = \omega_n^2 L \quad (3.8)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{K_p}{L} \quad \Rightarrow \quad K_p = 2\zeta\omega_n L \quad (3.9)$$

Les valeurs de  $\omega_n$  et de  $\zeta$  sont déterminées par (2.20) et (2.21).

La seconde section de la boucle de tension est constituée de l'inverse de l'élément de couplage qui s'effectue directement en inversant l'équation puisqu'il s'agit d'un élément de conversion mécanique. L'équation du bloc inverse est la suivante :

$$\frac{\Omega_{mcc2-ref}}{v_{lm2-ref}} = 2\pi P_s e . \quad (3.10)$$

### 3.2.3.2 Boucle de vitesse

La première section de la boucle de vitesse est composée de l'inverse du modèle de l'arbre qui est un élément d'accumulation, tout comme la section de toile. C'est pourquoi le bloc d'inverse se réalisera à l'aide d'un d'asservissement. Prenons d'abord l'équation de l'arbre pour déterminer la structure de son inverse.

$$\Omega_{mcc2} = \frac{1}{J_{totale}} \int (C_{mcc2} - C_{frM} - C_{mcc2-ch}) dt \quad (3.11)$$

$$\frac{d(\Omega_{mcc2})}{dt} = \frac{1}{J_{totale}} (C_{mcc2} - C_{frM} - C_{mcc2-ch}) . \quad (3.12)$$

Donc cette équation peut se réécrire sous la forme suivante

$$C_{mcc2} = C_{frM} + C_{mcc2-ch} + (J_{totale} \Omega_{mcc2}) s . \quad (3.13)$$

Cette équation nous permet d'obtenir la structure de commande présentée à la figure 3.6. Notons que cette structure contient un contrôleur et un terme d'anticipation.

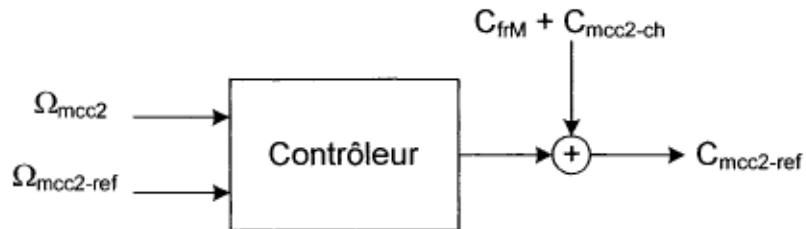


Figure 3.6 : Structure du modèle inverse de l'arbre.

Le contrôleur utilisé est de type IP tel qu'illustré à la figure 2.7. Maintenant, selon la figure 3.6 et l'équation (3.13), la fonction du système se définit comme suit :

$$P(s) = \frac{1}{J_{\text{totale}} s} \quad (3.14)$$

Ainsi la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{\frac{K_i}{J_{\text{totale}}}}{s^2 + \frac{K_p}{J_{\text{totale}}} s + \frac{K_i}{J_{\text{totale}}}} \quad (3.15)$$

d'où, les gains intégral et proportionnel du contrôleur IP :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{J_{\text{totale}}} \quad \Rightarrow \quad K_i = \omega_n^2 J_{\text{totale}} \quad (3.16)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{K_p}{J_{\text{totale}}} \quad \Rightarrow \quad K_p = 2\zeta\omega_n J_{\text{totale}} \quad (3.17)$$

Les valeurs de  $\omega_n$  et de  $\zeta$  sont déterminées par (2.20) et (2.21).

La seconde section de la boucle de courant est constituée de l'inverse de la conversion électromécanique du moteur courant continu, qui se réalise directement en inversant l'équation puisqu'il s'agit d'un élément de conversion électromécanique sans accumulation d'énergie.

L'équation du bloc inverse est la suivante :

$$\frac{i_{mcc2-ref}}{C_{mcc2-ref}} = \frac{1}{k\phi} . \quad (3.18)$$

### 3.2.3.3 Boucle de courant

La première section de la boucle de courant contient l'inverse du modèle de l'induit du moteur courant continu, qui est un élément d'accumulation tout comme la section de toile et l'arbre. C'est pourquoi le bloc d'inverse sera réalisé à l'aide d'un bloc d'asservissement. Regardons tout d'abord l'équation de l'induit pour déterminer la structure de son contrôleur inverse.

$$L_{eq} \frac{d}{dt} i_{mcc2} + R_{eq} i_{mcc2} = u_h - e_{mcc2} . \quad (3.19)$$

Donc on peut réécrire cette équation sous la forme suivante

$$u_h = e_{mcc2} + i_{mcc2} (L_{eq} s + R_{eq}) . \quad (3.20)$$

Cette équation nous permet d'obtenir la structure de commande présentée à la figure 3.7. Notons que cette structure contient un contrôleur et un terme d'anticipation.

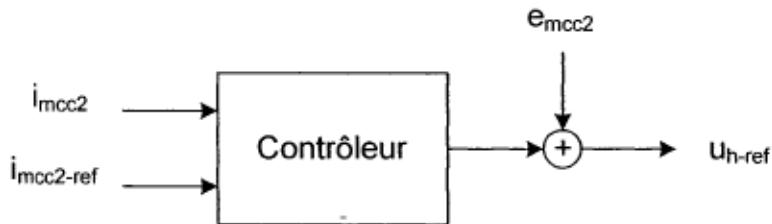


Figure 3.7 : Structure du modèle inverse de l'induit du mcc.

Le contrôleur utilisé est de type IP tel qu'illustré à la figure 2.7. Maintenant, selon la figure 3.7 et l'équation (3.13), la fonction du système se définit comme suit :

$$P(s) = \frac{1}{L_{eq} s + R_{eq}} . \quad (3.21)$$

Ainsi la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{\frac{K_i}{L_{eq}}}{s^2 + \frac{R_{eq} + K_p}{L_{eq}} s + \frac{K_i}{L_{eq}}} , \quad (3.22)$$

d'où, les gains intégral et proportionnel du contrôleur IP :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{L_{eq}} \quad \Rightarrow \quad K_i = \omega_n^2 L_{eq} \quad (3.23)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{R_{eq} + K_p}{L_{eq}} \quad \Rightarrow \quad K_p = 2\zeta\omega_n L_{eq} - R_{eq} . \quad (3.24)$$

Les valeurs de  $\omega_n$  et de  $\zeta$  sont déterminer par (2.20) et (2.21).

La seconde section de la boucle de courant est constituée de l'inverse du hacheur de tension, qui s'effectue directement en inversant l'équation puisqu'il s'agit d'un élément de conversion électrique sans accumulation d'énergie. L'équation du bloc inverse est la suivante.

$$\frac{\alpha_h}{u_h} = \frac{1}{V_{cc-mes}} \quad (3.25)$$

### 3.2.4 Contrôleur de position

La dernière étape de la modélisation du rouleau danseur actif consiste à réaliser son contrôleur de position. En effet, cet axe linéaire permet d'asservir l'effort de tension présent dans le matériau, mais il n'y a rien qui limite ses déplacements. De ce fait, un contrôleur de position venant interagir dans la boucle de commande de vitesse de l'étage de pinçage (figure 3.2) permettra de maintenir la position de l'actionneur du rouleau danseur près de son point milieu.

L'équation de la toile (2.11) nous permet d'obtenir la relation existant entre la longueur de la bande et le reste des termes qui la définissent :

$$\frac{d(L)}{dt} = \frac{v_{roll1}(ES + 2T_{toile1} - T_e)}{ES + T_{toile1}} + \left[ L \frac{d(T_{toile1})}{dt} - ESv_{roll3} - T_{toile1}v_{roll3} \right] \frac{1}{ES + T_{toile1}} \quad (3.26)$$

En réalisant la linéarisation par rétroaction  $u_1 = \frac{v_{roll1}(ES + 2T_{toile1} - T_e)}{ES + T_{toile1}}$ , (3.26) devient :

$$\frac{d(L)}{dt} = u_1 + \left[ L \frac{d(T_{toile1})}{dt} - ESv_{roll3} - T_{toile1}v_{roll3} \right] \frac{1}{ES + T_{toile1}} \quad (3.27)$$

En décomposant  $u_1$  de manière à mettre en évidence le terme de compensation comme suit,

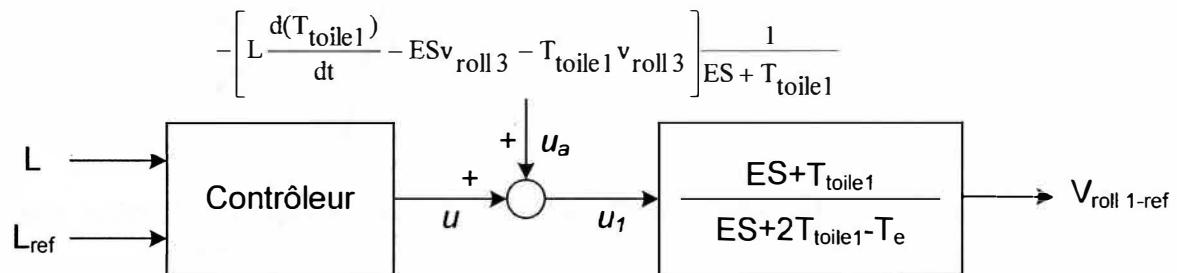
$$u_1 = u + u_a \text{ où } u_a = - \left[ L \frac{d(T_{toile1})}{dt} - ESv_{roll3} - T_{toile1}v_{roll3} \right] \frac{1}{ES + T_{toile1}}, \text{ (3.27) devient :}$$

$$\frac{d(L)}{dt} = u \quad . \quad (3.28)$$

Cette équation nous permet d'obtenir la structure de commande présentée à la figure 3.8.

Notons que cette structure contient un contrôleur, un terme de compensation (dont  $\frac{d(T_{toile1})}{dt}$  est

obtenu par le filtrage de  $T_{toile1}$ ) ainsi qu'une linéarisation par rétroaction. L'hypothèse de séparation des dynamiques des boucles de commande doit encore une fois être rencontrée.



Nous proposons l'utilisation d'un contrôleur PI qui possède l'architecture suivante :

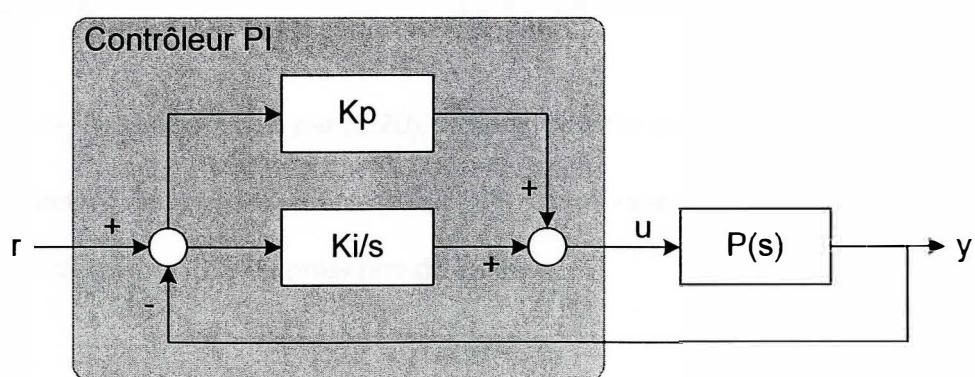


Figure 3.9 : Structure d'un contrôleur PI.

La caractéristique de transfert du contrôleur PI se définit comme suit :

$$u = \frac{K_i}{s}(r - y) + K_p(r - y) . \quad (3.29)$$

Dans le cas présent, selon (3.28), nous pouvons définir la fonction du système :

$$P(s) = \frac{1}{s} . \quad (3.30)$$

Ainsi la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} . \quad (3.31)$$

Les gains intégral et proportionnel du contrôleur PI sont alors obtenus comme suit pour un amortissement de 0.7 :

$$\omega_n^2 = K_i \quad \Rightarrow \quad K_i = \omega_n^2 \quad (3.32)$$

$$1.4\omega_n = K_p \quad \Rightarrow \quad K_p = 1.4\omega_n . \quad (3.33)$$

La valeur de  $\omega_n$  est déterminée par (2.20). Notons qu'avec le contrôleur PI, il y a présence d'un zéro qui affectera le dépassement. Avec un amortissement de 0.7, nous obtenons un dépassement d'environ 25% en présence de ce zéro.

### 3.3 Stratégie de gestion du système

À présent, nous proposerons une stratégie de désensibilisation aux creux de tension permettant d'empêcher le disfonctionnement des contrôleurs durant une perturbation sur l'alimentation électrique. C'est pourquoi, en premier lieu, nous présenterons une technique de gestion des contrôleurs et des consignes durant les creux de tension. En second lieu, nous exposerons un gestionnaire de trajectoires qui permet de générer les consignes désirées selon un profil adouci.

#### 3.3.1 Stratégie de désensibilisation aux creux de tension

Puisque dans certains entraînements nous ne pouvons accéder aux contrôleurs pour modifier leurs algorithmes de commande, nous considérerons l'ajout d'un contrôleur externe comme solution de mise à niveau pour la compensation des creux de tension.

Alors, pendant un creux de tension, les entraînements tirent leur énergie du lien cc pour alimenter la charge, ce qui provoque une baisse de la tension sur le bus cc. Si les consignes demeurent inchangées, les entraînements ne seront plus capables de produire le flux et le couple désirés. Cette discordance entre le modèle de la machine et le modèle utilisé pour l'observation du flux et de la position, dans les algorithmes standard, provoquera une erreur de synchronisation réduisant ainsi les performances de l'entraînement.

La figure 3.10 définit la stratégie appliquée au système pendant les creux de tension. La modification de la vitesse de référence est utilisée pour éliminer la divergence et la saturation de l'intégrateur (*wind-up*) présent dans le contrôleur lorsque le moteur ne peut plus maintenir sa

vitesse en présence d'un creux de tension important. La mise hors fonction des onduleurs les empêche de freiner les moteurs en raison d'une estimation erronée des observateurs.

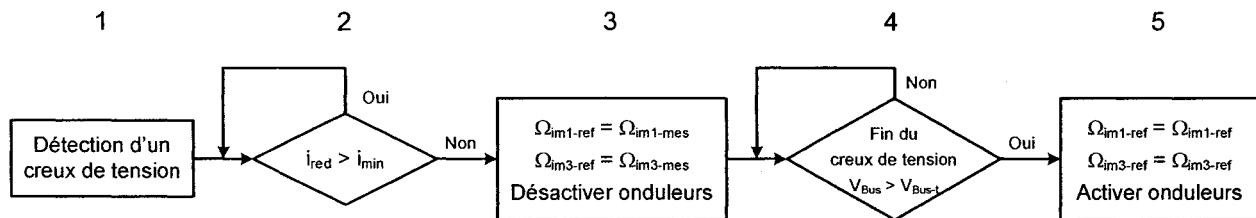


Figure 3.10 : Algorithme de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

Regardons plus en détail chacune des étapes de cette stratégie et les implications qu'elle provoque :

1. La première étape consiste à détecter l'apparition d'un creux de tension sur l'alimentation électrique en utilisant par exemple, un algorithme tel que décrit dans [Nanga-05b].
2. Ensuite, il faut attendre que le courant à la sortie du redresseur ( $i_{red}$ ) soit inférieur à un certain seuil minimum ( $i_{min}$ ). Ainsi, le procédé demeure en pleine opération tant que le redresseur ne se bloque pas, empêchant de mettre en œuvre les mesures de correction prématulement.
3. La troisième étape consiste à prendre les signaux mesurés comme référence de vitesse des étages respectifs, permettant de gérer les contrôleurs de vitesse en éliminant le problème de « *wind-up* ». Cette mesure est équivalente à maintenir la valeur de l'intégrateur du contrôleur à une valeur fixe pendant la perturbation électrique. La seconde correction consiste à désactiver les onduleurs des moteurs à

induction afin de prévenir leur mal fonctionnement, ce qui pourrait entraîner le freinage des moteurs par une mauvaise estimation de l'observateur de flux. Ainsi, à l'aide de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension, il devient possible de contourner le problème sans modifier la structure même des contrôleurs puisque le tout est géré de l'extérieur.

4. Lorsque le creux de tension est terminé, nous nous assurons que la tension sur le bus cc ( $V_{Bus}$ ) soit revenue à un niveau d'opération ( $V_{Bus-t}$ ) pour lequel les entraînements fonctionneront normalement, s'assurant ainsi de bonnes conditions de redémarrage.
5. La dernière étape consiste à réactiver les onduleurs et à remettre les références des contrôleurs de vitesse à leurs valeurs de consigne nominale.

### **3.3.2 Gestionnaire de trajectoires**

Le gestionnaire de trajectoires consiste à générer des profils de consignes optimisés. La trajectoire ainsi générée est optimale, c'est-à-dire la plus rapide possible en considérant les différentes contraintes.

Le générateur proposé permet d'obtenir une trajectoire de position parabolique tout en contrôlant les maximums de vitesse et d'accélération. Cependant, si nous appliquons ce générateur à une consigne de vitesse, nous dérivons chacun des termes. Ainsi, nous obtenons une trajectoire de vitesse parabolique tout en contrôlant les maximums d'accélération et de la dérivée de l'accélération (jerk). Ce profil est plus rapide que certaines trajectoires similaires

utilisant par exemple des courbes en sinus. Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent les différents gabarits utilisés. Les détails des équations associées aux calculs des trajectoires et des différents temps intermédiaires sont présentés en annexe E.

TABLEAU 3.1

Premier gabarit du générateur de trajectoires

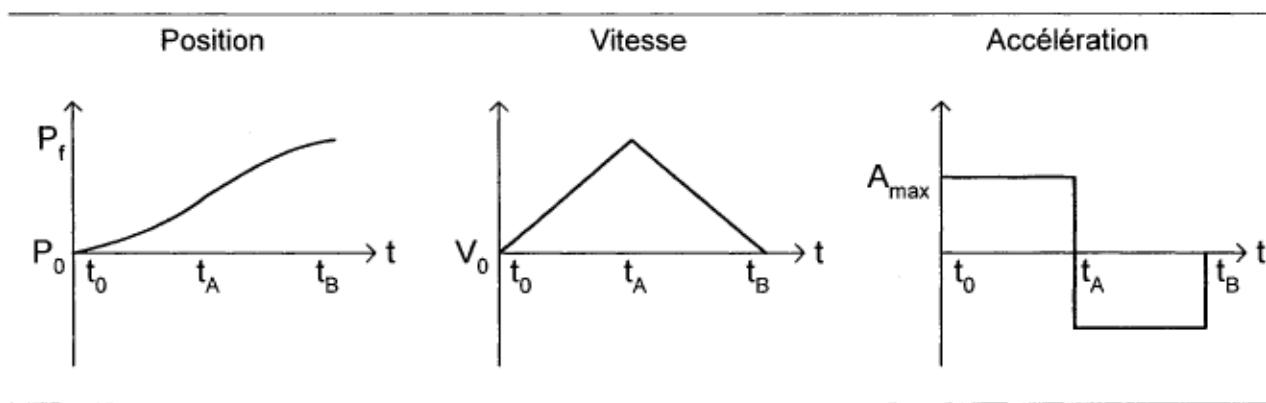
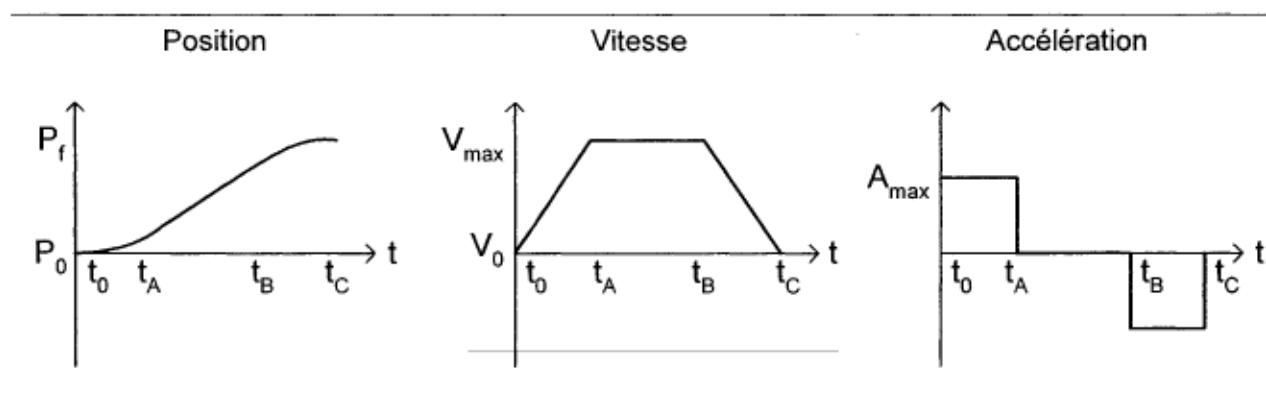


TABLEAU 3.2

Second gabarit du générateur de trajectoires



L'algorithme du programme de la génération de trajectoires est illustré à la figure 3.11. Cet algorithme est implanté en langage C sous Matlab/Simulink en utilisant l'outil de développement « S-Function Builder ». Cet outil permet d'étendre les capacités de Simulink. En effet, il permet

d'y ajouter nos propres blocs créés en utilisant différents langages de programmation tels qu'Ada, C, C++, Fortran et Matlab.

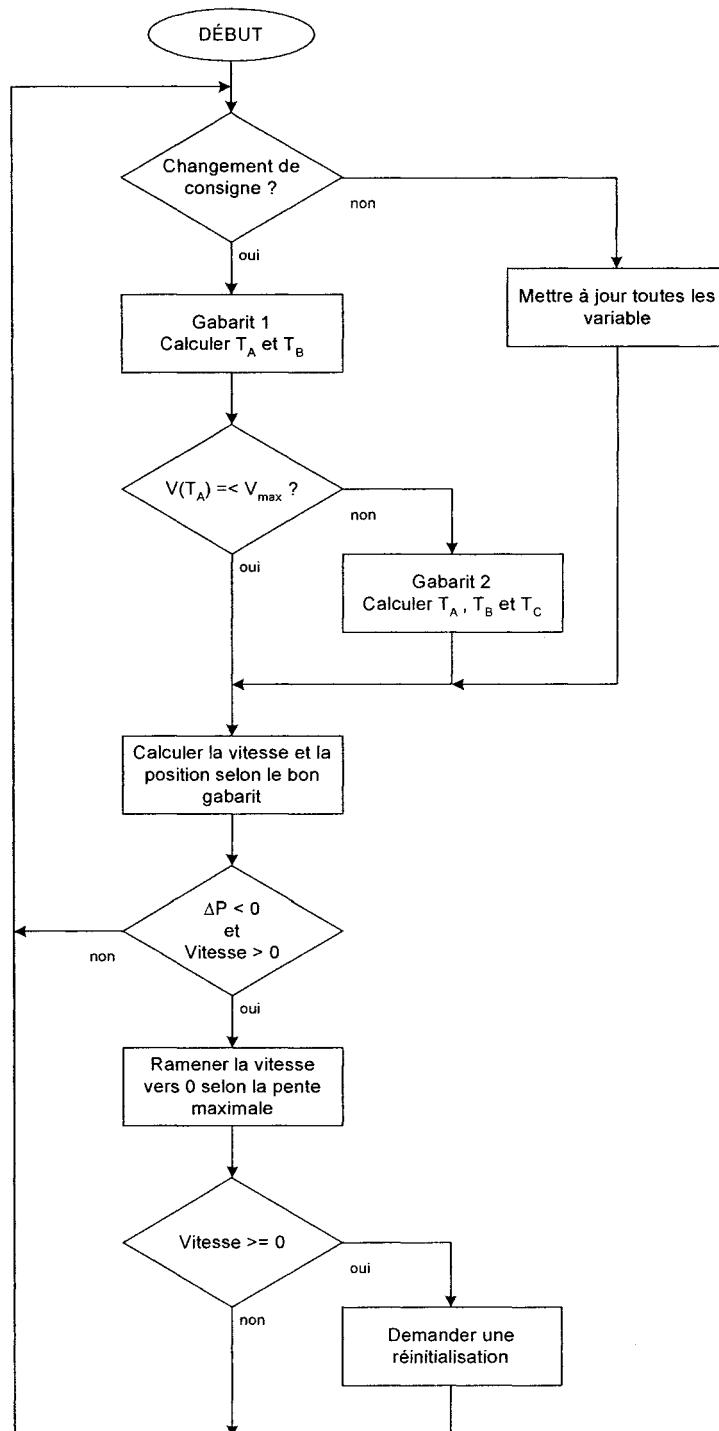


Figure 3.11 : Algorithme du générateur de trajectoires.

### 3.4 Conclusion

La désensibilisation de la structure classique d'un système de bobinage aux perturbations électriques telles que les creux de tension représente une avenue pour diminuer les pertes et arrêts de production engendrés par ce problème.

C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de modification mineure de la structure mécanique et des contrôleurs existants dans un système de bobinage classique afin de pouvoir maintenir le procédé opérationnel durant un creux de tension. Ainsi, nous avons incorporé un rouleau danseur actif dans la structure du système de bobinage qui a été modélisée à l'aide de la représentation énergétique macroscopique. Sa commande a été réalisée en utilisant la structure maximale de commande découlant de la REM.

Par la suite, nous avons proposé une stratégie de gestion du système pour enrayer le disfonctionnement de certains contrôleurs pendant les perturbations sur l'alimentation électrique. Enfin, nous avons exposé un gestionnaire de trajectoires permettant de contrôler les paramètres dynamiques des consignes tout en optimisant leur profil.

Ce modèle ainsi que celui obtenu dans le chapitre précédent seront comparés par simulation dans le prochain chapitre afin d'évaluer le potentiel de la nouvelle proposition.

## ***Chapitre 4***

### ***Résultats de simulations***

Nous avons précédemment réalisé la modélisation de la structure classique des systèmes de bobinage. Par la suite, nous avons proposé une technique de désensibilisation de cette structure aux creux de tension en incorporant dans l'architecture physique un rouleau danseur actif et dans la structure de commande, une stratégie de gestion des contrôleurs et des consignes. C'est pourquoi, le présent chapitre expose les résultats de simulation de chacune des étapes effectuées. Ainsi, les différentes contributions apportées par chacune des propositions sont mises en évidence.

Les modèles ont été implantés dans l'environnement Matlab/Simulink. De plus, pour les moteurs à induction et les convertisseurs électriques associés, nous avons utilisé les modèles de la librairie « SimPowerSystems » qui propose des modèles très complets s'approchant de la réalité. Il est à noter que les différents paramètres des simulations qui suivent sont présentés en annexe F.

## 4.1 Système de bobinage classique

Le système de bobinage classique tel qu'illustré aux figures 2.4 et 2.5 comprend un étage de pinçage et un enrouleur. Le schéma général du modèle Simulink est présenté à la figure 4.1.

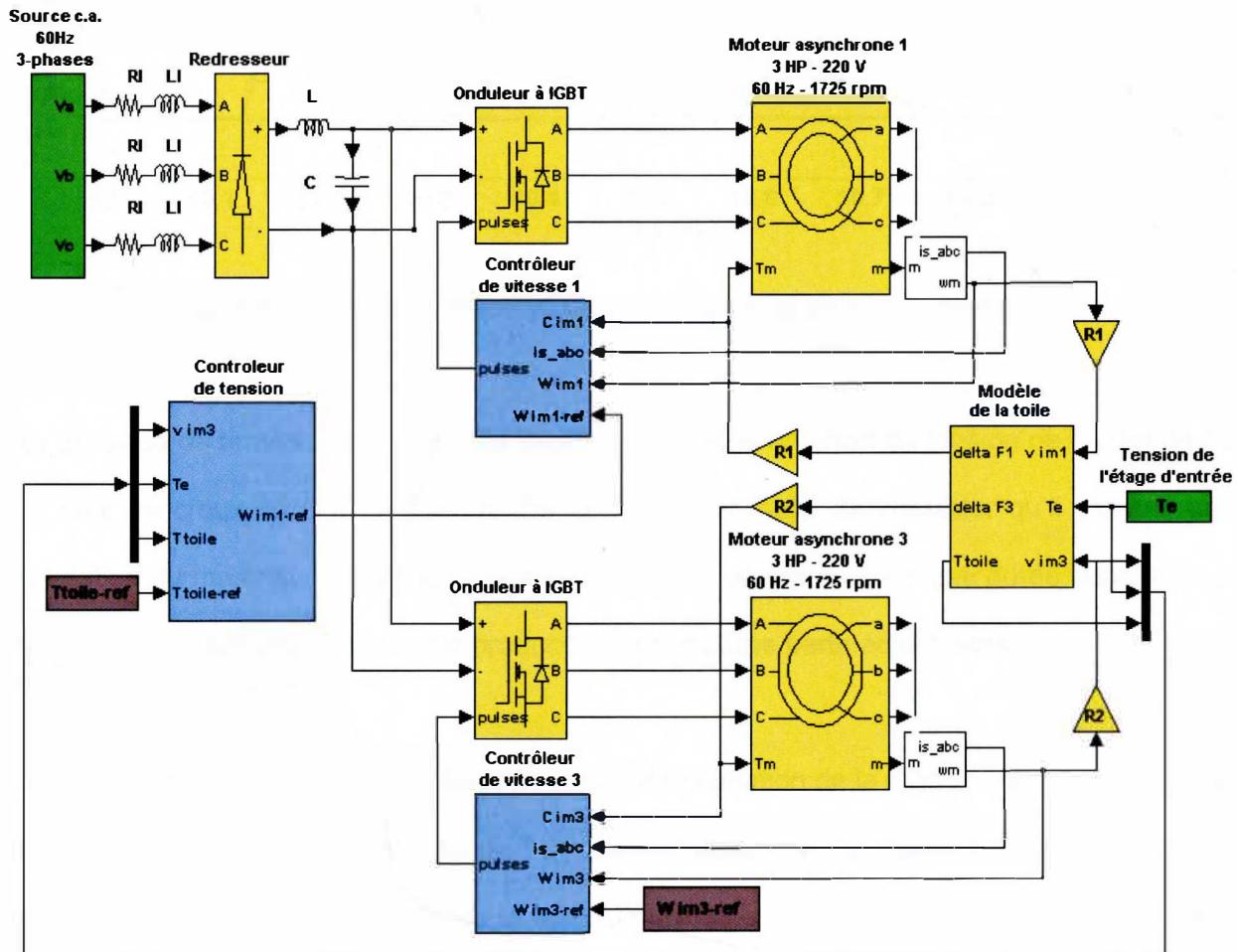


Figure 4.1 : Modèle Simulink du système de bobinage classique.

Pour la simulation, nous avons imposé une consigne de vitesse suivant une trajectoire parabolique (accélération trapézoïdale) afin d'atteindre une vitesse angulaire de 30 rad/s pour l'enrouleur, se traduisant par une vitesse de défilement linéaire de 15 m/s pour le procédé. Une consigne d'effort de tension de 4 N a également été exigée pour la section de toile. Par la suite,

au temps 10,1 s de la simulation, nous imposons un creux de tension de type A (équilibré) de 0.9 p.u. pour des durées de 1, 2 et 5 cycles. La figure 4.2 présente le graphique de la variation de l'effort de tension dans le matériau pour ces différentes durées de la perturbation.

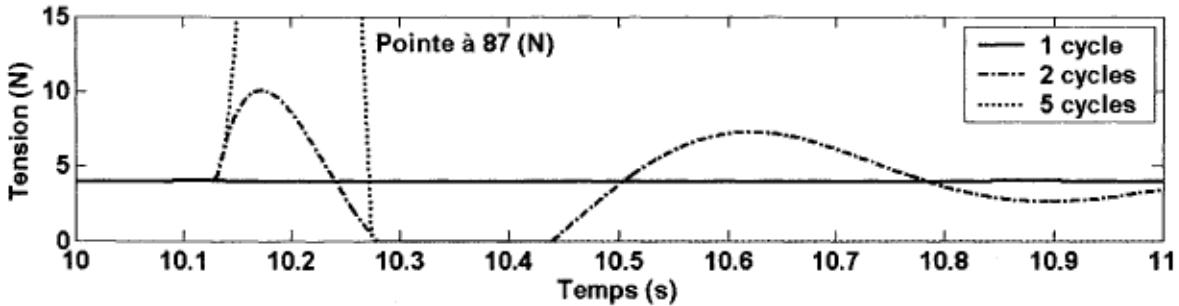


Figure 4.2 : Réponse en effort de tension pour la structure classique.

Pour un creux de tension de 2 cycles, le système provoque un effort de tension de l'ordre de 10 N et pour un creux de 5 cycles, 87 N. De ce fait, il est facile de constater qu'il y aurait une dégradation du matériau, voire même une rupture, pour un creux ayant une durée supérieure à 2 cycles provoquant ainsi un arrêt de production et donc, une perte économique.

Regardons maintenant les causes de cette importante variation de la tension mécanique dans le matériau, pour un creux d'une durée de 5 cycles. À l'apparition du creux de tension (10,1 s) le bus cc n'est plus fourni en énergie par le réseau puisque le redresseur se bloque (après que le courant dans les inductances en série avec les interrupteurs de puissance soit passé à zéro). Donc, une baisse de la tension du bus cc est notée (figure 4.3). Lorsque la tension descend sous une valeur inférieure à celle de la force contre-électromotrice équivalente des moteurs à induction (10,13s), ces derniers décélèrent de manière incontrôlée (figure 4.4) puisque l'observateur dans le contrôleur à flux orienté n'estime plus les paramètres de la machine correctement. De plus, à la disparition de la perturbation électrique (10,183s), nous ne

retrouvons pas immédiatement la valeur d'effort de tension désirée dans le matériau puisque la boucle de régulation de la tension par l'étage de pinçage est plutôt lente, dû à l'inertie qu'elle possède et qu'il y a eu dérive de l'intégrateur du contrôleur de l'effort de tension (et des intégrateurs des boucles internes) – le système opère donc en régime perturbé.

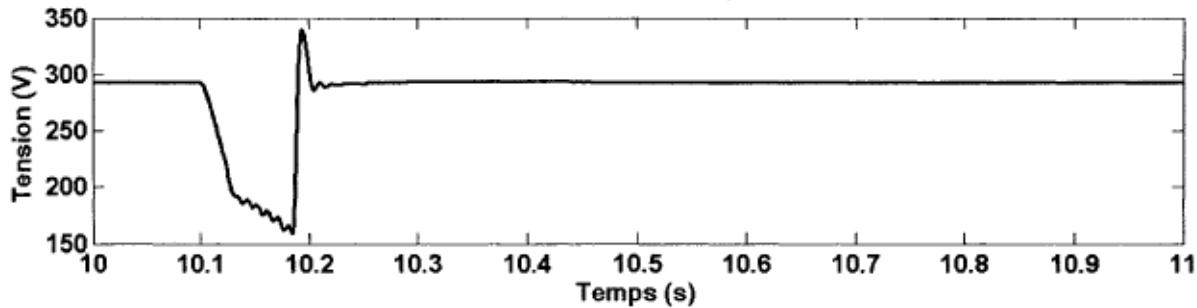


Figure 4.3 : Tension du bus cc pour la structure classique (creux de 5 cycles).

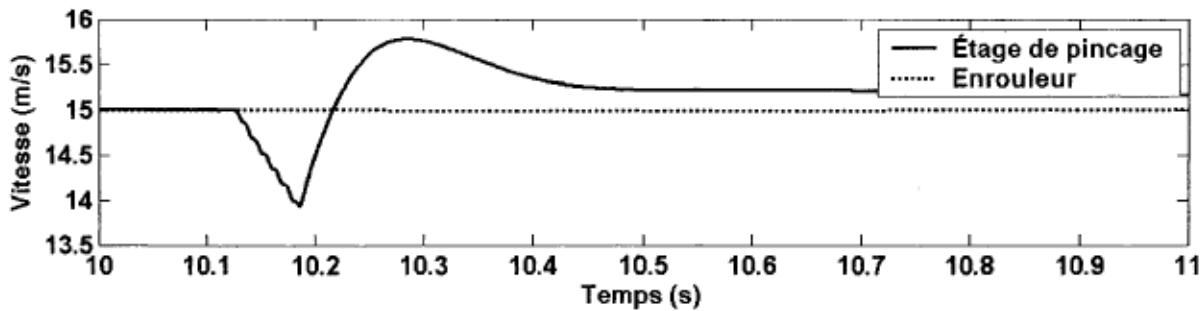


Figure 4.4 : Vitesse des moteurs pour la structure classique (creux de 5 cycles).

Il est donc nécessaire d'incorporer un élément dans la structure de bobinage permettant d'accélérer la boucle de régulation de l'effort de tension. De plus, cet élément ne doit pas être affecté par les perturbations électriques. Avant de présenter les résultats de simulation de la proposition avec danseur actif, nous observerons l'effet de la mise en œuvre de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension sur la structure classique.

## 4.2 Système de bobinage classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension

Le schéma général du modèle Simulink présenté à la figure 4.5 expose le système de bobinage classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension. Les blocs de la stratégie de commande sont identifiés en orange, de chaque côté des contrôleurs de vitesse. Cette méthode se veut simple, par l'ajout de contrôleurs externes aux contrôleurs existant d'un système de bobinage classique.

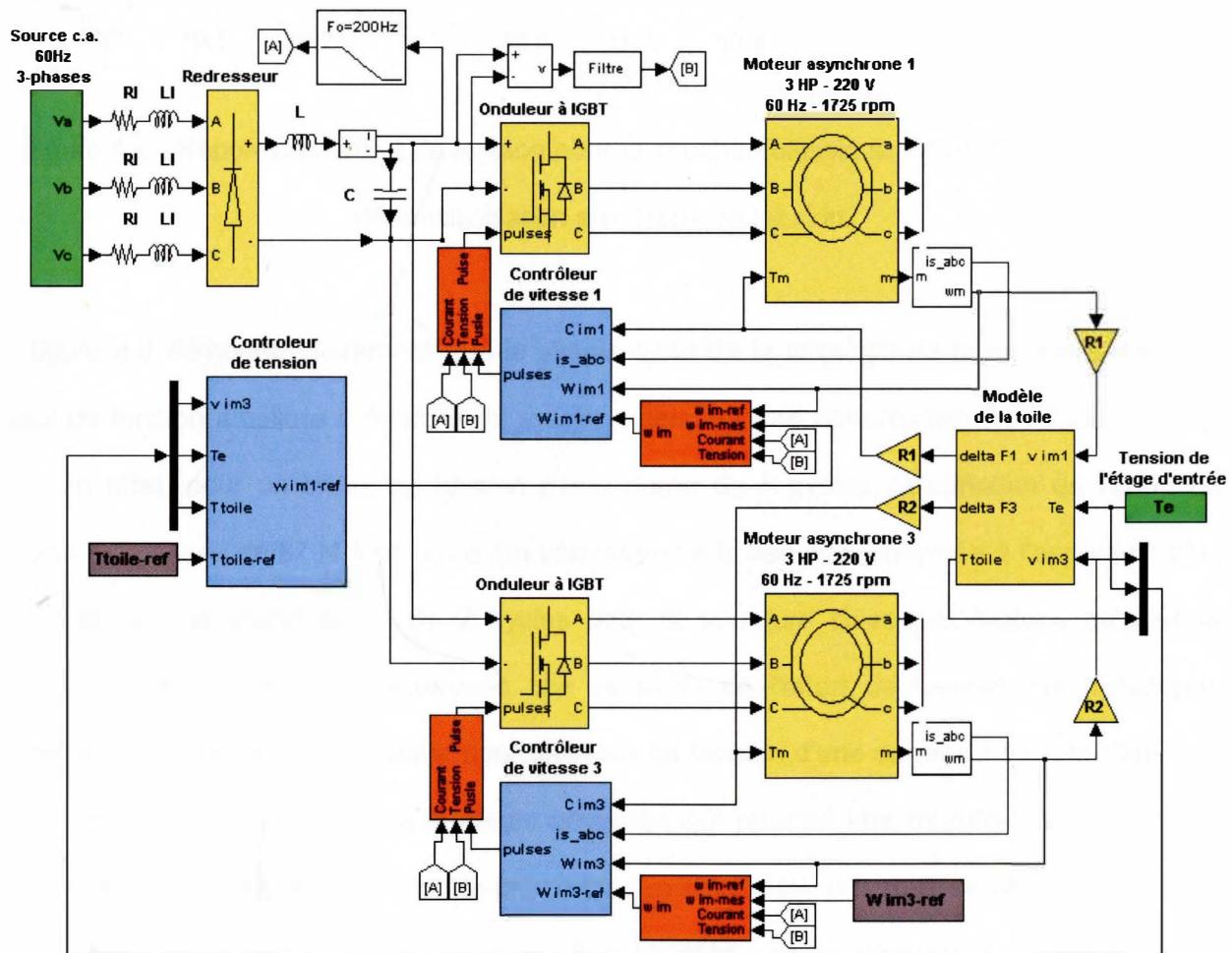


Figure 4.5 : Modèle Simulink du système de bobinage classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

Pour la simulation de cette structure, nous avons utilisé les mêmes paramètres que dans la section précédente. En effet, nous avons introduit des perturbations de 1, 2 et 5 cycles. La figure 4.6 présente le graphique de la variation de l'effort de tension dans le matériau pour ces différentes durées de la perturbation.

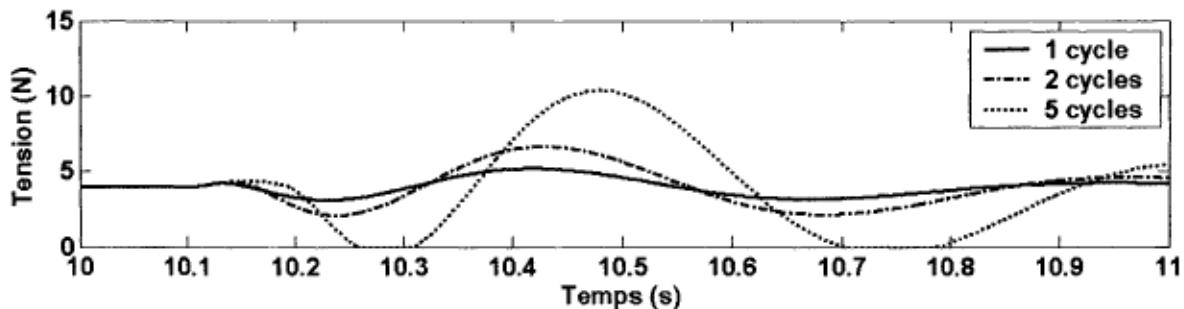


Figure 4.6 : Réponse en effort de tension pour la structure classique incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

La figure 4.6 démontre clairement que le simple ajout de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension améliore l'efficacité du système pendant une perturbation électrique (c.f. Fig. 4.2). En effet, pour un creux de tension d'une durée de 5 cycles, la variation de l'effort de tension est passée de 87 N à 11 N, ce qui correspond à la variation observée à l'apparition d'un creux de tension d'une durée de 2 cycles pour la structure classique. Notons qu'avec la modification apportée, nous observons une variation de l'effort de tension qui n'était pas présente dans la structure classique pour un creux de tension d'une durée de 1 cycle. Ceci met en évidence une limitation de la stratégie proposée qui pourrait être modifiée pour éviter les déclenchements prématurés ou contre-productifs. En effet, pour un creux de tension plus court que le temps requis pour que la tension du bus cc décroisse en dessous de la force contre-électromotrice équivalente des moteurs, le système réussit à traverser le creux de tension sans effet important. C'est le cas ici puisque la vitesse d'opération est relativement faible.

Regardons maintenant quels autres avantages, en plus de la plus grande stabilité du procédé, apporte la stratégie de gestion proposée. La figure 4.7 présente les variations de vitesse de l'étage de pinçage pour un creux de tension de 5 cycles avec et sans la stratégie de désensibilisation aux creux de tension. Il est à noter que la vitesse de l'enrouleur n'a pas été présentée puisque sa variation est faible considérant son inertie plus élevée.

De son côté, la figure 4.8 présente les variations du courant de ligne pendant les perturbations sur l'alimentation électrique, pour un creux de 5 cycles avec et sans la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

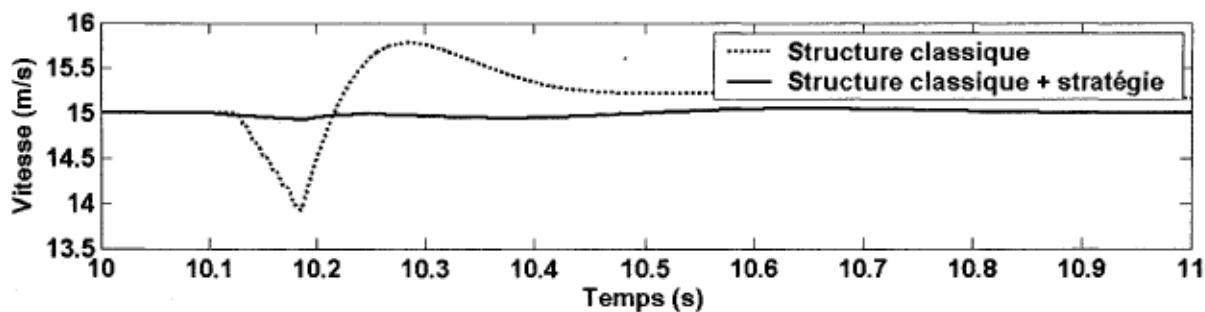


Figure 4.7 : Vitesse de l'étage de pinçage pour la structure classique (creux de 5 cycles).

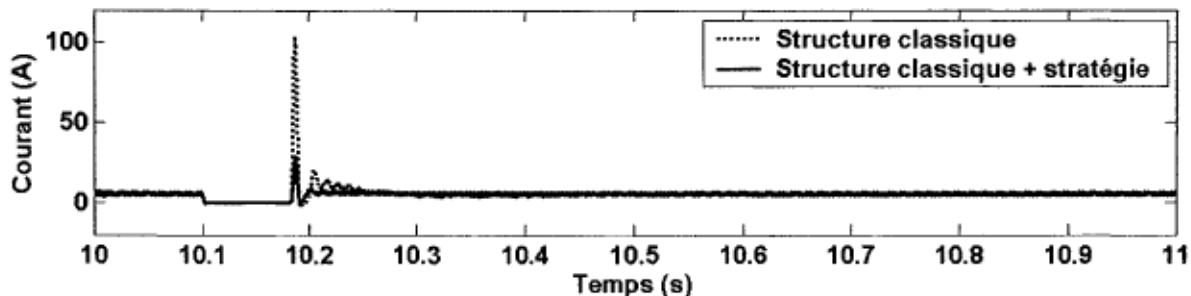


Figure 4.8 : Courant de ligne pour la structure classique (creux de 5 cycles).

Lorsque la stratégie de désensibilisation aux creux de tension est présente dans le système, nous remarquons une diminution de la variation de vitesse pour le moteur de l'étage de pinçage. Ceci est causé par l'élimination des commandes erronées données par les contrôleurs à flux orienté pendant les perturbations. Ainsi, le moteur tourne en roue libre au lieu de subir des demandes de freinage non contrôlées de la part du contrôleur.

De plus, lorsque la stratégie de désensibilisation aux creux de tension est présente dans le système, nous remarquons une importante réduction de l'appel de courant par les moteurs à induction au moment où la tension de l'alimentation électrique revient à la normale (10,183 s). Cette amélioration est principalement causée par l'élimination de la divergence des contrôleurs de vitesse durant les perturbations sur l'alimentation électrique, demandant alors un effort moindre des moteurs. De plus, l'avantage est également dû à l'attente de l'atteinte d'un niveau de tension acceptable sur le bus cc avant de réactiver les consignes de vitesses désirées. Ainsi, les moteurs pourront accélérer de nouveau sous un régime normal d'opération.

Comme nous le voyons, la stratégie de désensibilisation aux creux de tension possède plusieurs avantages. Cependant, pour des creux de tensions supérieur à 5 cycles, même cette stratégie ne peut contrer leurs effets néfastes. C'est pourquoi il devient nécessaire d'introduire un élément dans le système capable d'effectuer un contrôle de l'effort de tension plus rapidement, même en présence d'un creux de tension. Par conséquent, dans les prochaines sections, nous observerons d'abord les effets du simple ajout d'un rouleau danseur actif dans la structure du système de bobinage. Puis, nous considérerons l'ajout de la stratégie de désensibilisation aux creux de tensions à ce nouveau modèle.

### 4.3 Système de bobinage avec rouleau danseur actif

La structure du système de bobinage proposée telle qu'illustrée aux figures 3.1 et 3.2 comprend un étage de pinçage, un rouleau danseur actif et un enrouleur. Le schéma général du modèle Simulink est présenté à la figure 4.9. Il est à noter que le modèle du rouleau danseur actif et de ses contrôleurs est présent en couleur cyan en bas à droite du schéma.

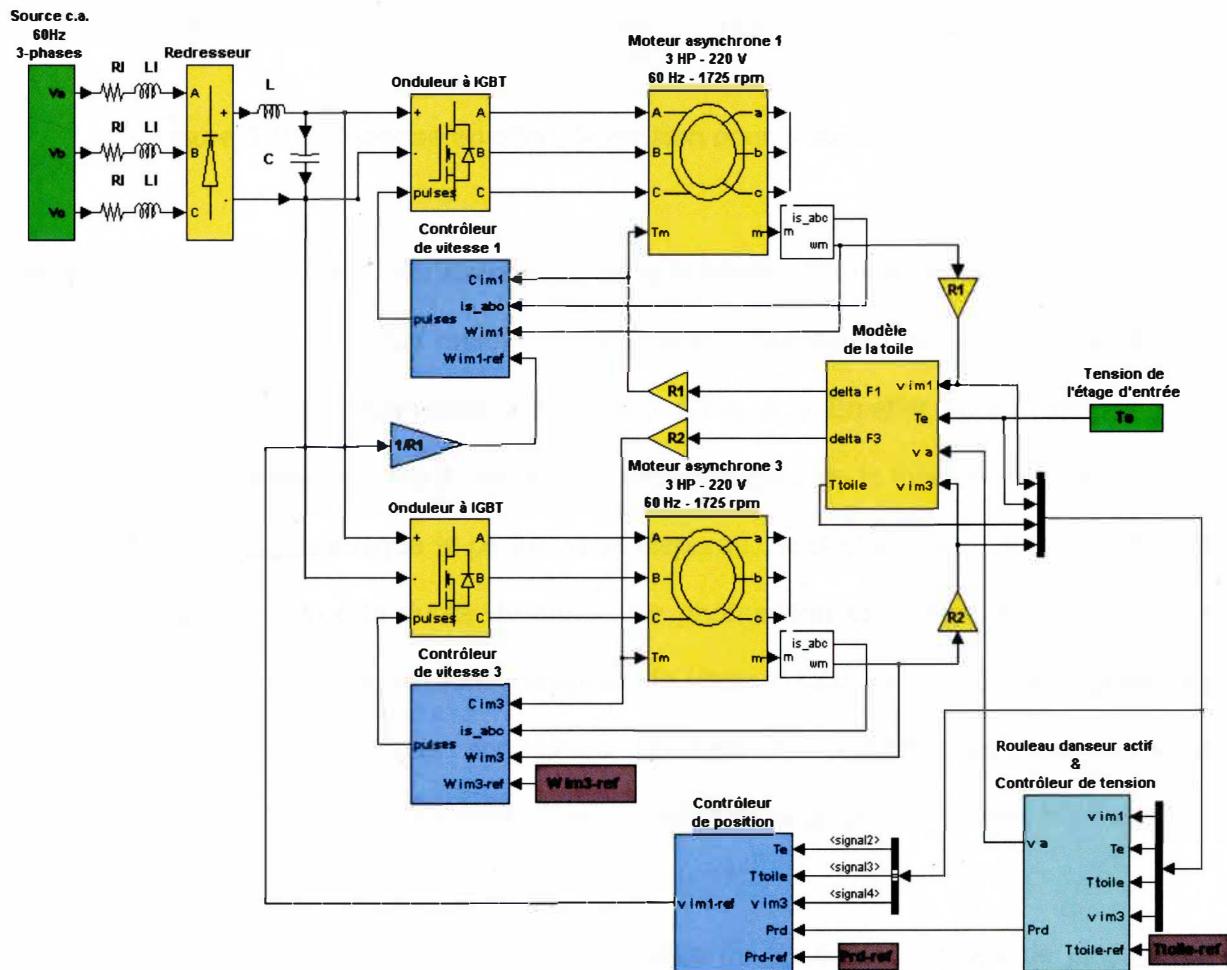


Figure 4.9 : Modèle Simulink du système de bobinage proposé.

Pour la simulation, nous avons utilisé les mêmes paramètres que dans le cas du bobineur classique, à l'exception des durées des creux de tension appliqués. En effet, nous avons

introduit des perturbations de 2, 5 et 10 cycles. La figure 4.10 présente le graphique de la variation de l'effort de tension dans le matériau pour ces différentes durées de la perturbation.

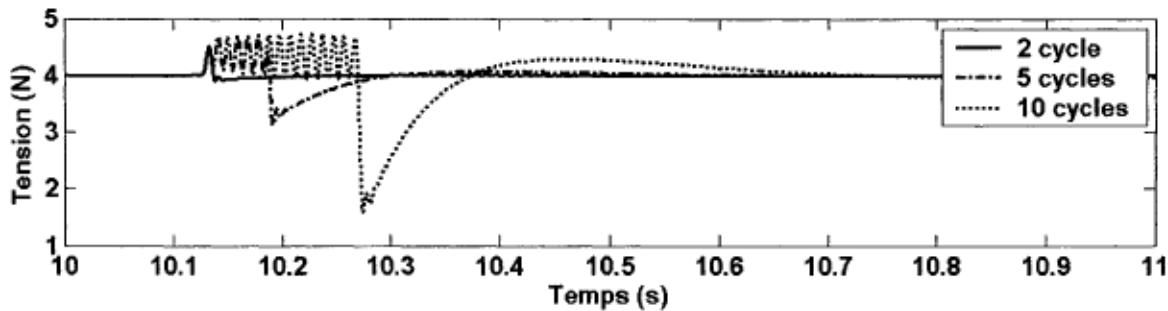


Figure 4.10 : Réponse en effort de tension pour la structure proposée.

La figure 4.10 nous permet de constater qu'avec la nouvelle structure physique du système de bobinage, soit l'incorporation d'un rouleau danseur actif, nous obtenons une nette amélioration de la réponse en effort de tension dans le procédé (c.f. Fig. 4.2). En effet, pour toutes les durées de creux de tension appliqués, nous notons une faible variation de la tension mécanique variant de 4 à 4.7 N. Cependant, lorsque la perturbation disparaît, nous observons une chute de cette tension qui s'intensifie avec la durée du creux. Ce phénomène est principalement causé par l'incapacité des moteurs à suivre leurs consignes de vitesse. Ceci provoque une augmentation de l'erreur accumulée dans les contrôleurs pendant les perturbations, entraînant une surcompensation à la reprise, d'où l'utilité d'une stratégie de gestion du système.

La figure 4.11 illustre la vitesse de défilement linéaire du matériau à l'étage de pinçage et à l'enrouleur, pour un creux de 5 cycles. En comparaison avec la structure de bobinage classique (c.f. Fig. 4.4), la reprise de la vitesse à la disparition du creux de tension s'effectue plus rapidement. Cependant, nous notons toujours la décélération incontrôlée du moteur de l'étage

de pinçage par le mauvais fonctionnement de l'estimateur de son contrôleur à flux orienté. Ce phénomène présente une fois de plus l'utilité d'une stratégie de gestion du système.

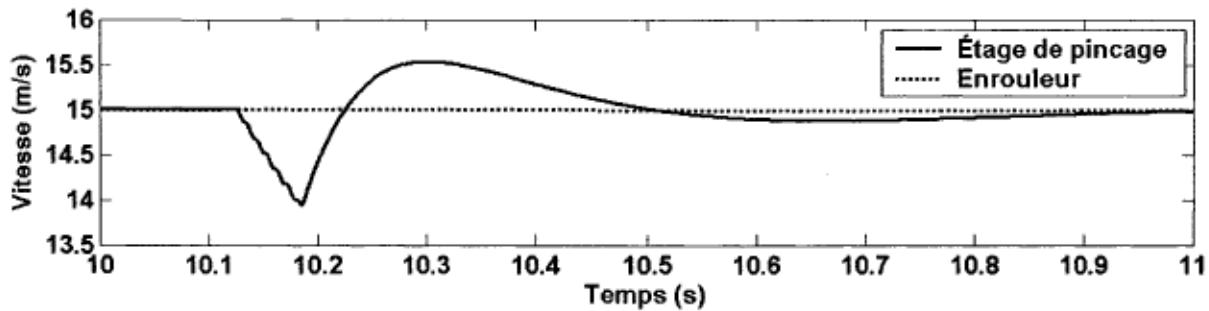


Figure 4.11 : Vitesse des moteurs pour la structure proposée (creux de 5 cycles).

Comme les figures précédentes le démontrent, l'incorporation d'un rouleau danseur actif dans la structure physique d'un système de bobinage possède plusieurs avantages. En effet, cet élément permet d'augmenter la rapidité de la boucle de régulation de l'effort de tension tout en étant moins sensible aux creux de tension. Puis, il se veut facilement intégrable aux structures de bobinages déjà existantes. Enfin, il représente une valeur ajoutée au système en compensant les perturbations périodiques dues à la déformation des rouleaux [Pagilla-03] ou en l'utilisant comme élément perturbateur lors de tests ou pour l'identification de paramètres, par exemple.

Cependant, certains phénomènes indésirables apparaissent encore dans les résultats de simulations. Bien qu'il ne soit pas possible de les contrôler par le rouleau danseur actif, il a été démontré dans la section précédente qu'ils peuvent être inhibés par la stratégie de désensibilisation aux creux de tension. C'est pourquoi dans la section suivante, nous incorporerons l'ensemble des propositions au système de bobinage classique, soient l'implantation du rouleau danseur actif ainsi que l'ajout de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension, afin de valider l'objectif de désensibilisation globale du système de bobinage.

## 4.4 Système de bobinage avec rouleau danseur actif et stratégie de désensibilisation aux creux de tension

Le schéma général du modèle Simulink présenté à la figure 4.12 expose le système de bobinage proposé incluant le rouleau danseur actif et la stratégie de désensibilisation aux creux de tension. Le rouleau danseur et ses contrôleurs sont présentés dans le bloc de couleur cyan et les blocs de la stratégie de commande sont identifiés en orange.

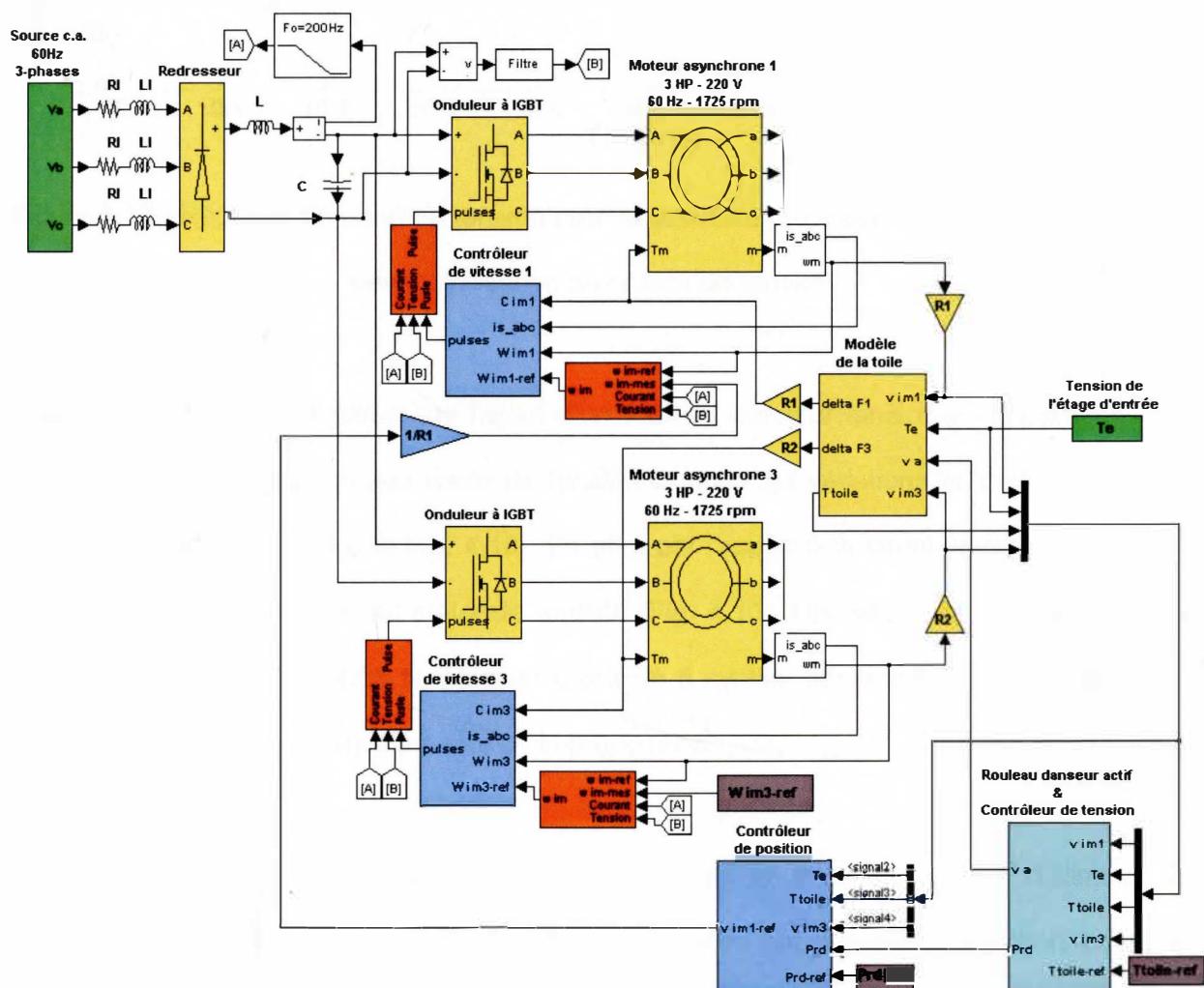


Figure 4.12 : Modèle Simulink du système de bobinage proposé incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

Pour la simulation, nous avons utilisé les mêmes paramètres que dans le cas de la structure de bobineuse proposée. En effet, nous avons introduit des perturbations de 2, 5 et 10 cycles. La figure 4.13 présente le graphique de la variation de l'effort de tension dans le matériau pour ces différentes durées de la perturbation.

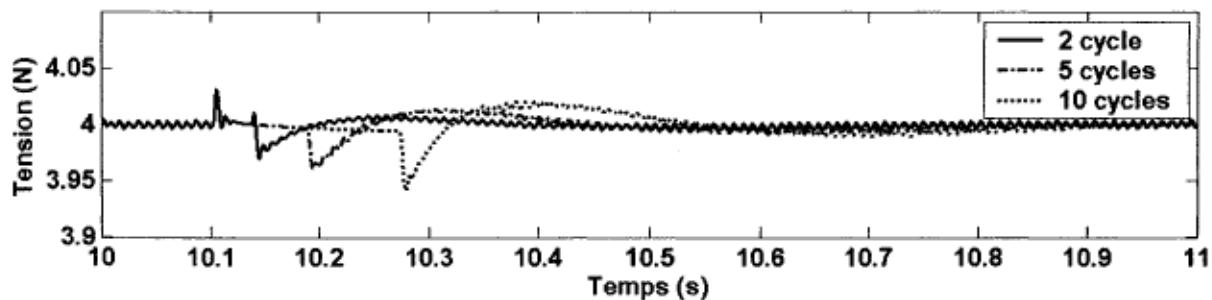


Figure 4.13 : Réponse en effort de tension pour la structure proposée incluant la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

La figure 4.13 permet d'illustrer que l'ajout d'un rouleau danseur ainsi que l'application de la stratégie de désensibilisation aux creux de tension diminue les variations de l'effort de tension dans le matériau (c.f. Fig. 4.6 et Fig. 4.10). En effet par rapport à la structure proposée sans la stratégie de désensibilisation au creux de tension (Fig. 4.10), l'amplitude de l'effort de tension mesuré passe de 4.7 N à 4.05 N, pour un creux de 5 cycles, démontrant une fois de plus le grand potentiel de chacun des éléments de la proposition.

De plus, la figure 4.13 démontre que l'application de la stratégie permet d'éliminer les oscillations pendant les perturbations, qui sont provoquées par le mauvais fonctionnement de l'observateur tout en diminuant les chutes de l'effort de tension à la reprise (Fig. 4.10). Nous pouvons également observer cette élimination des oscillations sur la figure 4.14 qui présente la vitesse de l'étage de pinçage pendant les perturbations sur l'alimentation électrique, pour un

creux de 5 cycles avec et sans la stratégie de désensibilisation aux creux de tension. Ainsi, il est possible de constater que lorsque le moteur tourne en roue libre (avec la stratégie), il n'est plus influencé par le mauvais fonctionnement de l'observateur.

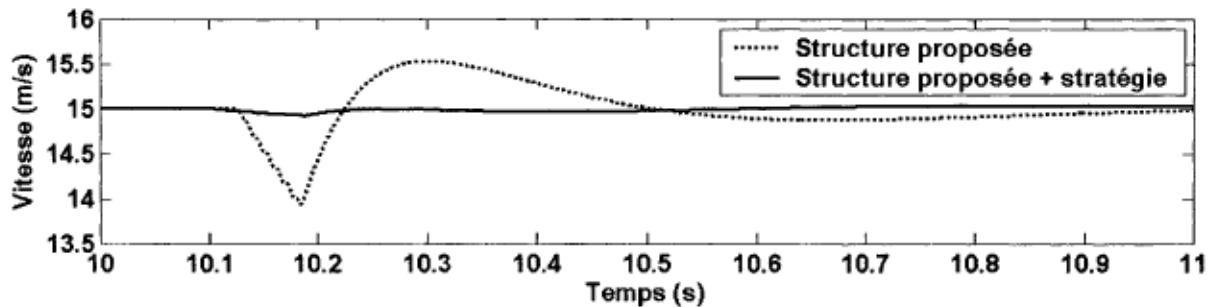


Figure 4.14 : Vitesse de l'étage de pinçage pour la structure proposée (creux de 5 cycles).

La figure 4.15 présente les variations du courant de ligne pendant les perturbations sur l'alimentation électrique, pour un creux de 5 cycles avec et sans la stratégie de désensibilisation aux creux de tension. Elle démontre que l'ajout de l'actionneur n'a aucun effet sur la diminution des appels de courant puisque les résultats obtenus sont identiques à ceux du système de bobinage classique avec et sans la stratégie (figure 4.8). C'est donc la stratégie de désensibilisation aux creux de tension qui effectue ce travail de réduction de l'appel de courant par les moteurs à induction.

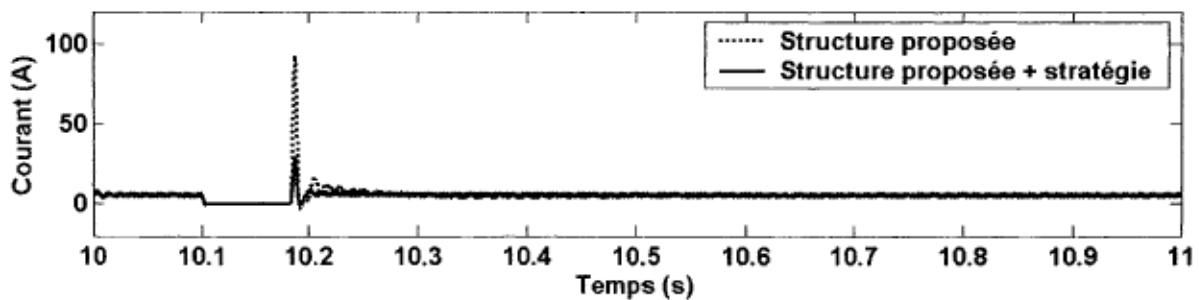


Figure 4.15 : Courant de ligne pour la structure proposée (creux de 5 cycles).

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents résultats de simulation pour les modèles développés dans les chapitres 2 et 3. Ainsi, nous avons présenté les réponses face aux perturbations pour le système de bobinage classique avec et sans la stratégie de désensibilisation aux creux de tension ainsi que le système de bobinage incorporant le rouleau danseur actif avec et sans la stratégie de désensibilisation aux creux de tension.

Les résultats démontrent que la stratégie de désensibilisation permet de réduire les variations et les oscillations de l'effort de tension dans le matériau tout en diminuant les appels de courants par les moteurs à induction à la disparition de la perturbation. Ceci permet également de maintenir le procédé opérationnel pour de plus longues durées de perturbations.

De plus, les résultats démontrent que l'ajout d'un rouleau danseur actif dans la structure des systèmes de bobinage permet de réduire grandement les variations de l'effort de tension du matériau pour le maintenir presque constant et ce, pour des perturbations de longue durée. L'actionneur permet également de maintenir le procédé opérationnel pour de plus longue durée de perturbations.

Enfin, les résultats de simulation démontrent que l'application simultanée des deux propositions sur la structure classique de bobinage permet la rencontre de l'objectif de désensibilisation aux creux de tension puisque le nouveau système obtenu n'est pratiquement plus perturbé. Donc, le procédé peut alors demeurer opérationnel, même en présence d'un creux de tension important sur l'alimentation électrique, enrayant ainsi les pertes et arrêts de production préalablement causés par ces perturbations.

# ***Chapitre 5***

## ***Architecture du banc d'essais expérimental***

Jusqu'à présent ce travail a permis d'élaborer différentes théories validées par des modèles de simulation. Afin de valider ces théories expérimentalement (ainsi que plusieurs autres développées au sein du groupe de recherche), le laboratoire se dotera d'un banc d'essais expérimental représentatif d'un système multimoteur. Ce système sera composé de nombreux éléments physiques et/ou virtuels. Il devient alors nécessaire de bâtir une architecture informatique adéquate pour en effectuer la gestion. C'est pourquoi, le présent chapitre porte sur l'architecture informatique du système de gestion du banc d'essais expérimental, basée sur le concept des machines intelligentes.

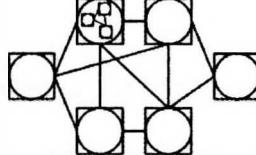
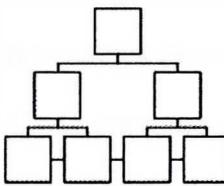
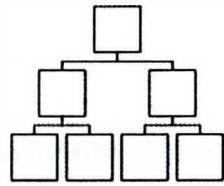
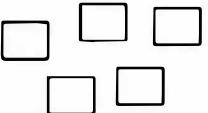
L'organe principal de cette architecture est la plate-forme temps réel RT-LAB. En effet, cet élément a notamment été choisi pour sa capacité d'opérer en temps réel tout en intégrant des éléments physiques à des éléments virtuels (voir l'annexe G pour plus de détails).

## 5.1 Architectures de gestion intelligente

Dans la littérature, différentes architectures de gestion intelligente sont présentées. Le tableau 5.1 expose les principales structures qui seront étudiées.

TABLEAU 5.1

Structures de gestion intelligentes [Stylos-00]

Architectures	Cadre de modélisation	Structures
Adaptable	Intelligent <i>Cinétique</i> : <i>HMS, RCS4</i>	Agile : Holonique, Hybride 
Interopérable	Distribué <i>Orienté objet</i> : <i>UML, Ontology, DAI</i>	Distribuée 
Visible	Intégré <i>Systémique</i> : <i>CIMOSA, GERAM, SAGACE</i>	Hiérarchique modifiée 
Rigide	Hiérarchique <i>Cartésien</i> <i>SADT, IDEF, RCS3</i>	Hiérarchique 
Fragmentée Îlotée	Fragmenté Aucun	Aucun 

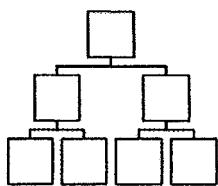
Regardons maintenant plus en détail chacune de ces structures, tout en exposant leurs avantages et inconvénients.

- Structure interopérable



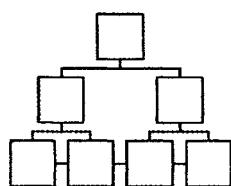
La structure distribuée est une architecture interopérable. Donc, elle permet aux divers composants du système de communiquer ou de fonctionner avec un autre élément. Bien que cette architecture soit la plus facile à configurer, elle reste néanmoins décentralisée. Ce qui implique une difficulté dans l'optimisation du système. C'est pourquoi elle est peu utilisée dans l'industrie.

- Structure rigide



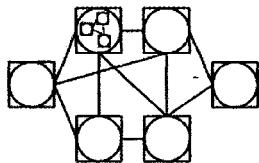
La structure hiérarchique est une architecture rigide. Donc, elle permet à chaque élément (parent) de contrôler ou de communiquer avec un sous élément (enfant). Chaque enfant ne possède qu'un seul parent et il peut à son tour posséder plusieurs enfants. Alors, cette architecture nous permet d'obtenir une bonne simplicité, tout en assurant des performances élevées. Elle est très présente en industrie. Cependant, elle demeure rigide et peu flexible.

- Structure visible



La structure hiérarchique modifiée est une architecture visible. En fait, elle est une structure hybride entre les architectures hiérarchique et distribuée. Ainsi, nous obtenons une structure plus souple et flexible, tout en conservant la simplicité de la structure hiérarchique. C'est pourquoi elle est l'une des structures les plus retrouvées en industrie.

- Structure adaptable



La structure holonique est une architecture adaptable. Elle émerge du principe qu'un système complexe évoluera plus rapidement en le subdivisant en systèmes, entités, intermédiaires plus simples. Donc, chaque élément du système, un holon, possède une certaine autorégulation ou autonomie. Malgré sa complexité, cette architecture est la plus adaptable et flexible. Puisqu'il s'agit d'une architecture récente, elle est peu appliquée en industrie.

## 5.2 Théorie des machines intelligentes

Parmi toutes les architectures décrites précédemment, la structure hiérarchique et la structure hiérarchique modifiée sont celles que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature et dans l'industrie [Stylos-00]. Un des principaux auteurs utilisant cette architecture est G.N. Saridis, qui a développé la « Théorie des machines intelligentes » vers la fin des années 70 [Saridis-96, Saridis-98]. Plusieurs autres auteurs ont élaboré et publié des théories découlant de celle de Saridis et donc, d'une architecture hiérarchique [Albus-91, Antsaklis-96, Passino-96, Zimmermann-96]. Le principe de cette structure est de décomposer le système de gestion en plusieurs couches distinctes. Ceci permet de décomposer le système selon le principe suivant : lorsque le niveau de précision augmente, le niveau d'intelligence requis diminue et lorsque le niveau d'intelligence augmente, le niveau de précision diminue. La principale différence existant entre les diverses théories se situe au niveau du nombre de couches de décomposition du système. Ainsi, nous nous attarderons sur le concept de base développé par Saridis.

La « Théorie de machines intelligentes » telle que développée par Saridis, stipule que le système est divisé en trois niveaux : l'organisation, la coordination et l'exécution (Figure 5.1 [Saridis-98]).

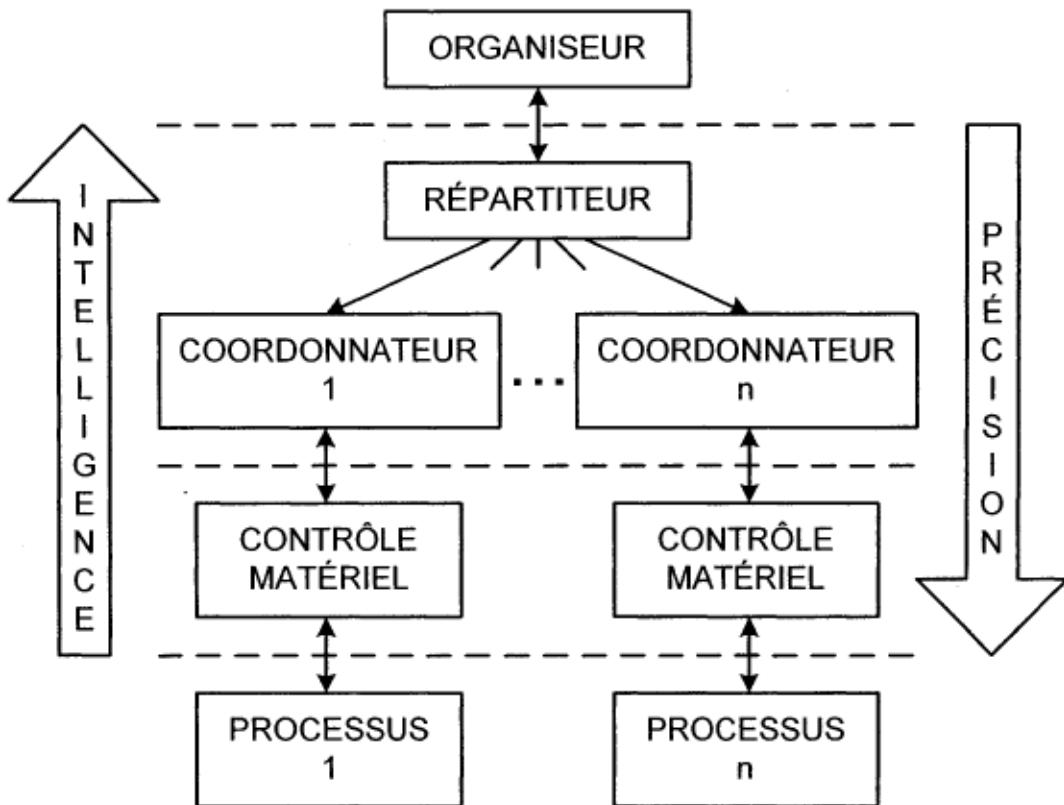


Figure 5.1 : Théorie des machines intelligentes.

Ainsi, le niveau d'organisation est le premier niveau de la hiérarchie. Il permet d'échanger des données avec l'opérateur du système, pour ensuite prendre les décisions qui s'imposent. Il effectue alors la gestion du système. Au second niveau, un répartiteur distribue les différentes tâches à accomplir à leurs coordonnateurs respectifs. Ces derniers génèrent les consignes pour le niveau d'exécution, qui devient alors le troisième et dernier niveau de l'architecture hiérarchique. Conséquemment, nous constatons que plus nous nous situons à un niveau élevé de la structure, plus l'intelligence et l'importance des décisions sont élevées, mais plus la

décision prise sera de nature générale. De la même manière, lorsque nous nous dirigeons vers les niveaux inférieurs de la structure hiérarchique, moins l'intelligence et la complexité des opérations sont importantes, mais plus la tâche à accomplir est précise et dédiée.

### 5.3 Architecture du banc d'essais

Pour l'élaboration de l'architecture du système de gestion du banc d'essais expérimental, nous proposons d'utiliser le modèle de la « Théorie des machines intelligentes » tel que défini dans la section précédente. La figure 5.2 présente le schéma de la structure hiérarchique des trois niveaux ainsi obtenus.

Situé au niveau supérieur, le gestionnaire échange des données et des commandes avec l'usager et avec le niveau inférieur, le niveau de coordination. Ce dernier génère les signaux de consignes du système et gère l'acquisition des données et le transfert des données pour l'affichage des résultats au niveau supérieur. Le dernier niveau, l'exécution, permet l'utilisation de deux modèles différents : le système physique ou le modèle virtuel du banc d'essais.

Alors, comme mentionné précédemment, les architectures hiérarchiques possèdent les avantages suivants : elles sont simples d'utilisation, modulaires ainsi que flexibles pour s'adapter aux changements. C'est pourquoi une structure hiérarchique définie selon le modèle de la « Théorie des machines intelligentes » est une excellente avenue pour la création du système de gestion et de commande du banc d'essais multimoteur.

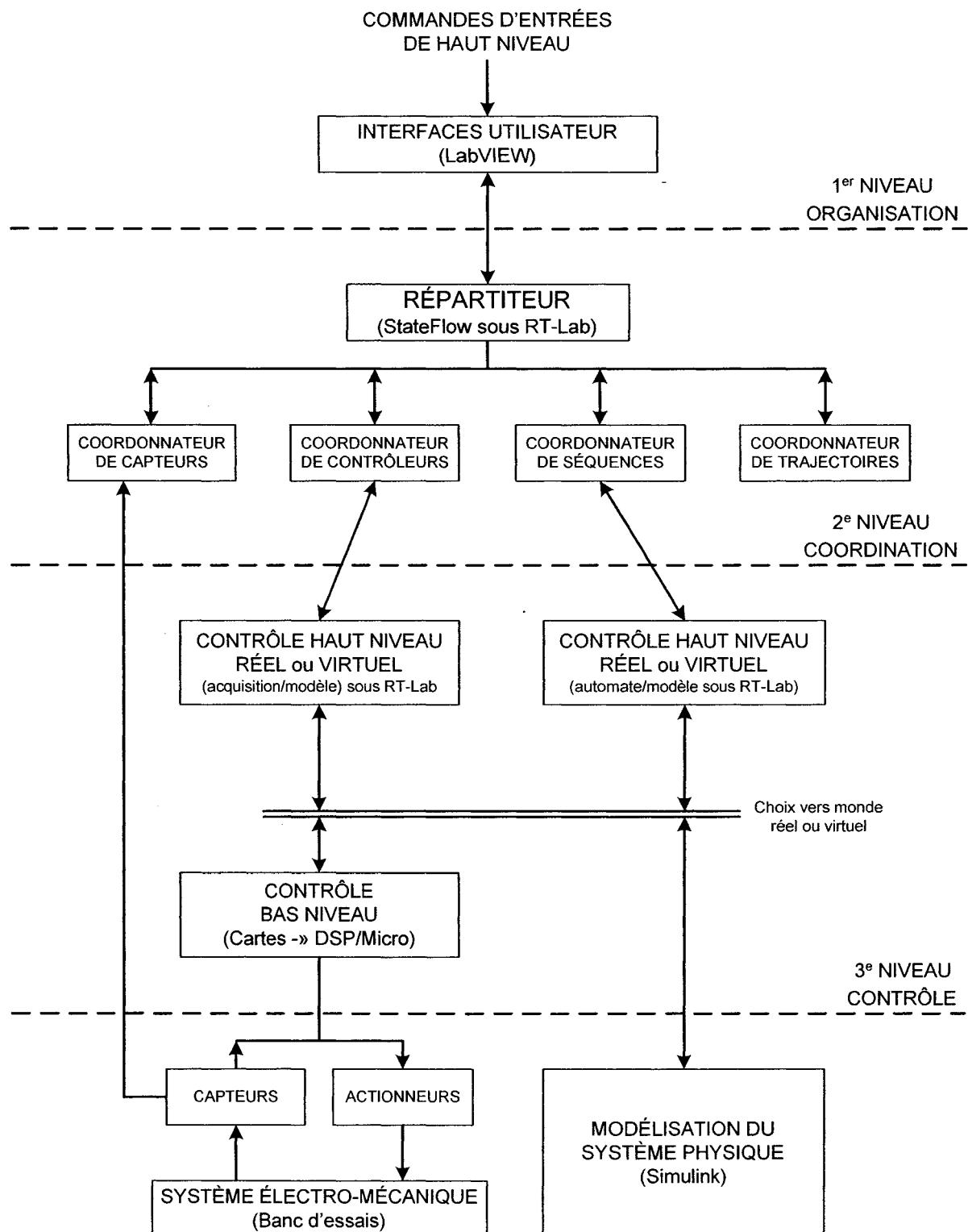


Figure 5.2 : Architecture hiérarchique du banc d'essais.

### 5.3.1 Interface utilisateur

La première étape de la conception de l'architecture du banc d'essais expérimental consiste à définir l'interface utilisateur du système, elle fait partie du plus haut niveau de l'architecture hiérarchique, le niveau d'organisation. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel de programmation graphique LabVIEW, qui permet un développement graphique simple et puissant pour les applications de test, de mesure et de contrôle. La figure 5.3 présente une ébauche de l'interface utilisateur principale appliquée au système de bobinage avec rouleau danseur actif tel que proposé au cours du chapitre 3. Cette interface découle d'un projet de fin d'études réalisé sous ma supervision [Futch-05].

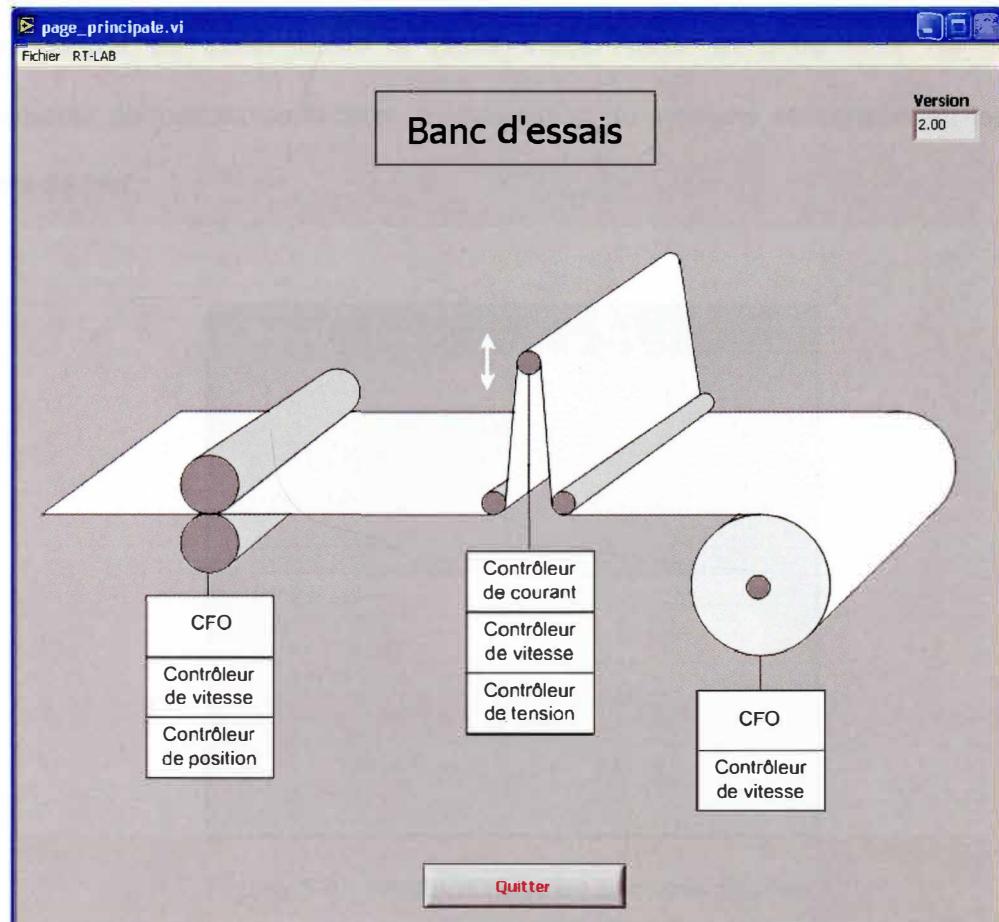


Figure 5.3 : Interface utilisateur principale.

À l'aide de cette interface, il est possible de spécifier tous les paramètres physiques de notre système. À l'aide d'un simple clic sur l'élément du système désiré, soient les sections de toiles, les entraînements ainsi que les contrôleurs, nous pouvons définir leurs variables spécifiques. Les figures 5.4 à 5.6 présentent les différentes interfaces qui seront alors affichées. Toutes ces interfaces sont des programmes indépendants appelés par le programme principal. Cette méthode permet d'augmenter la modularité et la flexibilité du niveau d'organisation de l'architecture.

Ainsi, à l'aide de ces trois sous-programmes, nous pouvons définir l'ensemble des variables de notre système. De son côté, l'interface utilisateur principale permet d'ouvrir une configuration existante sous la forme d'un fichier « .xls » et de le modifier pour l'enregistrer à nouveau. De plus, elle permet de sauvegarder la configuration sous un autre nom de fichier. Ces enregistrements permettent de faciliter la réutilisation du système en conservant les différents paramètres de test.



Figure 5.4 : Interface pour les sections de toile.

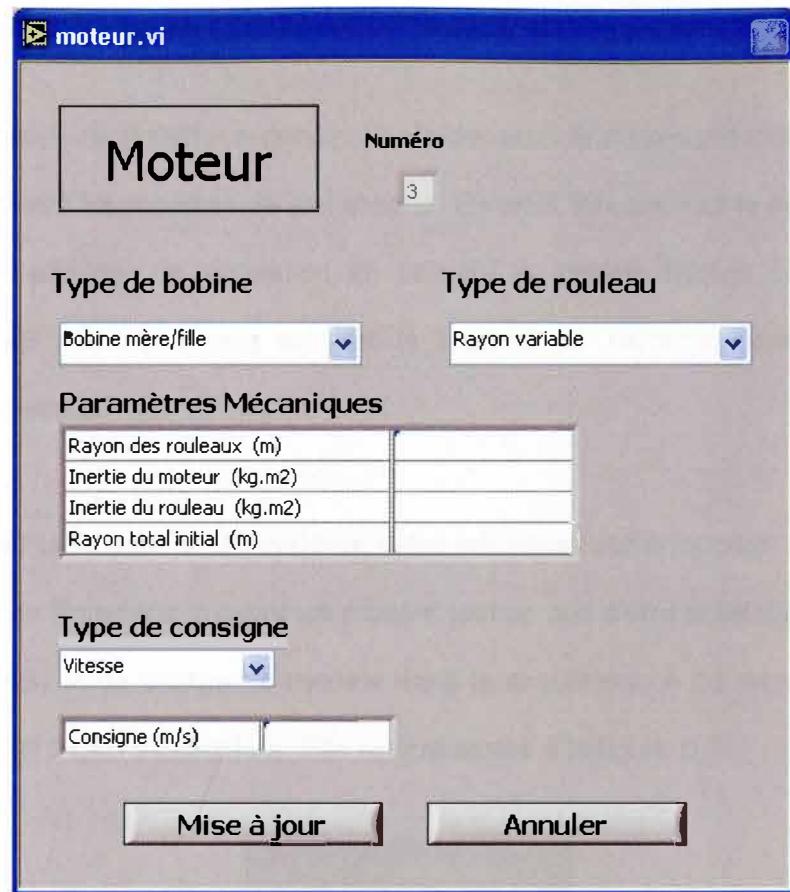


Figure 5.5 : Interface pour les entraînements.

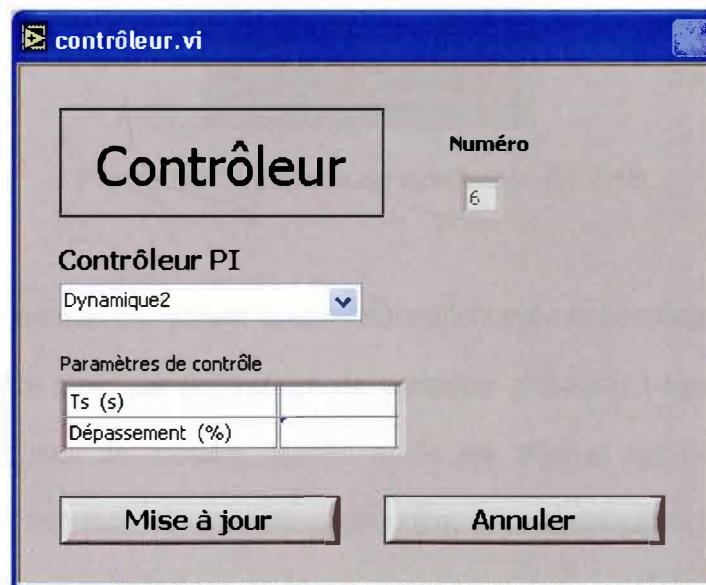


Figure 5.6 : Interface pour les contrôleurs.

### 5.3.2 Communication entre l'interface utilisateur et le système RT-LAB

La seconde propriété de l'interface principale réside dans la communication avec le système RT-LAB qui exécutera les modèles de simulations. En effet, lorsque tout le système est défini, il est possible d'en effectuer la simulation en utilisant le modèle Matlab correspondant et le simulateur RT-LAB. Ce simulateur requiert le respect de certaines conventions qui sont présentées en annexe G.

Alors, pour réaliser la simulation du système défini par l'interface principale, il suffit d'aller dans le menu RT-LAB de l'interface, d'ouvrir un modèle (qui se doit d'être préalablement compilé par le système RT-LAB) et de charger le modèle dans le simulateur. À ce moment, une interface pour le simulateur RT-LAB s'exécutera. Elle est présentée à la figure 5.7.



Figure 5.7 : Interface du simulateur RT-LAB.

Ainsi, cette interface permet de réaliser la communication avec le simulateur et de visualiser son état en temps réel. De plus, par l'entremise de variables globales, il devient alors possible de prendre tous les signaux de mesure désirés et de les afficher sur l'interface principale du système ou sur une interface de mesure appropriée. L'interface utilisateur, les interfaces de configuration du système et l'interface de communication avec le système RT-LAB constituent le niveau d'organisation de l'architecture du banc d'essais expérimental.

## 5.4 Validation du niveau organisationnel de l'architecture

La validation de la conception du premier niveau de l'architecture du banc d'essais expérimental, soit le niveau d'organisation, est réalisée dans cette section. En effet des simulations à l'aide de l'interface utilisateur développée sous LabVIEW et le simulateur RT-LAB sont présentées. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle du système de bobinage avec rouleau danseur actif développé dans le chapitre 3.2. Cependant, afin de pouvoir exécuter ce modèle qui contient des éléments de la librairie SimPowerSystems, nous avons utilisé l'outil ARTEMIS (*Advanced Real-Time Electro-Mechanical Transient Simulator*). Ce logiciel est une suite d'algorithmes et de méthodes qui optimisent les modèles de systèmes électromécaniques créés dans Simulink à l'aide de SimPowerSystems, en les adaptant pour être exécutés en temps réel. Davantage de détails sur cet outil sont présentés en annexe G. Outre l'intégration de l'outil de simulation ARTEMIS dans le modèle, ce dernier a été modifié conformément aux exigences du simulateur pour la simulation distribuée (c.f. annexe G). Les figures 5.8 à 5.10 présentent le modèle Simulink ainsi obtenu.

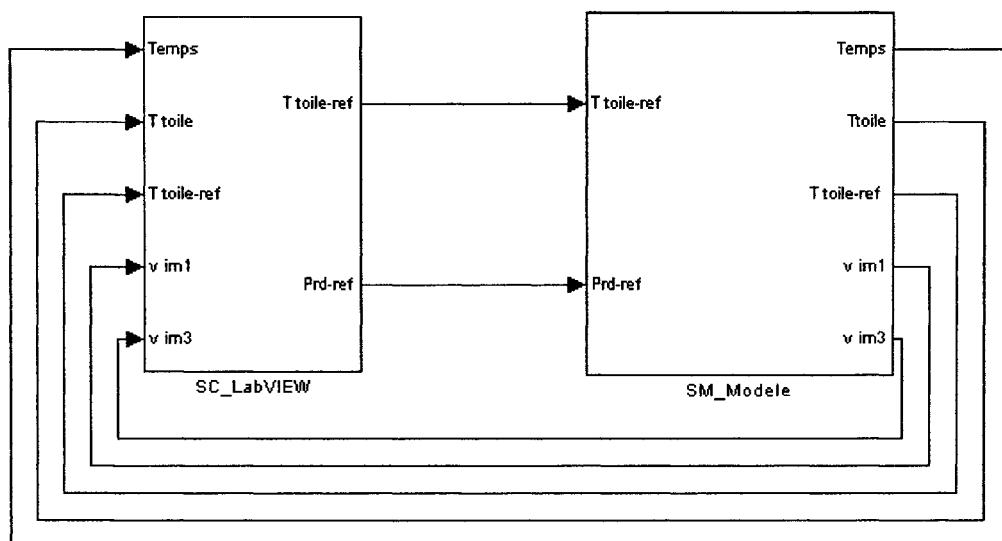


Figure 5.8 : Modèle discret.

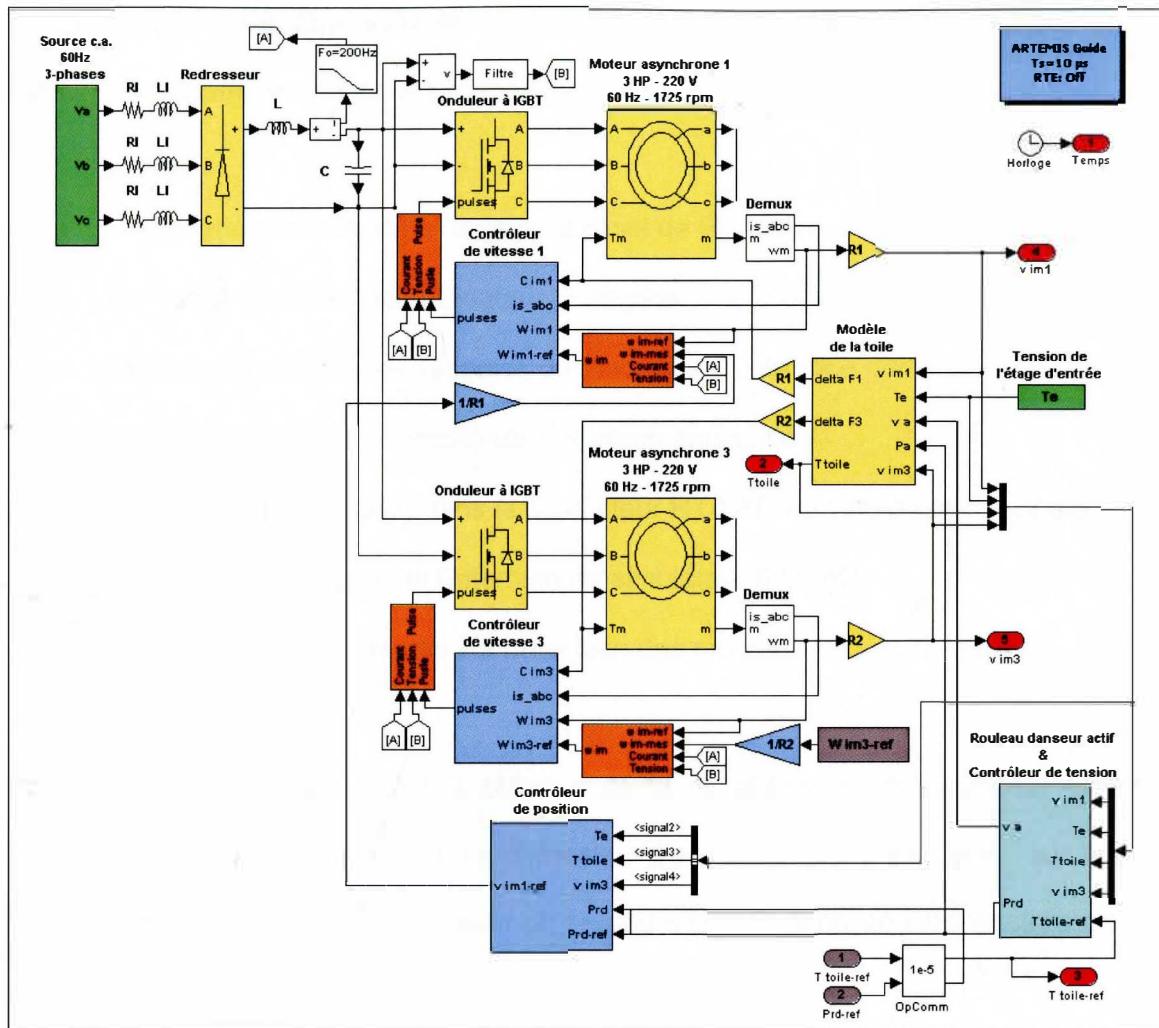


Figure 5.9 : Modèle discret – SM\_Model.

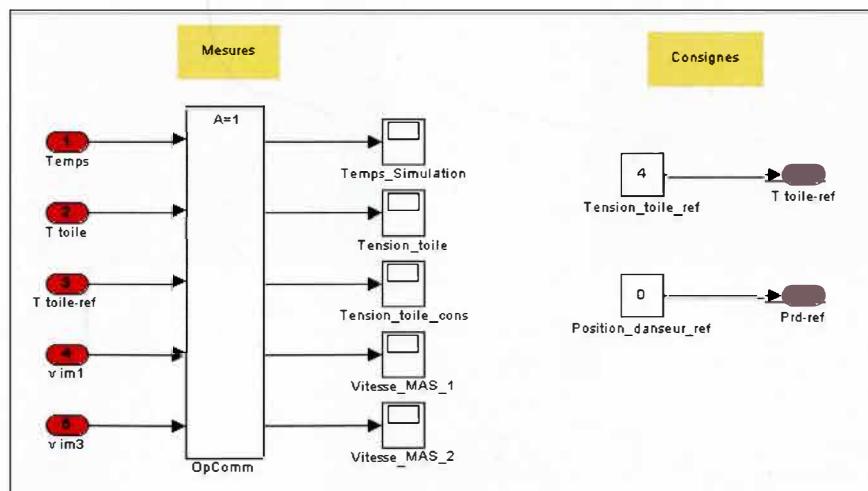


Figure 5.10 : Modèle discret – SC\_LabVIEW.

Ainsi, ce modèle peut être exécuté sur le simulateur RT-LAB tout en utilisant l'interface utilisateur développée en suivant les étapes suivantes :

- Compilation du modèle à l'aide du logiciel de RT-LAB;
- Exécution de l'interface utilisateur principale;
- Définition de toutes les variables du modèle via l'interface principale;
- Sélection du modèle compilé via l'interface principale;
- Chargement du modèle dans le simulateur RT-LAB via l'interface principale;
- Exécution du modèle via l'interface du simulateur RT-LAB;
- Visualisation des mesures via l'interface des mesures (Figure 5.11).

La figure 5.11 présente les résultats obtenus de la simulation du modèle d'un système de bobinage avec rouleau danseur actif. Le processus d'exécution d'une simulation sur le système RT-LAB démontre le bon fonctionnement du niveau d'organisation de l'architecture de gestion du banc d'essais expérimental.

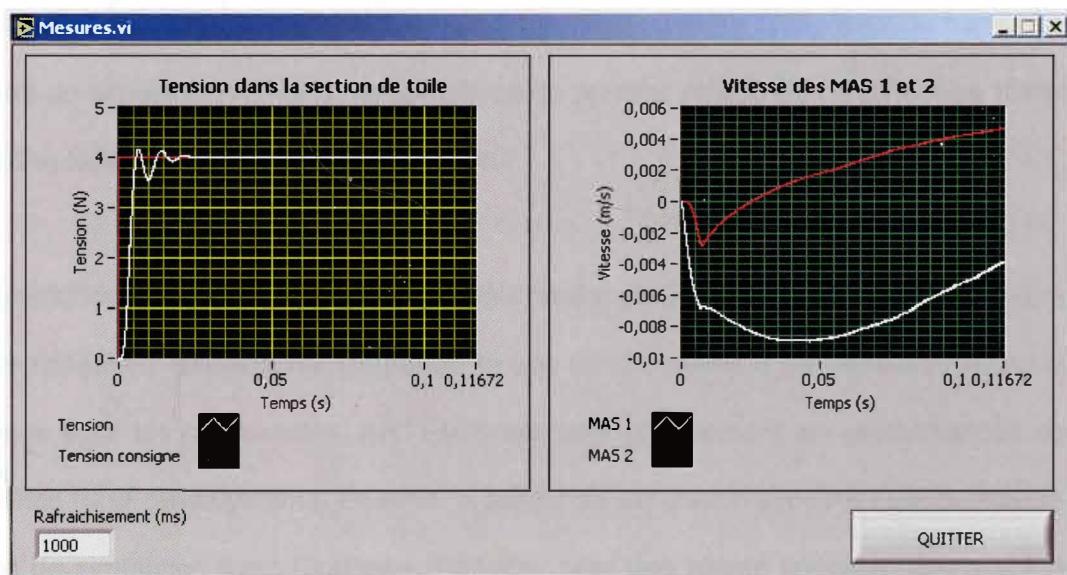


Figure 5.11 : Interface des mesures.

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la notion d'architecture de gestion intelligente en présentant les structures les plus rencontrées. Par la suite, nous avons présenté la « Théorie des machines intelligentes » telle que définie par Saridis. Cette structure hiérarchique permet de décomposer les systèmes de gestion en différents niveaux, en fonction des besoins de précision et d'intelligence. Cette théorie engendre des structures simples, modulaires et flexibles.

Nous avons ensuite proposé d'utiliser cette théorie pour l'élaboration de l'architecture d'un banc d'essais expérimental représentatif d'un système multimoteur. C'est pourquoi notre architecture se divise en trois niveaux; l'organisation, la coordination et le contrôle. Cette structure de gestion permettra de simuler des modèles développés et de les valider expérimentalement via le système RT-LAB. De plus, elle admettra facilement des ajouts et des modifications puisqu'elle se veut modulaire et flexible.

Par la suite, une interface utilisateur ainsi qu'un module de communication ont été développés sous LabVIEW. Ils permettent d'effectuer la communication entre l'utilisateur du banc d'essais et le système de simulation RT-LAB. Ils constituent le premier niveau de l'architecture hiérarchique du banc d'essais, soit le niveau d'organisation.

Enfin, l'exécution d'une simulation d'un modèle multimoteur sur le système RT-LAB à partir de l'interface utilisateur développée, démontre le bon fonctionnement de ce niveau d'organisation. Notons que pour les cas simulés, ARTEMIS améliore grandement les performances de calcul des modèles SimPowerSystems. En effet, le temps de simulation avec ARTEMIS était de 26.2% du temps de simulation avec SimPowerSystems, pour une même précision des résultats (effet des propriétés des algorithmes de simulation sous ARTEMIS).

# ***Chapitre 6***

## ***Conclusion générale***

Le maintien en synchronisme des différents moteurs d'un procédé de fabrication continu est un critère de fonctionnement primordial. Ces systèmes multimoteurs, par exemple les bobineuses, doivent rester opérationnels, même en présence d'une alimentation électrique perturbée. En effet, parmi les perturbations de l'alimentation électrique, les creux de tension sont considérés comme la principale cause de pertes et d'arrêts de production des procédés industriels. Plusieurs méthodes de compensation aux perturbations sont présentées dans la littérature. Cependant, elles ne peuvent que compenser les creux de tension de faible durée, ou représentent des solutions extrêmement coûteuses. C'est pourquoi il est justifié de concevoir un procédé multimoteur de transport en feuille capable d'être maintenu opérationnel, même en présence d'une alimentation électrique impropre ou perturbée.

Dans ce mémoire, nous avons présenté la modélisation d'un système multimoteur de transport en feuille continue, c'est-à-dire une bobineuse. De cette modélisation représentative de la structure classique de commande, nous avons démontré les effets néfastes qu'apporte

l'apparition d'un creux de tension sur le procédé. Ce modèle nous a servi de référence pour la justification des propositions exposées.

Ainsi, la première proposition consistait à désensibiliser le système de bobinage aux perturbations en incorporant un élément mécanique, appelé rouleau danseur actif, dans la structure du procédé. Les simulations du nouveau modèle ont permis de démontrer le grand apport de cet élément sur le maintien du procédé opérationnel durant une perturbation sur l'alimentation électrique. Il est à noter que cet élément n'est pas affecté par la perturbation puisqu'il s'agit d'un élément de faible puissance pouvant être alimenté par une source stable. Aussi, il peut facilement être incorporé dans les structures de bobinage existantes, tout en représentant une valeur ajoutée au procédé. En effet, le rouleau danseur actif peut être utilisé pour contrer des perturbations périodiques dues à la configuration mécanique du système, ou peut simplement injecter des perturbations commandées pour en observer les effets ou pour permettre l'identification de paramètres du système.

La seconde proposition consistait à incorporer une stratégie de désensibilisation aux creux de tension dans les algorithmes de commande du système de bobinage. En effet, cette stratégie peut être appliquée sur des contrôleurs existants, afin d'optimiser leur rendement pendant une perturbation électrique. Les résultats de simulation de l'application de la stratégie sur les deux modèles précédents démontrent qu'elle permet d'atténuer grandement les effets néfastes des creux de tension sur les procédés de fabrication continu. Ainsi, cette stratégie de désensibilisation aux creux de tension est également une solution à faible coût pouvant être appliquée aux structures de commande des systèmes de bobinage existants.

Les deux propositions de désensibilisation aux creux de tension d'un système de bobinage ont démontré leurs contributions par simulation. Ces méthodes peuvent être appliquées conjointement pour minimiser les effets des perturbations électriques. De plus, elles peuvent être appliquées à tout autre domaine où nous retrouvons des procédés multimoteurs de fabrication continue.

Par la suite, en vue de la validation expérimentale des propositions sur un banc d'essais multimoteur représentatif d'un système de bobinage, une architecture de gestion de ce banc a été proposée. En effet, l'architecture hiérarchique adoptée respecte la théorie des machines intelligentes qui permet de diviser le système en trois niveaux : l'organisation, la coordination et l'exécution. Ainsi, situé au niveau supérieur, le niveau d'organisation échange des données et des commandes avec l'usager et avec le niveau de coordination. Ce dernier génère les signaux de consigne du système et gère l'acquisition des données par le niveau d'exécution.

Une section de ce mémoire présente une première ébauche de la réalisation du niveau d'organisation du système de gestion du banc d'essais multimoteur. Une interface utilisateur modulaire développée sous LabVIEW ainsi qu'un gestionnaire de communication entre cette dernière et le système de coordination (système RT-LAB) y sont présentés. L'exécution d'un modèle complet sur le simulateur a permis de démontrer la fonctionnalité du premier niveau de l'architecture.

Nous pouvons affirmer que ce travail a permis de développer une expertise au sein du laboratoire avec différents outils tels que la représentation énergétique macroscopique (REM) pour la modélisation des systèmes, la génération de trajectoires avec le module « S-Function Builder », l'utilisation de « StateFlow » pour l'élaboration d'un gestionnaire de haut niveau et

l'utilisation de LabVIEW comme interface utilisateur pour le simulateur temps réel « RT-LAB ». Également, ce travail a permis de réaliser deux articles de conférence [Thiffault-04, Thiffault-05].

En terminant, des recommandations concernant les versions futures de la stratégie de désensibilisation peuvent être faites. La première consiste à réaliser l'incorporation d'un gestionnaire de creux de tension. Ce dernier pourrait alors déterminer la structure de commande adéquate du système en fonction des conditions présentes. Ainsi, il pourrait commander l'asservissement de la tension sur bus courant continu par un contrôleur, durant une perturbation sur l'alimentation électrique, en récupérant l'énergie par les étages du système disposant d'une inertie élevée. Une étude sur cette proposition est présentée en annexe H. Cependant, il est à noter que même avec un asservissement de la tension sur le bus cc, sous un certain seuil de tension, l'estimateur de flux dans le contrôleur à flux orienté deviendrait tout de même erroné. Ceci pourrait provoquer une perte de contrôle de la machine. C'est pourquoi la modification de cet estimateur est également recommandée, afin qu'il puisse suivre correctement les paramètres de la machine pendant un creux de tension.

Finalement une recommandation concernant la plate-forme temps réel RT-LAB peut être mentionnée. Au cours de ce travail, le système RT-LAB a seulement été testé pour la simulation, compte tenu des équipements en place. Il reste donc à tester et à valider le bon fonctionnement de ce système avec le matériel physique du banc d'essais expérimental lorsque ce dernier sera à la disposition du laboratoire.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Albus-91] J. Albus, « Outline for a Theory of Intelligence », *IEEE Transactions on Systems and Cybernetics*, vol. 21, n°3, p. 473-509, mai/juin 1991.
- [Antsaklis-96] P.J. Antsaklis, M. Lemmon et J.A. Stiver, *Learning to be Autonomous : Intelligent Supervisory Control*, In : IEEE Neural Networks Council, *Intelligent Control Systems : Theory and Applications*, IEEE Press, Chapitre 2, 1996.
- [Arrillaga-00] J. Arrillaga, M.H.J. Bollen et N.R. Watson, « Power Quality Following Deregulation », *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, n°2, p. 246-261, février 2000.
- [Ba-Razzouk-97] A. Ba-Razzouk, *Étude et mise au point d'un module de simulation des systèmes d'entraînements à courant alternatif*, Rapport technique, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, Automne 1997.
- [Belchior-03] F.N. Belchior, J.C. Oliveira, P.C.A. Leão et O.C.N. Souto, « Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives – Computational Analysis », *IEEE ISIE'03 symposium*, vol. 2, p. 1032-1036, juin 2003.

- [Bollen-99] M.H.J. Bollen et R.A.A. de Graaff, « Behavior of AC and DC drives during voltage sags with phase-angle jump and three-phase unbalance », *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, p. 1225-1230, 1999.
- [Bouscayrol-00a] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J.P. Hautier, F. Meibody-tabar et M. Pietrzak-David, « Multi-Machine Multi-Converter Systems : Analysis of Coupling by a Global Modeling », *Proceedings of the IEEE IAS'00*, CD-ROM, octobre 2000.
- [Bouscayrol-00b] A. Bouscayrol, X. Guillaud, J.P. Hautier et P. Delarue, « Macro-modélisation pour les conversions électromécaniques : Application à la commande des machines électriques », *Revue Internationale de Génie Électrique*, vol. 3, n°2, juin 2000.
- [Bouscayrol-02] A. Bouscayrol et P. Delarue, « Simplifications of the Maximum Control Structure of a Wind Energy Conversion System With an Induction Generator », *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 4, n°2, p. 476-485, août 2002.
- [Djani-04] Y. Djani Wankam, *Modélisation et commande d'un étage d'un système de transport de bande comportant un actionneur linéaire*, Rapport de stage DESS-GR2E, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, 2004.

- [Duran-99] J. Duran-Gomez et P.N. Enjeti, B.O. Woo, « Effect of Voltage Sags on Adjustable-Speed Drives: A Critical Evaluation and an Approach to Improve Performance », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, n°6, p. 904-910, novembre/décembre 1999.
- [ElOuariachi-03] N. El Ouariachi, *Modélisation et commande d'un système multi-moteurs en présence de creux de tension*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, 2003.
- [Futch-05] S. Futcha, *Interface LabVIEW pour la commande d'une débobineuse-rebobineuse*, Rapport d'activité de synthèse en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, 2005.
- [Ho-88] E.Y.Y. Ho, et P.C. SEN, « Decoupling Control of Induction Motor Drives », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 35, n°2, p. 515-525, mai 1988.
- [Ho-89] E.Y.Y. Ho, « Robust Control of High Performance AC Drives », Thesis for Degree of Doctor of Philosophy, Department of Electrical Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1989.

- [Holtz-94] J. Holtz, « Controlled AC Drives with Ride-Through Capability at Power Interruption », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, n°5, p. 1275-1283, septembre/octobre 1994.
- [IEEE-95] *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*, IEEE Std. 1159-1995, 1995.
- [Jouanne-99] V. Jouanne, P.N. Enjeti et B. Banerjee, « Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, n°4, p. 908-916, juillet/août 1999.
- [Koç-02] H. Koç, D. Knittel, M. de Mathelin et G. Abba, « Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 10, n°2, mars 2002.
- [Leclercq-03] A. Leclercq, *Modélisation et commande d'un étage d'un système de bobinage*, Rapport de stage DESS-GR2E, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, 2003.
- [McGranaghan-93] M. McGranaghan, D. Mueller et M. Samotyj, « Voltage Sags in Industrial Systems », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, n°2, p. 397-403, mars/avril 1993

- [Nanga-05a] H.J. Nanga Ndjana, *Système auxiliaire de compensation de creux de tension*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, 2005.
- [Nanga-05b] H.J. Nanga Ndjana, P. Sicard, S. Lahaie, et É. Ngandui, « Auxiliary Voltage Sag Ride-Through System for Adjustable-Speed Drive », *Proceedings of the IEEE IEMDC'05*, CD-ROM, San Antonio TX, mai 2005.
- [Pagilla-03] P.R. Pagilla, R.V. Dwivedula, Y. Zhu et L.P. Pera, *Periodic tension disturbance attenuation in web process lines using active dancers*, ASME *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 125, p.361-371, septembre 1996.
- [Passino-96] K.M. Passino, *Toward Bridging the Perceived Gap Between Conventional and Intelligent Control*, In : IEEE Neural Networks Council, *Intelligent Control Systems : Theory and Applications*, IEEE Press, Chapitre 1, 1996.
- [Pochard-04] F. Pochard, « Syntonisation des correcteurs de vitesse et de tension mécanique d'un étage d'un système bobineur-débobineur », Rapport de stage HEI, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique et génie informatique, 2004.

- [Saridis-96] G. Saridis, *Architecture for Intelligent Controls*, In : IEEE Neural Networks Council, *Intelligent Control Systems : Theory and Applications*, IEEE Press, Chapitre 6, 1996.
- [Saridis-98] G. Saridis, « On the Theory of Intelligent Machines: A Survey », *Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control*, décembre 1998.
- [Sisa-95] E.M. Sisa, « Power Outages and Power Dip Ride-Through », *Proceedings of the IEEE Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, p. 1-7, mai 1995.
- [Stylos-00] C. Stylos, G. Langer, B. Iung, Y.T. Hyun, C. Sorensen, M. Weck et P.P. Groumpos, « Discipline research contribution to the modelling and design of intelligent manufacturing systems », *Studies in Informatics and Control Journal*, vol. 9, n°2, juin 2000.
- [Thiffault-04] C. Thiffault, P. Sicard, A. Bouscayrol, « Tension Control Loop Using a Linear Actuator Based on the Energetic Macroscopic Representation », *Proceedings of the IEEE CCECE'04*, CD-ROM, Niagara Falls (Canada), mai 2004.
- [Thiffault-05] C. Thiffault, P. Sicard, A. Bouscayrol, « Desensitization to Voltage Sags of a Rewinder by Using an Active Dancer Roll for Tension Control », *Proceedings of the IEEE IEMDC'05*, CD-ROM, Sans Antonio TX, mai 2005.

- [Tounzi-02] A. Tounzi, A. Bouscayrol, P. Delarue, C. Brocart et J.B. Tritsch, « Simulation of an induction machine wind generation system based on an Energetic Macroscopic Representation », *ICEM'02*, CD-ROM, août 2002.
- [Zimmermann-96] M. Zimmermann, *Intelligent Control of Mobile Robots*, In : IEEE Neural Networks Council, *Intelligent Control Systems : Theory and Applications*, IEEE Press, Chapitre 20, 1996.

## **ANNEXES**

Annexe A : Définition des types de creux de tension

Annexe B : Méthodes de correction des creux de tension

Annexe C : Commande à flux orienté

Annexe D : Principes de la REM et de la SMC

Annexe E : Générateur de trajectoires

Annexe F : Paramètres de simulation

Annexe G : Utilisation du système RT-LAB

Annexe H : Nouvelle structure de contrôle du système de bobinage

## Annexe A

### **Définition des types de creux de tension**

Nous définissons dans cette annexe l'ensemble des types de creux de tension présentés au chapitre 2 (c.f. figure 2.2). Pour le bien de la cause, nous reprenons cette figure :

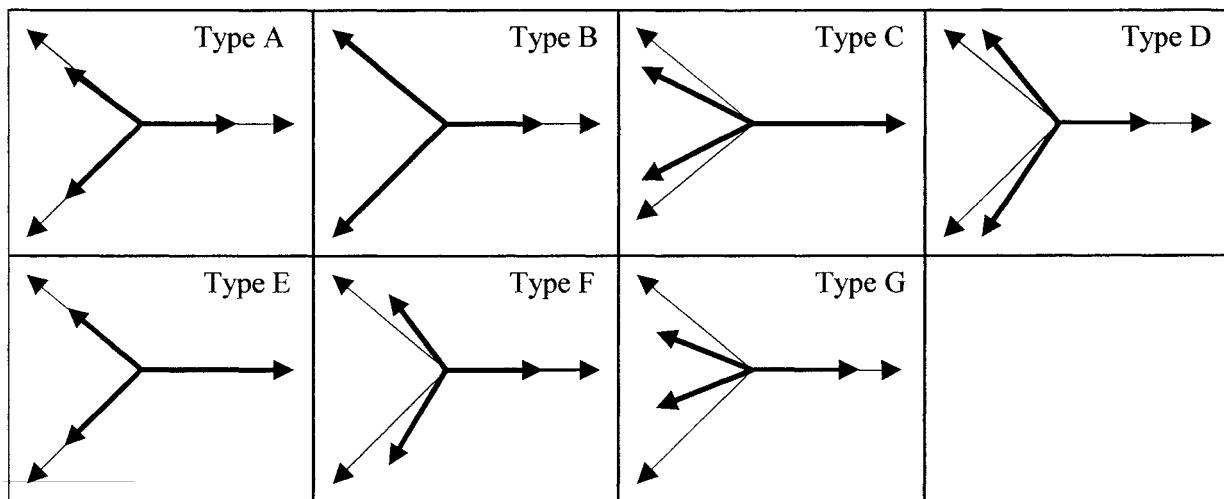


Figure A.1 : Types de creux de tension.

**Type A :**

Les creux de tension de type A sont causés par des fautes simultanées sur les trois phases. Les amplitudes des phases sont identiques et le transfert à travers un transformateur n'affecte pas le phaseur à cause de cette symétrie. Ce type de creux peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = V \\ V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{cases} \quad (A-1)$$

**Type B :**

Les creux de tension de type B sont provoqués par des fautes entre une phase et la masse. Donc, seule une phase possède une amplitude différente, les deux autres ont des amplitudes identiques. Ce type de creux peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = V \\ V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (A-2)$$

**Type C :**

Les creux de tension de type C sont causés par des fautes phase à phase. C'est-à-dire que les deux phases affectées se déplacent l'une vers l'autre le long d'une ligne droite. Un creux de tension de type B passant à travers un transformateur connecté en triangle-étoile engendrera un creux de type C. Ce dernier peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = 1 \\ V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{cases} \quad (A-3)$$

**Type D :**

Les creux de tension de type D sont causés par le passage d'un creux de type C à travers un transformateur connecté en triangle-étoile. Par le fait même, un creux de type B qui passe par deux transformateurs connectés en triangle-étoile impliquera l'apparition d'un creux de tension de type D. Ce dernier peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = V \\ V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (A-4)$$

**Type E :**

Les creux de tension de type E sont causés par des fautes entre deux phases et la masse. De ce fait, les deux phases affectées possèdent une amplitude réduite et la troisième demeure intacte. Ce type de creux peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = 1 \\ V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{cases} \quad (A-5)$$

**Type F :**

Les creux de tension de type F sont causés par le passage d'un creux de type E à travers un transformateur connecté en triangle-étoile. Ce type de creux peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = V \\ V_b = -\frac{1}{2}V - j\sqrt{3}\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}V\right) \\ V_c = -\frac{1}{2}V + j\sqrt{3}\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}V\right) \end{cases} \quad (A-6)$$

**Type G :**

Les creux de tension de type G sont causés par le passage d'un creux de type F à travers un transformateur connecté en triangle-étoile. Par le fait même, un creux de type E qui passe par deux transformateurs connectés en triangle-étoile impliquera l'apparition d'un creux de tension de type G. Ce dernier peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = V \\ V_b = -\frac{1}{2} - j\sqrt{3}\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}V\right) \\ V_c = -\frac{1}{2} + j\sqrt{3}\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}V\right) \end{cases} \quad (A-7)$$

Il est à noter que le type de charge ainsi que les différentes configurations des transformateurs (étoile-triangle, étoile-étoile, triangle-étoile, etc.) influencent les creux de tension. Dans notre travail, nous nous sommes limité sur l'effet des creux de tension de type A.

## **Annexe B**

# ***Méthodes de correction des creux de tension***

Cette annexe présente les différentes méthodes de compensation des creux de tension. Tel que mentionné dans le chapitre 2, elles peuvent se diviser en trois catégories : la modification des topologies, l'utilisation d'unités de stockage d'énergie et la modification des algorithmes de commande.

### **Modification des topologies :**

La première catégorie consiste à modifier les topologies existantes afin d'atteindre un plus haut niveau d'immunité face aux perturbations sur la ligne électrique. En particulier, l'on considère la modification des convertisseurs présents, par exemple l'utilisation de moteurs à plus faible tension, l'utilisation d'un hacheur élévateur de tension (*Boost Converter*) ou l'utilisation d'un redresseur actif.

**Utilisation d'unités de stockage :**

La seconde catégorie consiste à utiliser des unités de stockage. Elle est largement répandue dans l'industrie puisqu'elle permet de fournir la pleine puissance aux EVV en présence d'un creux de tension. Cette méthode inclut plusieurs techniques telles que l'utilisation d'un système de batteries de secours, de supers capacités, de groupes moteur-générateur, de volants d'inertie, de SMES (*Superconducting magnetic energy storage*) et de piles à combustible.

**Modification des algorithmes de commande ou des conditions d'opération :**

Cette dernière catégorie consiste à réduire la sensibilité des procédés et des équipements en permettant une détection rapide des perturbations et en maintenant le synchronisme des entraînements par la modification ou l'implantation d'algorithmes de commande et de compensation. Cette méthode inclut aussi plusieurs techniques telles que l'augmentation de la capacité du bus cc, la récupération de l'énergie cinétique de l'inertie de la charge pour maintenir le bus cc, le délestage de charges non critiques et l'opération des EVV à vitesse réduite. Le principal avantage de cette méthode est le faible coût qui lui est associé, puisqu'une simple modification du procédé existant est alors apportée, en comparaison avec les méthodes précédentes (Tableau 2.1).

## **Annexe C**

### ***Commande à flux orienté***

Cette annexe expose la technique de commande à flux orienté (CFO). Cette méthode a vu le jour dans le début des années 70 avec Blaschke et a ainsi permis d'obtenir d'excellentes réponses en couple et en vitesse pour un moteur à induction. Les méthodes de CFO sont basées sur l'inverse du modèle de la machine selon les axes d-q, en considérant comme variables d'état les flux dans la machine [Ho-88], [Ho-89]. La CFO peut se réaliser à l'aide de l'orientation du flux statorique, du flux rotorique ou du flux d'entrefer. Le choix du référentiel est lié soit au stator, au rotor ou au champ tournant. La CFO permet d'avoir un découplage distinctif entre le flux et le couple. En effet le flux est commandé par action sur la composante d'axe d, alors que le couple électromagnétique est contrôlé par action sur la composante d'axe q. Ainsi, nous obtenons une commande linéaire de la machine à induction de façon similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Cependant, les paramètres du modèle de la machine contenus dans le contrôleur doivent être adaptés régulièrement. Pour ce faire, nous devons continuellement connaître, avec précision, l'amplitude et la position du vecteur d'espace du flux afin de maintenir une parfaite orientation des champs. Ceci est réalisé en utilisant par

exemple un observateur d'état non-linéaire. Voici donc les différentes techniques d'orientation de flux.

**Orientation du flux statorique :**

L'orientation du flux statorique est obtenue en considérant comme variable d'état le flux statorique et en alignant le flux suivant l'axe d de façon à assurer un flux nul suivant l'axe q, le système d'équations est donné par [Ho-88] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_r} & \omega_g \\ -\omega_g & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma T_r L_s} \begin{bmatrix} 1 + T_r \frac{d}{dt} \\ T_r \omega_g \end{bmatrix} \Psi_s \quad (C-1)$$

$$Tem = \frac{3}{2} pp \cdot \Psi_s i_{qs} \quad (C-2)$$

Où :  $\omega_g$  est la pulsation du glissement en rad/s;

$T_r$  est la constante de temps rotorique ( $L_r/R_r$ ) en s;

$\sigma$  est le coefficient de fuite total =  $(L_s L_r - M^2) / L_s L_r$  (sans unité);

$\Psi_s = \Psi_{ds}$  est le flux statorique suivant l'axe d en Volt/(rad/s).

pp est le nombre de paires de pôles.

Les schémas de réglage et leur fonctionnement sont détaillés dans [Ba-Razzouk-97].

**Orientation du flux rotorique :**

L'orientation du flux rotorique est obtenue en considérant comme variable d'état le flux rotorique et en alignant le flux suivant l'axe d de façon à assurer un flux nul suivant l'axe q, le système d'équations est donné par [Ho-88] :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{M} \begin{bmatrix} 1 + T_r \frac{d}{dt} \\ T_r \omega_g \end{bmatrix} \Psi_r \quad (C-3)$$

$$Tem = \frac{3}{2} pp \cdot \frac{M}{L_r} \Psi_s i_{qs} \quad (C-4)$$

Où :  $\omega_g$  est la pulsation du glissement en rad/s;

$T_r$  est la constante de temps rotorique ( $L_r/R_r$ ) en s;

$\Psi_r = \Psi_{dr}$  est le flux rotorique suivant l'axe d en Volt/(rad/s).

pp est le nombre de paires de pôles.

Les schémas de réglage et leur fonctionnement sont détaillés dans [Ba-Razzouk97].

**Orientation du flux d'entrefer :**

La troisième possibilité d'orientation de flux est obtenue en considérant comme variable d'état le flux d'entrefer et en alignant le flux suivant l'axe d de façon à assurer un flux nul suivant l'axe q.

Le système d'équations d'état décrivant la machine dans ce cas est donné par [Ho-88] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{r1}} & \omega_g \\ -\omega_g & -\frac{1}{\sigma T_{r1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_{r1}M} \begin{bmatrix} 1 + T_r \frac{d}{dt} \\ T_r \omega_g \end{bmatrix} \Psi_e \quad (C-5)$$

$$Tem = \frac{3}{2} pp \cdot \Psi_e i_{qs} \quad (C-6)$$

Où :  $\omega_g$  est la pulsation du glissement en rad/s;

$T_{r1}$  est la constante de temps de fuite au rotor  $[(L_r - M)/R_r]$  en s;

$\Psi_e = \Psi_{de}$  est le flux d'entrefer suivant l'axe d;

pp est le nombre de paires de pôles.

Les schémas de réglage et leur fonctionnement sont détaillés dans [Ba-Razzouk-97].

## ***Annexe D***

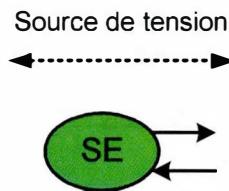
### ***Principes de la REM et de la SMC***

La méthode de représentation utilisée au chapitre 3 pour modéliser le rouleau danseur actif est la représentation énergétique macroscopique (REM). Dans cette annexe, nous regarderons les bases de cette technique ainsi que celles de la structure maximale de commande (SMC), qui nous a permis de concevoir les contrôleurs du rouleau danseur actif à partir de la modélisation.

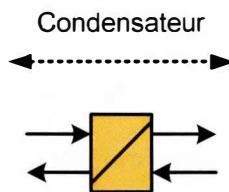
#### **Représentation énergétique macroscopique :**

La REM a été développée dans l'esprit d'aborder la modélisation de systèmes complexes. Les macro-modèles qui la composent mettent en évidence les interactions entre les diverses composantes du système. Ils sont classés selon les catégories suivantes :

- Les sources énergétiques qui induisent des variables d'états et qui sont en bout de la chaîne de conversion. Elles sont représentées par un ovale vert :

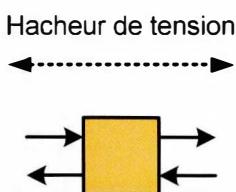


- Les accumulateurs qui induisent une accumulation d'énergie, donc une variable d'état. Ils sont représentés par un rectangle orange dans lequel se trouve une diagonale :

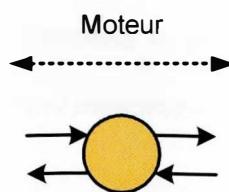


- Les convertisseurs qui assurent une conversion énergétique sans accumulation ni perte d'énergie. Nous retrouvons alors trois types de convertisseurs :

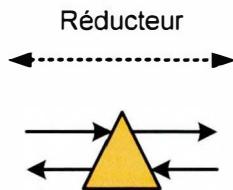
- Les convertisseurs électriques, représentés par un carré orange :



- Les convertisseurs électromécaniques, représentés par un cercle orange :



- Les convertisseurs mécaniques, représentés par un triangle orange :



Le principe de la REM consiste à relier deux éléments entre eux à l'aide d'un vecteur d'action et d'une variable de réaction. Le produit scalaire de ces deux quantités donne une puissance instantanée, échangée entre les éléments.

Ainsi, la REM permet de modéliser de manière synthétique les systèmes de conversion complexes [Bouscayrol-02], et en particulier les systèmes multimachines (SMM) pour lesquels elle a été développée à l'origine [Bouscayrol-00b]. Elle permet une aide précieuse à la structuration de la simulation de ces systèmes [Tounzi-02]. Elle permet également de dégager rapidement et systématiquement une structure de commande pour les systèmes.

#### Structure maximale de commande :

La SMC est déduite de la REM selon le principe de l'inversion qui est appliqué aux deux types d'éléments qui assurent la modification de l'énergie. En effet, une inversion directe est réalisée pour les éléments de conversion et une inversion indirecte par asservissement pour les éléments d'accumulation. Ainsi, nous obtenons la structure qui commande un élément de la chaîne de conversion au travers différentes mesures et correcteurs.

## Annexe E

### Générateur de trajectoires

Nous exposons dans cette annexe les différentes équations caractérisant le générateur de trajectoires présenté au chapitre 3 (c.f. Tableaux 3.1 et 3.2). Ce dernier est basé sur un profil de position parabolique, donc de vitesse trapézoïdale. Il y a alors 2 gabarits de vitesse possibles : celui où la vitesse maximale n'est pas atteinte et celui où elle est atteinte.

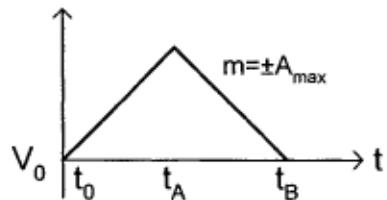


Figure E.1 : Premier gabarit de vitesse.

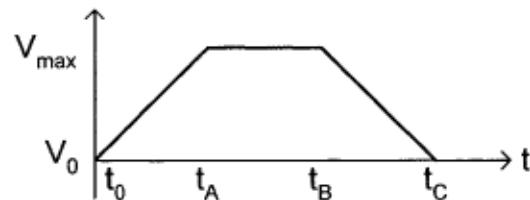
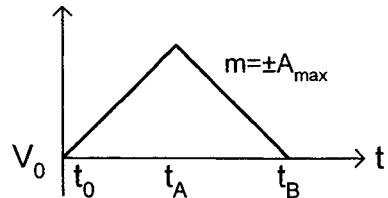


Figure E.2 : Second gabarit de vitesse.

Note : pour une diminution de la vitesse, inverser les gabarits par rapport à l'axe de temps.

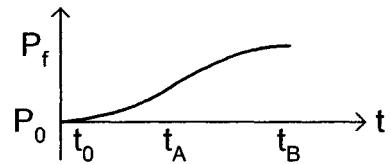
**Gabarit 1**

Modèle pour la vitesse



$$V_{0A} = A_{\max} t + V_0$$

Modèle pour la position



$$P_{0A} = \frac{A_{\max} t^2}{2} + V_0 t + P_0$$

$$V_{AB} = -A_{\max} t + C_{VAB}$$

$$\text{à } t = t_B \Rightarrow V_{AB} = 0$$

$$\text{donc, } -A_{\max} t_B + C_{VAB} = 0$$

$$\Rightarrow C_{VAB} = A_{\max} t_B$$

$$P_{AB} = \frac{-A_{\max} t^2}{2} + C_{VAB} t + C_{PAB}$$

$$\text{à } t = t_B \Rightarrow P_{AB} = P_f$$

donc,

$$\frac{-A_{\max} t_B^2}{2} + C_{VAB} t_B + C_{PAB} = P_f$$

$$\Rightarrow C_{PAB} = P_f + \frac{A_{\max} t_B^2}{2} - C_{VAB} t_B$$

 Calcul des temps  $t_A$  et  $t_B$ 

$$\text{à } t = t_A \Rightarrow V_{0A} = V_{AB}$$

$$A_{\max} t_A + V_0 = -A_{\max} t_A + C_{VAB}$$

$$A_{\max} t_A + V_0 = -A_{\max} t_A + A_{\max} t_B$$

$$\Rightarrow \boxed{t_A = \frac{A_{\max} t_B - V_0}{2 A_{\max}}} \quad (E-1)$$

$$\text{À } t = t_A \quad \Rightarrow \quad P_{0A} = P_{AB}$$

$$\frac{A_{\max} t_A^2}{2} + V_0 t_A + P_0 = \frac{-A_{\max} t_A^2}{2} + C_{VAB} t_A + C_{PAB}$$

$$\frac{A_{\max} t_A^2}{2} + V_0 t_A + P_0 = \frac{-A_{\max} t_A^2}{2} + A_{\max} t_B t_A + P_f + \frac{A_{\max} t_B^2}{2} - A_{\max} t_B^2$$

$$A_{\max} t_A^2 + V_0 t_A + P_0 = A_{\max} t_B t_A + P_f - \frac{A_{\max} t_B^2}{2} \quad (E-2)$$

En remplaçant (E-1) dans (E-2), nous obtenons :

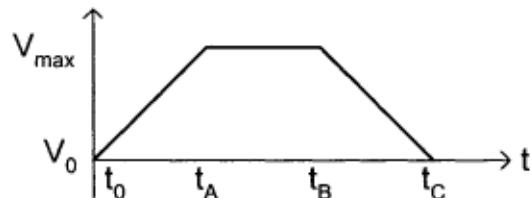
$$\Rightarrow \boxed{t_B = \frac{-V_0 \pm \sqrt{2V_0^2 + 4A_{\max} \Delta P}}{A_{\max}}} \quad (E-3)$$

$$\text{où } \Delta P = P_f - P_0$$

Seule la valeur positive du signe  $\pm$  est considérée, étant donné qu'il est impossible d'obtenir des temps négatifs.

**Gabarit 2**

Modèle pour la vitesse



$$V_{0A} = A_{\max} t + V_0$$

$$V_{AB} = V_{\max}$$

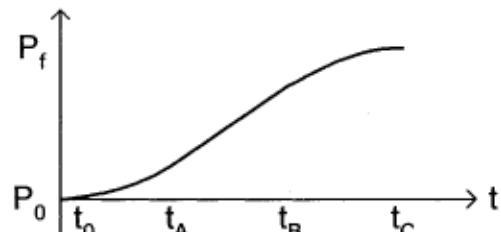
$$V_{BC} = -A_{\max} t + C_{VBC}$$

$$\text{à } t = t_C \Rightarrow V_{BC} = 0$$

$$\text{donc, } -A_{\max} t_C + C_{VBC} = 0$$

$$\Rightarrow C_{VBC} = A_{\max} t_C$$

Modèle pour la position



$$P_{0A} = \frac{A_{\max} t^2}{2} + V_0 t + P_0$$

$$P_{AB} = V_{\max} t + C_{PAB}$$

$$\text{à } t = t_A \Rightarrow P_{0A} = P_{AB}$$

$$\frac{A_{\max} t_A^2}{2} + V_0 t_A + P_0 = V_{\max} t_A + C_{PAB}$$

$$\Rightarrow C_{PAB} = \frac{A_{\max} t_A^2}{2} + V_0 t_A + P_0 - V_{\max} t_A$$

$$P_{BC} = \frac{-A_{\max} t^2}{2} + C_{VBC} t + C_{PBC}$$

$$\text{à } t = t_C \Rightarrow P_{BC} = P_f$$

$$\text{donc, } -\frac{A_{\max} t_C^2}{2} + C_{VBC} t_C + C_{PBC} = P_f$$

$$\Rightarrow C_{PBC} = P_f - \frac{A_{\max} t_C^2}{2}$$

 Calcul des temps  $t_A$ ,  $t_B$  et  $t_C$

Prenons l'équation  $V_{0A}$  évaluée à  $t = t_A$

$$V_{0A}(t_A) = V_{\max} = A_{\max} t_A + V_0$$

$$\Rightarrow \boxed{t_A = \frac{V_{\max} - V_0}{A_{\max}}} \quad (E-4)$$

$$\text{À } t = t_B \quad \Rightarrow \quad V_{AB} = V_{BC}$$

$$V_{\max} = -A_{\max} t_B + C_{VBC}$$

$$V_{\max} = -A_{\max} t_B + A_{\max} t_C$$

$$\Rightarrow \boxed{t_B = t_C - \frac{V_{\max}}{A_{\max}}} \quad (E-5)$$

Selon l'aire sous la courbe de vitesse,  $Aire = \Delta P = Aire_{0A} + Aire_{AB} + Aire_{BC}$ , donc :

$$Aire = \Delta P = \left[ \frac{t_A(V_{\max} - V_0)}{2} + V_0 t_A \right] + [(t_B - t_A)V_{\max}] + \left[ \frac{(t_C - t_B)V_{\max}}{2} \right]$$

$$\Rightarrow \boxed{t_C = \frac{\Delta P}{V_{\max}} + \frac{t_A}{2} - \frac{t_A V_0}{2 V_{\max}} + \frac{V_{\max}}{2 A_{\max}}} \quad (E-6)$$

## **ANNEXE F**

### ***Paramètres de simulation***

Cette annexe présente les paramètres des différentes simulations dont les résultats ont été présentés au chapitre 4.

#### **Alimentation principale**

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$V_{\text{Bus}}$	Tension sur le bus cc	280.8	(V)
$C_{\text{Bus}}$	Capacité du bus cc	$1650 \times 10^{-6}$	(F)
$L_{\text{Bus}}$	Inductance du bus cc	$10 \times 10^{-6}$	(H)

**Moteurs à induction**

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$M_{arbre\ 1}$	Masse de l'arbre du moteur 1	8	(kg)
$M_{arbre\ 3}$	Masse de l'arbre du moteur 3	10	(kg)
$R_{arbre\ 1}$	Rayon de l'arbre du moteur 1	0.25	(m)
$R_{arbre\ 3}$	Rayon de l'arbre du moteur 3	0.5	(m)
$J_{arbre\ 1}$	Inertie vue au moteur 1	0.25	(kg/m <sup>2</sup> )
$J_{arbre\ 3}$	Inertie vue au moteur 3	1.25	(kg/m <sup>2</sup> )
$f_{arbre\ 1}$	Coefficient de frottement vu au moteur 1	0.44	(N m s)
$f_{arbre\ 3}$	Coefficient de frottement vu au moteur 3	0.44	(N m s)
$\Omega_{im\ 3-ref}$	Vitesse angulaire de référence du moteur 3	30	(rad/s)

**Toile**

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$T_e$	Effort de tension de l'étage précédent	6	(N)
$T_s$	Effort de tension de l'étage suivant	0	(N)
$T_{toile1-ref}$	Effort de tension de référence dans la toile	4	(N)
$L$	Longueur de la section de toile	2	(m)
$S$	Section de la section de toile	$27.6 \times 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> )
$E$	Module de Young	$0.16 \times 10^9$	(N/m <sup>2</sup> )

**Rouleau danseur actif**

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$v_{cc}$	Tension de la source courant continu	240	(V)
$M_{arbre 2}$	Masse de l'arbre du moteur à courant continu	10	(kg)
$R_{eq}$	Résistance équivalente du moteur cc	1.2	( $\Omega$ )
$L_{eq}$	Inductance équivalente du moteur cc	$1.63 \times 10^{-3}$	(H)
$k$	Constante du moteur cc	0.54	([N·m]/[Wb A])
$F_{fr-mcc}$	Force de frottement interne du moteur cc	$0.633 \times 10^{-3}$	(N)
$J_{mcc}$	Inertie interne du moteur cc	$0.1 \times 10^{-3}$	(kg/m <sup>2</sup> )
$J_{vis}$	Inertie de la vis-mère	$25 \times 10^{-6}$	(kg/m <sup>2</sup> )
$P_{vis}$	Pas de la vis-mère	100	(tour/m)
$\mu_{vis}$	Coefficient de frottement de la vis-mère	0.001	Sans unité

**Gains des contrôleurs de la structure de bobinage classique (voir chapitre 2.3.1)**

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de tension	$K_p$	29.09
	$K_i$	206.55
Contrôleur de vitesse pour $im_1$	$K_p$	6.83
	$K_i$	103.28
Contrôleur de vitesse pour $im_3$	$K_p$	6.83
	$K_i$	20.66

**Gains des contrôleurs de la structure de bobinage proposée (voir chapitre 3.1)**

Contrôleur	Paramètre	Valeur
Contrôleur de tension	$K_p$	1600
	$K_i$	423600
Contrôleur de vitesse pour $mcc_2$	$K_p$	0.55
	$K_i$	437.60
Contrôleur de courant pour $mcc_2$	$K_p$	12.16
	$K_i$	56105
Contrôleur de position pour $im_1$	$K_p$	4.56
	$K_i$	10.63
Contrôleur de vitesse pour $im_1$	$K_p$	6.83
	$K_i$	70.05
Contrôleur de vitesse pour $im_3$	$K_p$	6.83
	$K_i$	14

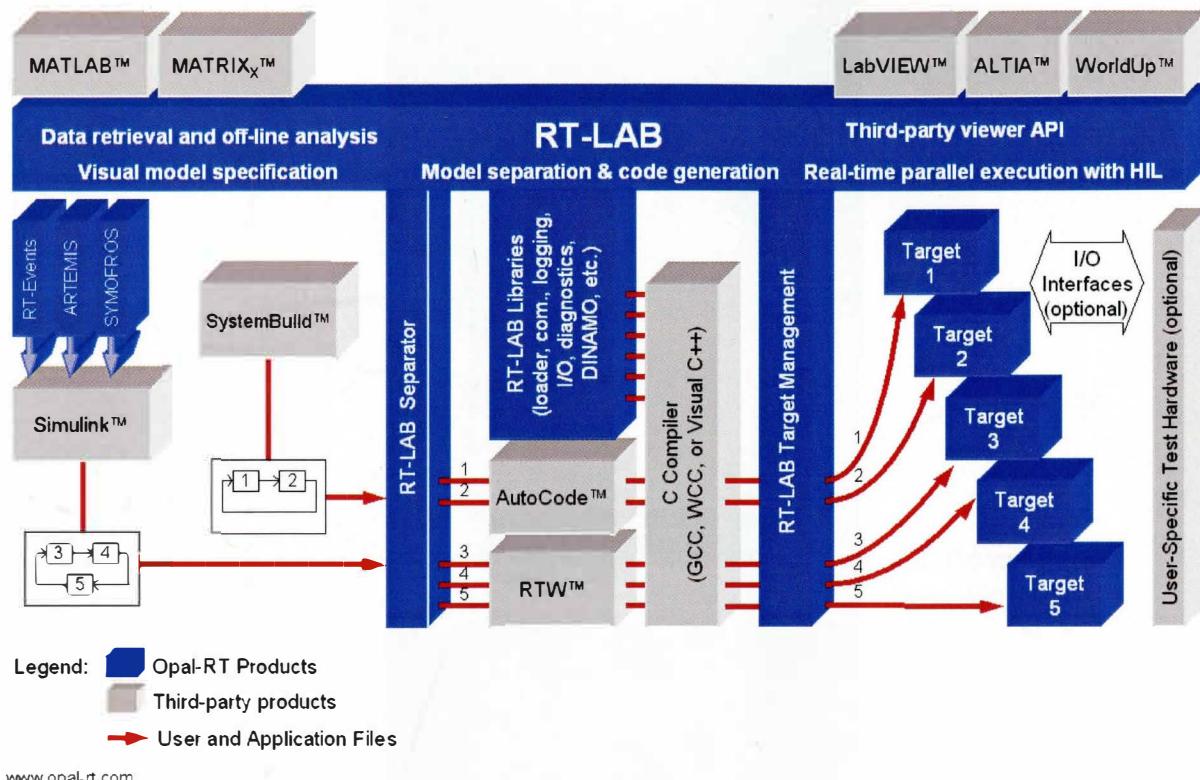
## Annexe G

### ***Utilisation du système RT-LAB***

Cette annexe présente la plate-forme temps réel distribuée RT-LAB ainsi qu'un aperçu de son fonctionnement. En effet, RT-LAB permet d'obtenir des versions temps réel des modèles dynamiques développés sous Simulink et de les exécuter sur la plate-forme distribuée avec possibilité de mettre le matériel dans la boucle. RT-LAB est totalement intégré, en fait il s'incorpore à un niveau au dessus d'outils tels que Simulink de *The Mathworks Inc.* pour simuler et tester des modèles, des contrôleurs et d'autres applications.

La figure G.1 présente l'intégration du système RT-LAB au travers les applications de tierces parties. Ainsi, nous remarquons qu'il se divise en trois sections :

- La visualisation de modèles;
- La séparation des modèles et la génération de codes;
- L'exécution parallèle en temps réel avec matériel dans la boucle (*Hardware In the Loop*).



G.1 : Intégration de RT-LAB au travers certaines applications. [[www.opal-rt.com](http://www.opal-rt.com)]

Le système RT-LAB du laboratoire (Figure G.2) possède 16 nœuds de calcul (8 ordinateurs avec processeur dual) qui peuvent également servir pour l'acquisition de données. Chacune de ces 8 paires de nœuds de calcul est indépendante des autres. Ainsi, chaque paire de nœuds possède son propre système d'exploitation (QNX) et communique via un lien haut débit (FireWire) avec les autres nœuds. La communication via la station de commande (station principale) s'effectue via un lien Ethernet.

De plus, un commutateur OmniView permet de brancher tous les périphériques E/S des nœuds (clavier, souris et écran) sur un seul poste de travail.

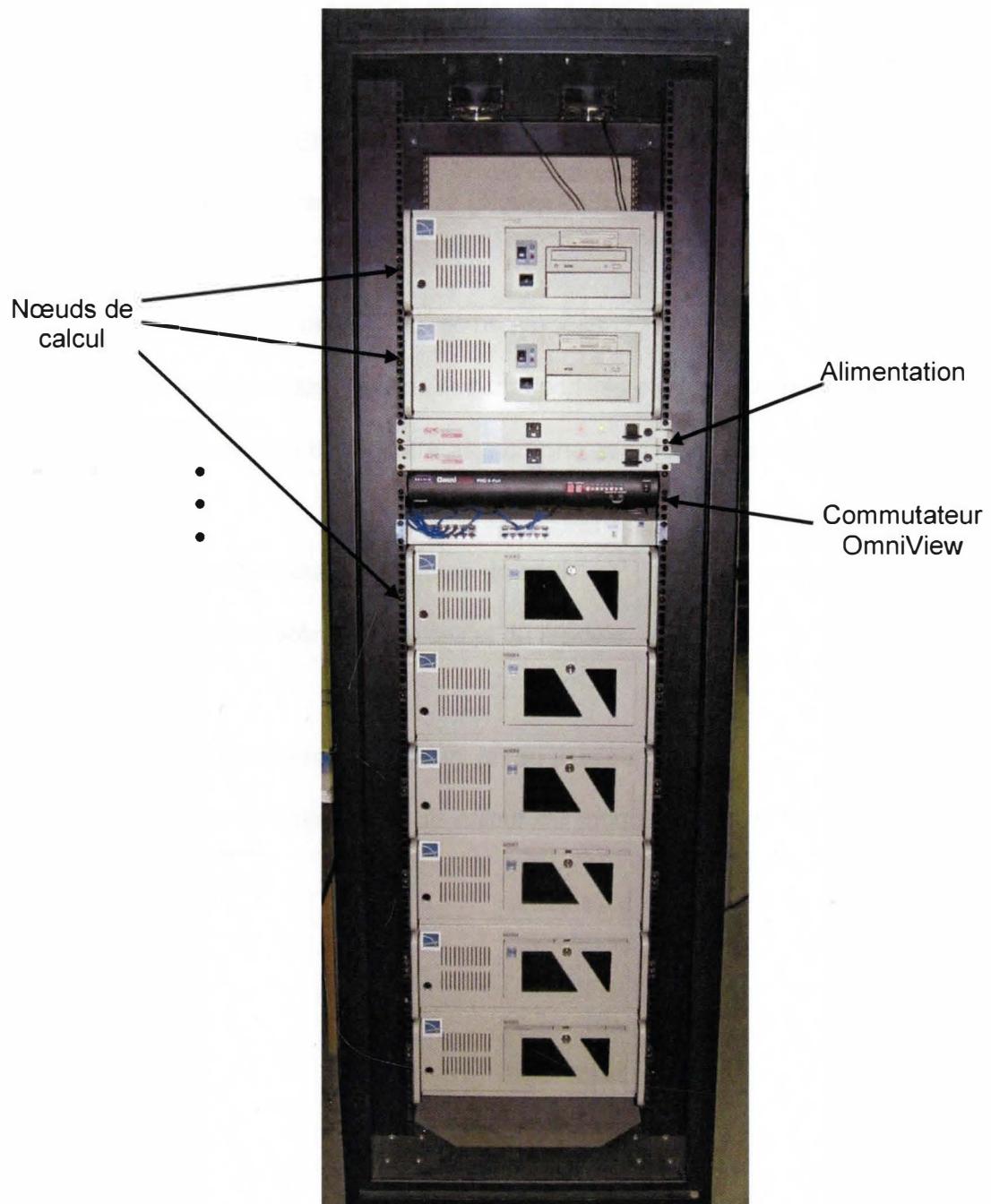


Figure G.2 : Système RT-LAB du laboratoire.

Pour utiliser RT-LAB, il faut tout d'abord posséder un modèle, par exemple Matlab/Simulink, et lui appliquer certaines conventions :

**Grouper le modèle en sous-systèmes de calcul :**

La première étape consiste à grouper le modèle en divers systèmes qui seront exécutés sur différents nœuds de calcul. En effet, chaque sous-système de Simulink doit posséder un nom commençant par un préfixe bien déterminé (Figure G.3) :

SC\_ : sous-système console (au moins un)

- Contient tous les blocs de l'interface utilisateur (*scope, gains, switch...*).
- Il sera exécuté de manière asynchrone avec les autres blocs.

SM\_ : sous-système maître (toujours un seul)

- Contient les éléments de calcul du modèle.

SS\_ : sous-système esclave (aucun, un ou plusieurs)

- Contient des éléments de calcul du modèle lorsqu'il est exécuté sur plusieurs processeurs.

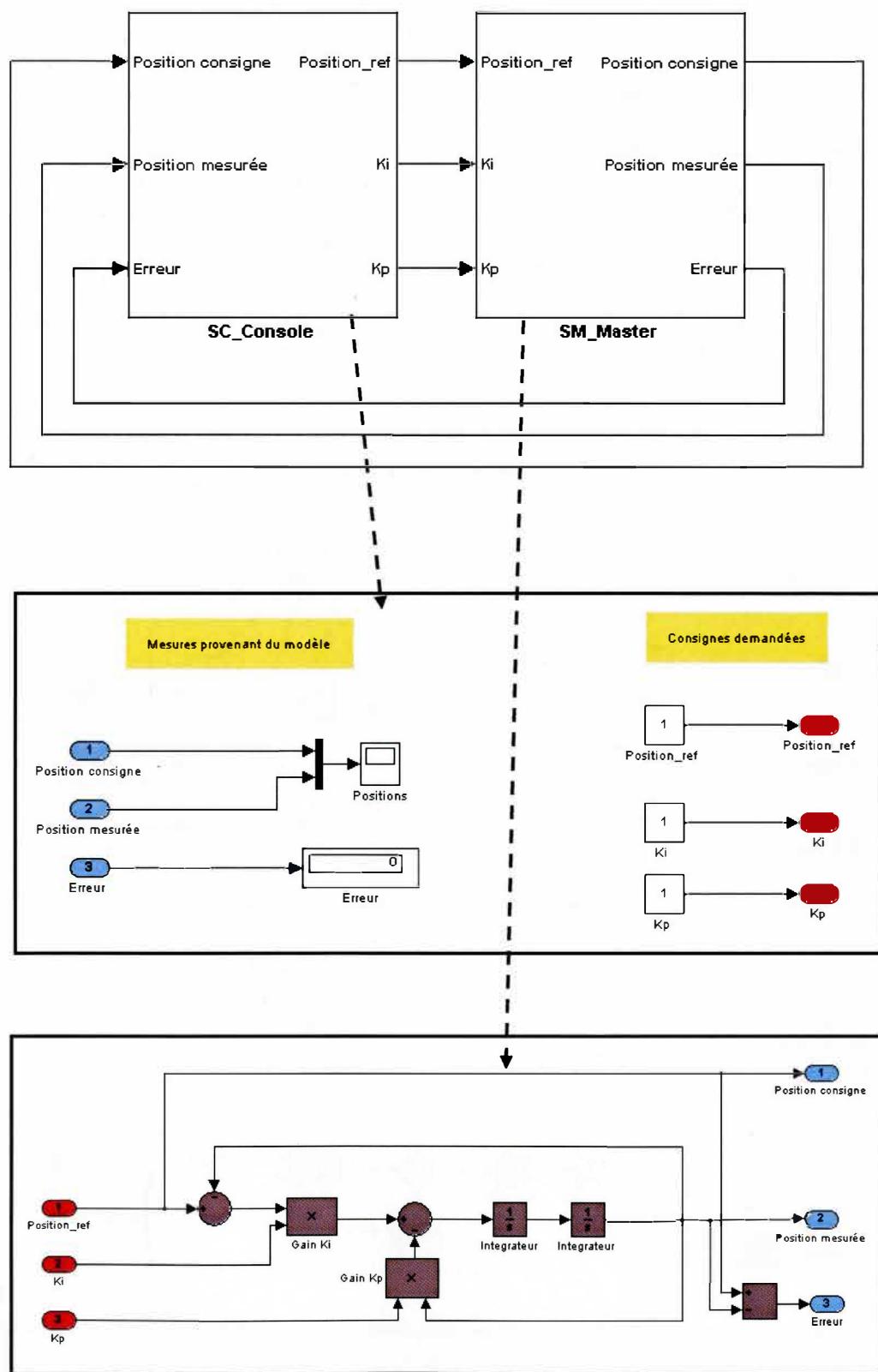


Figure G.3 : Modélisation sous RT-LAB – Création des sous-systèmes.

### Ajouter les blocs de communication OpComm :

La seconde étape de la réalisation de modèles pouvant être simulés sous RT-LAB consiste à ajouter les blocs de communication OpComm. Ces blocs permettent d'activer et de sauvegarder les informations de la communication entre la station de commande et les nœuds de calcul ainsi qu'entre les différents nœuds de calcul d'une simulation distribuée. Ainsi, toutes les entrées des sous-systèmes principaux doivent passer à travers un OpComm avant d'être utilisées.

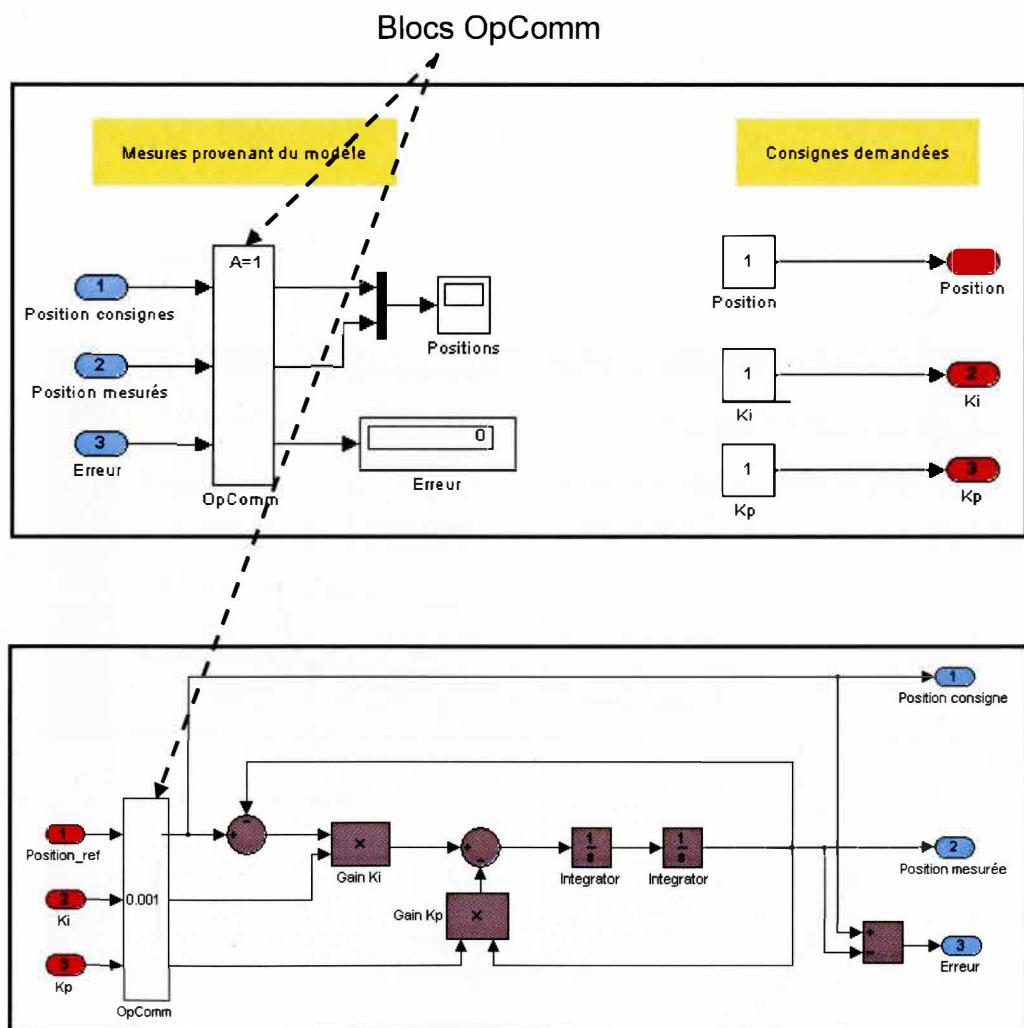


Figure G.4 : Modélisation sous RT-LAB – Ajout des blocs de communication.

**Exécution sous RT-LAB :**

La dernière étape consiste à exécuter le modèle sous RT-LAB selon les étapes suivantes (Figure G.5) :

1. Open : Sélectionner le modèle que l'on désire exécuter sous RT-LAB.
2. Edit : Éditer le modèle selon les conventions établies précédemment.
3. Compile : Compilation des différents sous-systèmes du modèle en exécutable.
4. Assign : Assignement d'un nœud de calcul à chacun des exécutables.
5. Choisir le type de synchronisation (*hardware* ou *software*) ou la simulation.
6. Load : Chargement des exécutables dans les nœuds spécifiés.
7. Execute : Exécution de la simulation du modèle.

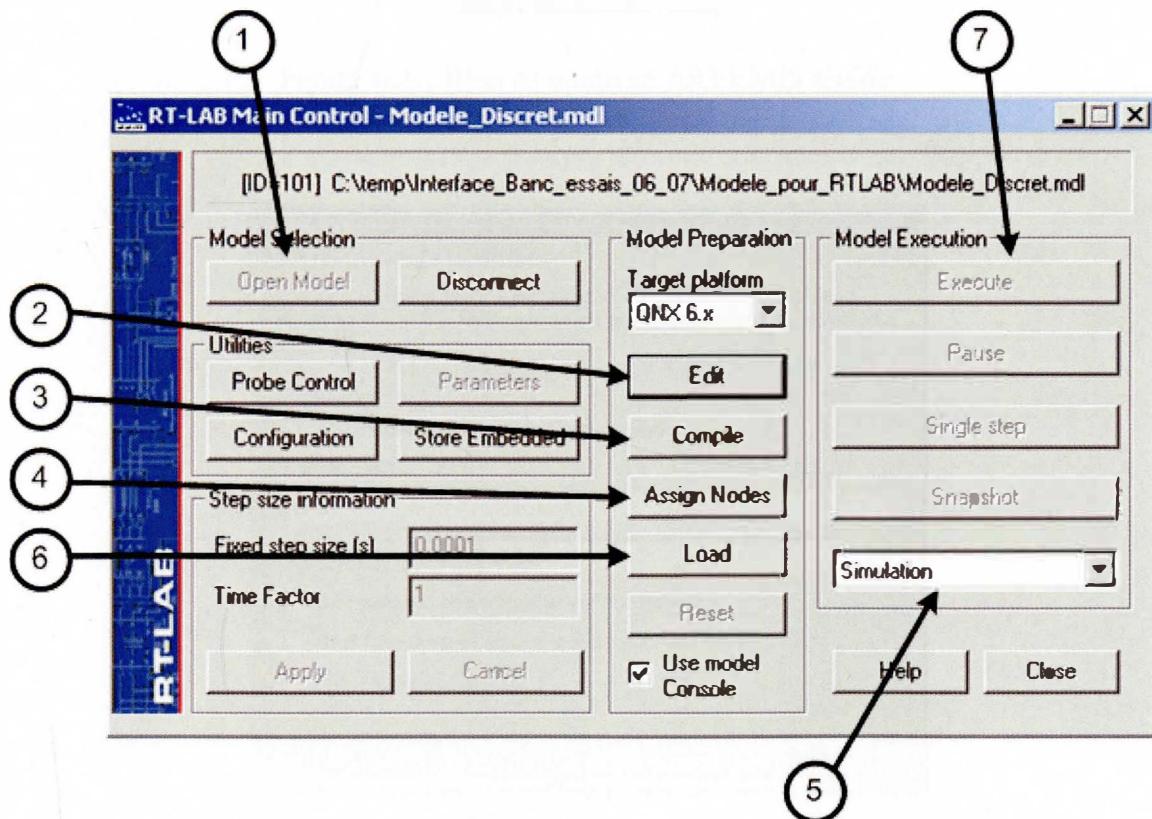


Figure G.5 : Exécution sous RT-LAB.

### Utilisation de l'outil de simulation ARTEMIS :

Tel que vu dans le chapitre 5, nous avons utilisé l'outil ARTEMIS pour effectuer la simulation de notre modèle sur le système RT-LAB. Cet outil permet, à l'aide de ses algorithmes et de ses méthodes d'intégration à pas fixe, d'accélérer et d'augmenter la précision des simulations de modèles comportant des éléments de la librairie SimPowerSystems. Pour l'utiliser, il suffit d'insérer le bloc « ARTEMIS Guide » (Figure G.6) dans le modèle, afin d'y spécifier les différents paramètres de contrôle de la simulation tels que le pas de calcul, l'algorithme de discréttisation ainsi que certaines options pour satisfaire les cas demandant des commutations hautes fréquences (Figure G.7).



Figure G.6 : Bloc de contrôle ARTEMIS Guide.

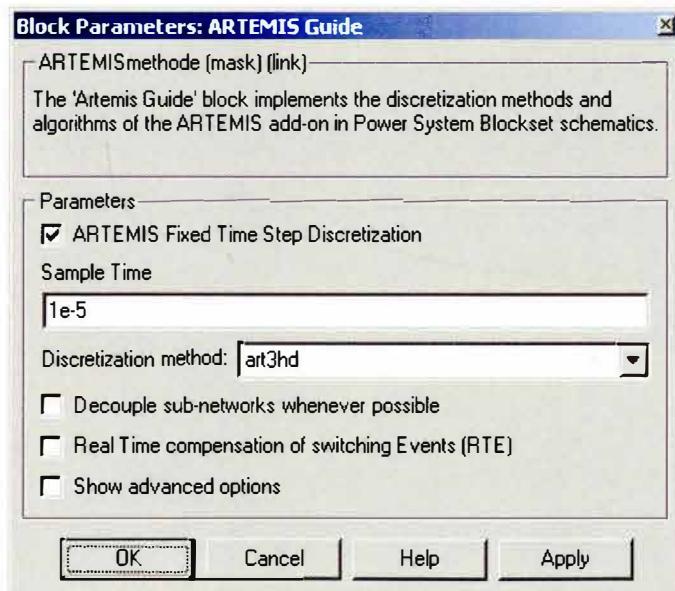


Figure G.7 : Boîte de dialogue du bloc de contrôle ARTEMIS Guide.

**Utilisation de LabVIEW comme interface utilisateur :**

Tel que vu dans le chapitre 5, il est possible d'utiliser LabVIEW pour créer une interface utilisateur à notre modèle exécuté sous RT-LAB. Cependant, il y a certaines conventions à respecter pour réaliser cette intégration :

1. Installer les librairies de RT-LAB dans les répertoires de LabVIEW.
2. Créer un contrôle pour chaque consigne et un indicateur pour chaque mesure.
3. Transférer les consignes et recevoir les mesures selon le même ordre que spécifié dans les OpComm du modèle Simulink.
4. Exécuter l'interface utilisateur en s'assurant que le modèle que l'on désire exécuter fût préalablement compilé et que le « Main Control » de RT-LAB ne soit pas connecté sur le modèle.

## ***Annexe H***

# ***Nouvelle structure de contrôle du système de bobinage***

Au chapitre 3.3.1, nous avons exposé une stratégie de désensibilisation aux creux de tension qui consistait à introduire un contrôleur externe aux contrôleurs existants, afin d'effectuer la gestion du procédé pendant les perturbations. Cette proposition a été faite en considérant que nous ne puissions pas intervenir à l'intérieur même des contrôleurs existants ou en supposant que nous ne remplaçons pas ces contrôleurs. Bien que la solution exposée ait amélioré grandement la tolérance des systèmes de bobinage aux perturbations, de meilleurs résultats peuvent être obtenus lorsque nous sommes en mesure de recréer la structure de commande.

C'est pourquoi, dans cette section, nous présenterons une nouvelle structure de contrôle du système de bobinage qui est entièrement dédiée à la désensibilisation aux creux de tension. Cette structure de commande remplace les contrôleurs existants dans le système multimoteur.

### **Structure de commande du système de bobinage**

Les résultats de simulations présentés au chapitre 4 ont montré qu'à l'apparition d'un creux de tension sur l'alimentation électrique, une baisse du niveau de tension survient sur le bus courant continu. Cette baisse affecte grandement les moteurs du système, entraînant même une perte de synchronisme entre ceux-ci. C'est pourquoi il est justifié de créer une méthode qui permet de maintenir le niveau de tension sur le bus cc à un seuil acceptable pendant un creux de tension. En effet, le principe repose sur la récupération de l'énergie cinétique accumulée dans les rouleaux de bouts de chaîne, soit le dérouleur ou l'enrouleur, afin de la transformer en énergie électrique pour alimenter le bus cc durant la perturbation électrique [Holtz-94, Sisa-95]. Dans notre étude, puisque nous travaillons avec des inerties de rouleau fixe, nous considérerons seulement la récupération de l'énergie par l'enrouleur (celui possédant l'inertie la plus élevée).

Pour réaliser la récupération de l'énergie cinétique de l'enrouleur, nous devons avoir dans notre structure de commande, un contrôleur qui effectue l'asservissement de la tension sur bus cc pendant un creux de tension sur l'alimentation électrique. La nouvelle structure de commande incorporant cet élément est présentée à la figure H.1.

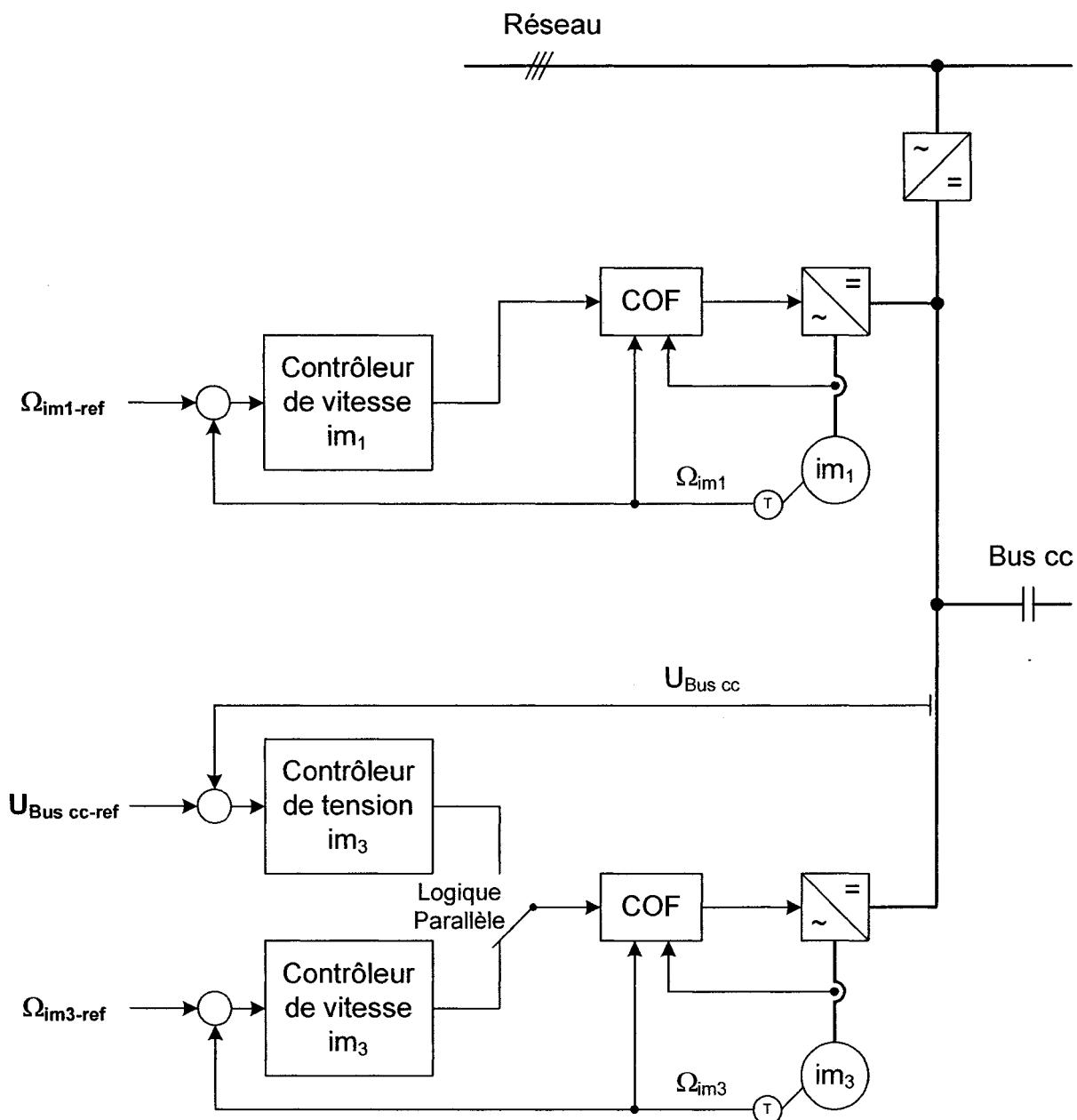


Figure H.1 : Nouvelle structure de commande.

### Structure des contrôleurs

Les structures des contrôleurs de vitesse utilisées précédemment sont présentées aux figures H.2 et H.3. De leur côté, les figures H.4 et H.5 exposent les nouvelles architectures des contrôleurs de vitesse du système de bobinage.

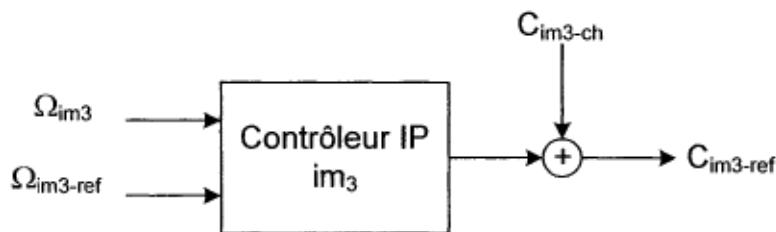


Figure H.2 : Structure du contrôleur de vitesse de l'enrouleur.

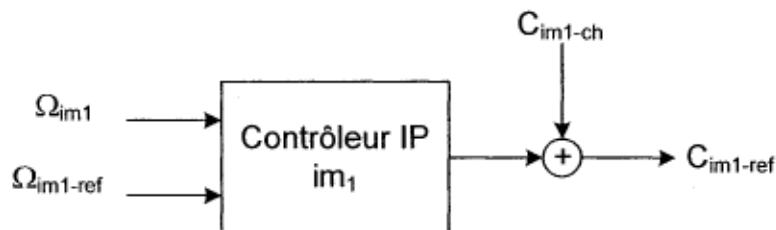


Figure H.3 : Structure du contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage.

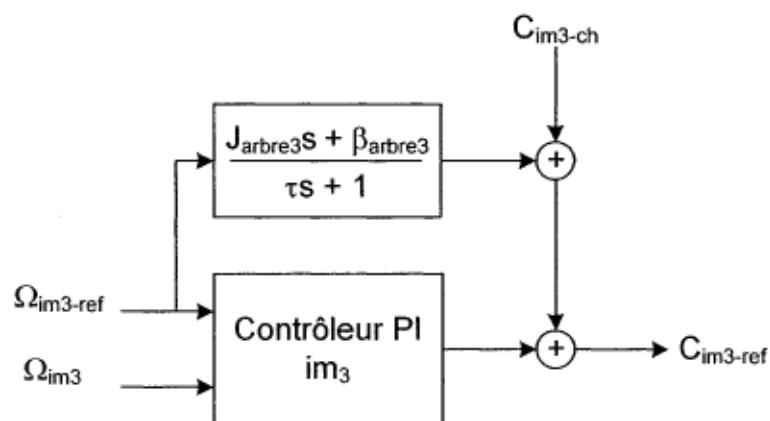


Figure H.4 : Nouvelle structure du contrôleur de vitesse de l'enrouleur.

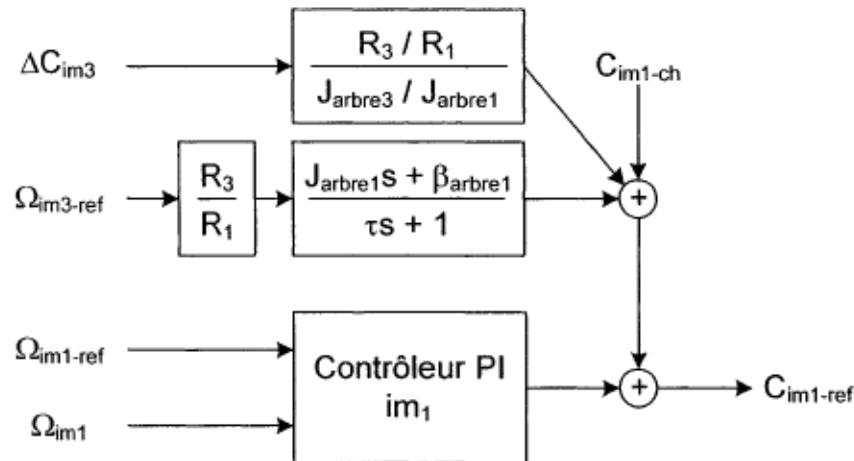


Figure H.5 : Nouvelle structure du contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage.

Ces nouvelles structures (figures H.4 et H.5) incorporent des contrôleurs PI au lieu de contrôleurs IP. Ce type de contrôleur permet d'être plus agressif lorsqu'il est attaqué par une consigne de type rampe, permettant ainsi de mieux suivre cette consigne.

L'enrouleur (figure H.4) est toujours commandé en vitesse de défilement linéaire à l'aide d'un contrôleur PI. De plus, une anticipation de la vitesse de consigne appliquée à un modèle approximatif de la machine a été ajoutée. Le développement de ce contrôleur est présenté à l'aide des équations suivantes.

Selon l'équation (2.13), le couple de la machine est donné par

$$C_{im} = \frac{\Omega_{im}(\tau s + 1)}{K_{arbre}} + C_{im-ch} \quad (H.1)$$

De plus, nous utilisons un contrôleur PI qui permet d'obtenir la fonction de transfert bouclée suivante (c.f. éq. (3.29)) :

$$\frac{y}{r} = \frac{K_p P(s)s + K_i P(s)}{(1 + K_p P(s))s + K_i P(s)} , \quad (H.2)$$

avec  $P(s) = \frac{K_{arbre}}{\tau s + 1} \approx \frac{0.985964}{J_{arbre}s + \beta} = \frac{0.985964}{J_{arbre}s}$  [Pochard-04].

Ainsi la fonction de transfert du système bouclé est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{y}{r} = \frac{\frac{K_p K_{arbre}}{J_{arbre}} s + \frac{K_i K_{arbre}}{J_{arbre}}}{s^2 + \frac{K_p K_{arbre}}{J_{arbre}} s + \frac{K_i K_{arbre}}{J_{arbre}}} . \quad (H.3)$$

Les gains intégral et proportionnel du contrôleur PI sont alors obtenus comme suit pour un amortissement de 0.7 :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i K_{arbre}}{J_{arbre}} \quad \Rightarrow \quad K_i = \frac{\omega_n^2 J_{arbre}}{K_{arbre}} \quad (H.4)$$

$$1.4\omega_n = \frac{K_p K_{arbre}}{J_{arbre}} \quad \Rightarrow \quad K_p = \frac{1.4\omega_n J_{arbre}}{K_{arbre}} . \quad (H.5)$$

La valeur de  $\omega_n$  est déterminé par (2.20).

De son côté, le contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage (figure H.5) est également remplacé par un contrôleur PI tout en ajoutant la consigne de vitesse de l'enrouleur dans l'anticipation. De plus, un terme d'anticipation contenant la variation du couple de consigne de l'enrouleur est

ajouté seulement pendant un creux de tension. Les gains des contrôleurs sont établis par les équations H.4 et H.5.

### Modélisation de la nouvelle structure de commande

Dans cette section, nous présentons la modélisation de la nouvelle structure de commande du système de bobinage réalisée sous Simulink. En effet, pour simplifier le nombre d'illustrations, nous exposons seulement les contrôleurs composant la structure de commande de l'enrouleur.

Mais, tout d'abord, voici la figure H.6 qui présente l'ensemble du modèle :

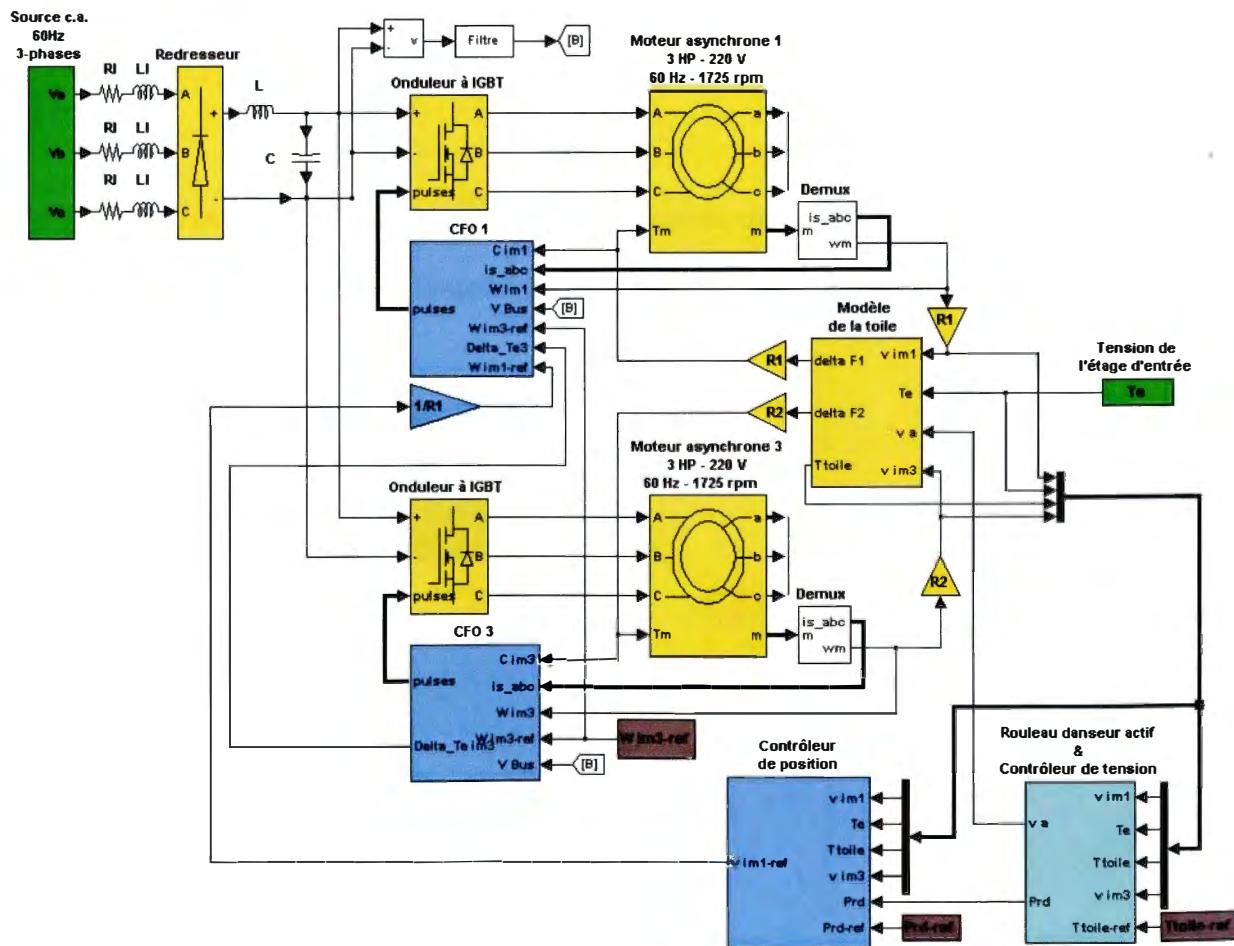


Figure H.6 : Modèle de la nouvelle structure de commande.

La figure suivante présente le contrôleur à flux orienté de l'enrouleur (CFO 3) :

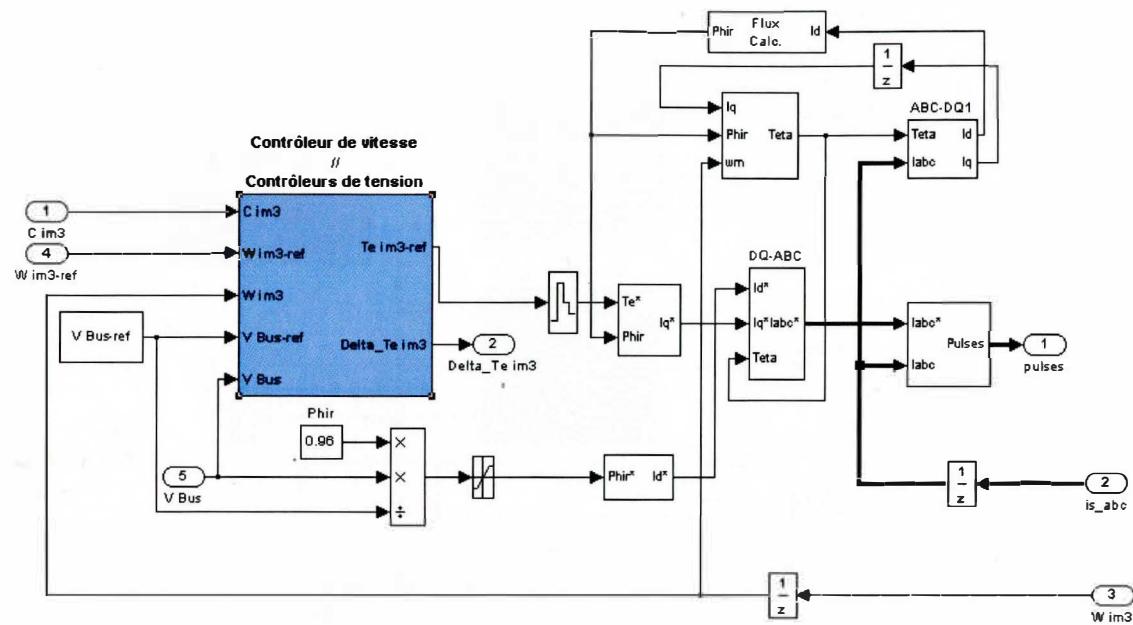


Figure H.7 : Contrôleur à flux orienté de l'enrouleur.

De son côté, la figure H.8 illustre la structure parallèle de commande de l'enrouleur qui permet d'asservir la tension sur le bus courant continu pendant les creux de tension.

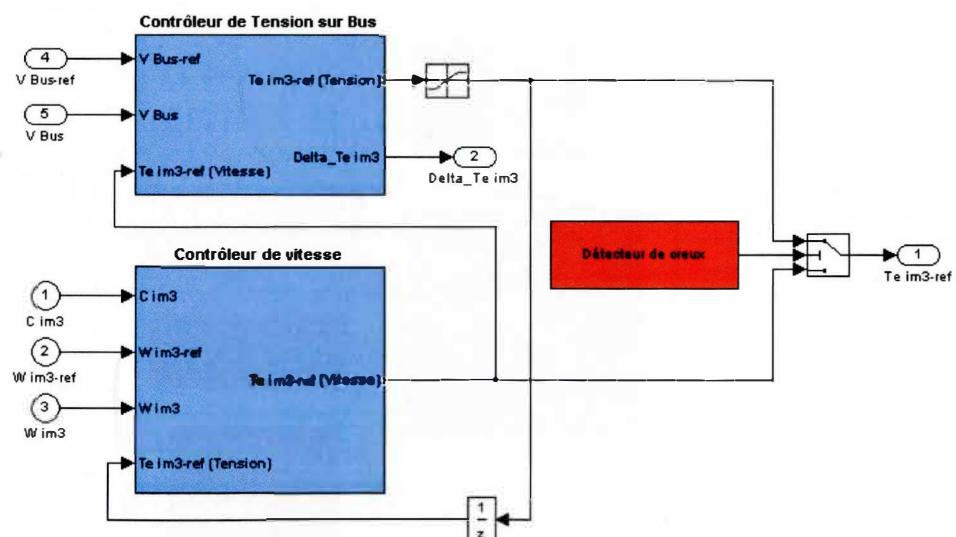


Figure H.8 : Structure parallèle de contrôle de l'enrouleur.

## ANNEXE H : NOUVELLE STRUCTURE DE CONTRÔLE DU SYSTÈME DE BOBINAGE

Le contrôleur de tension du bus cc de la structure parallèle de l'enrouleur est exposé à la figure H.9.

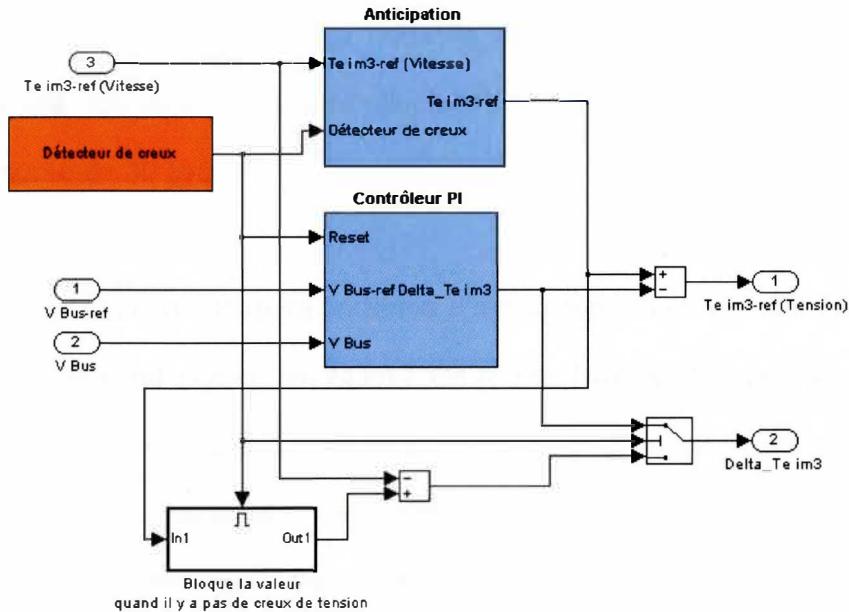


Figure H.9 : Contrôleur de tension de la structure parallèle de l'enrouleur.

Enfin, la figure H.10 montre le contrôleur de vitesse de la structure parallèle de l'enrouleur.

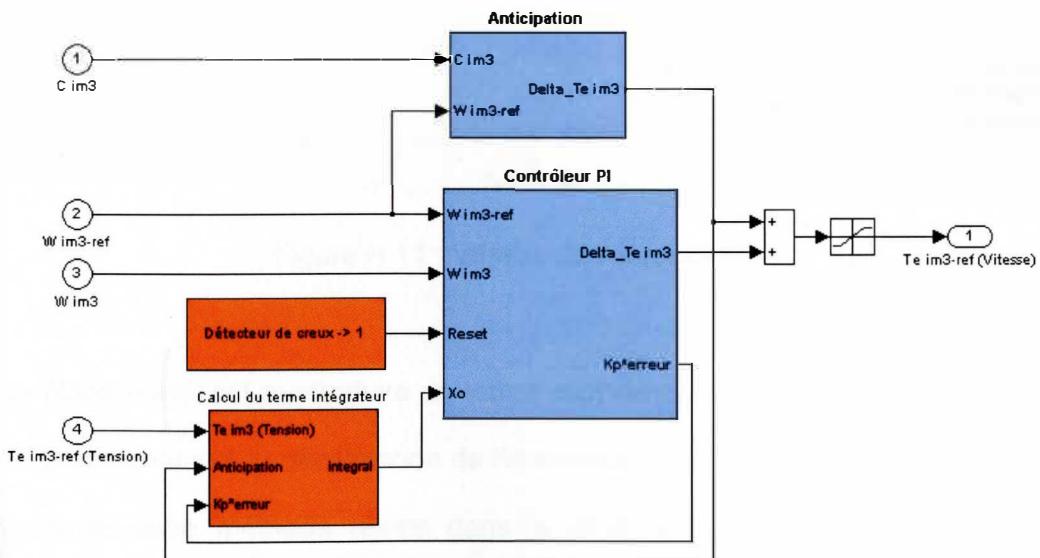


Figure H.10 : Contrôleur de vitesse de la structure parallèle de l'enrouleur.

### Résultats de simulations

Dans la section suivante, nous présentons les résultats de simulations obtenus pour les différentes étapes de la conception de la nouvelle structure de commande du système de bobinage. Notons que ces simulations sont effectuées pour des creux de tension de type A de 0.9 p.u. et d'une durée de 30 cycles.

La première étape consistait à introduire un terme d'anticipation dans les contrôleurs de vitesse de chacun des moteurs à inductions ( $im_1$  et  $im_3$ ). Ce terme d'anticipation est montré aux figures H.4 et H.5. L'avantage de l'incorporation de ce terme d'anticipation est exposé à la figure H.11. En effet, nous remarquons facilement que ce terme permet à l'enrouleur de bien suivre sa consigne lorsque cette dernière est de type *S* ou *rampe*. Il est à noter qu'il en est de même pour l'étage de pinçage.

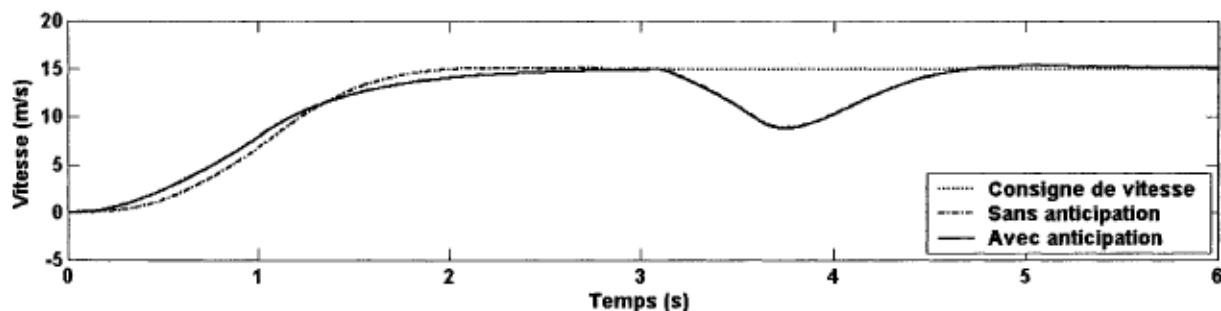
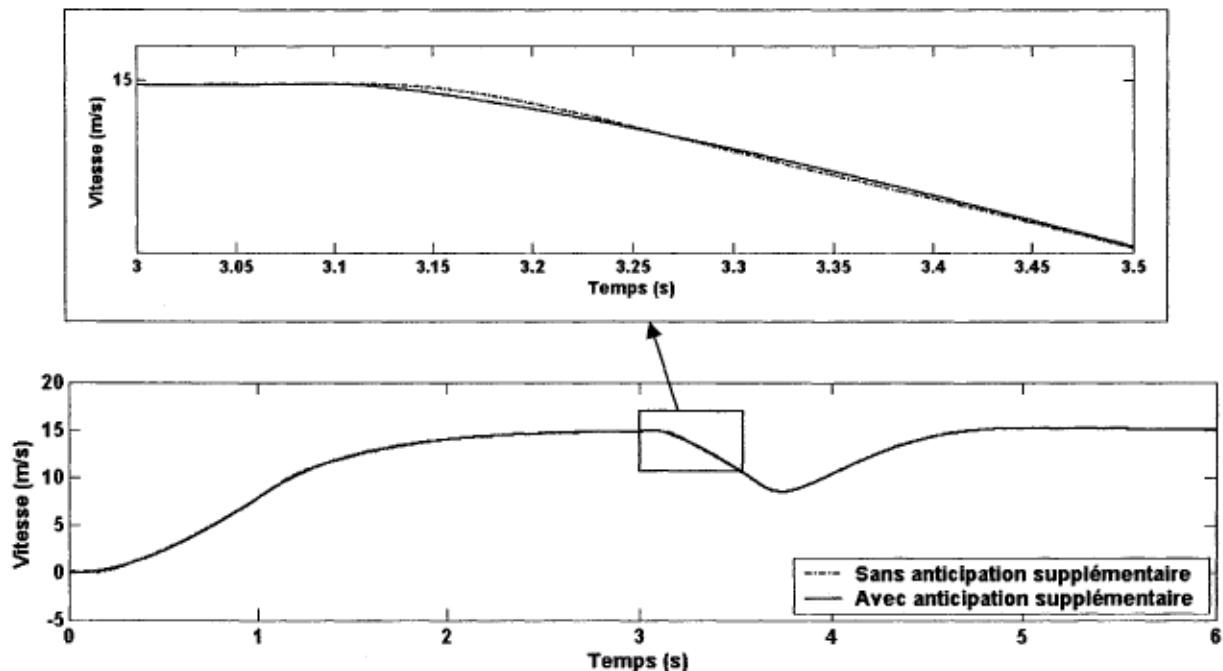


Figure H.11 : Vitesse de l'enrouleur.

La seconde étape consistait à introduire un terme supplémentaire dans l'anticipation de l'étage de pinçage, proportionnel à la décélération de l'enrouleur pendant les creux de tension (c.f. Fig. H.5). L'apport de cette méthode réside dans la diminution du temps de réaction lorsque

l'enrouleur ralentit pour récupérer de l'énergie et alimenter le bus courant continu. La figure H.12 illustre cette affirmation.



La dernière étape consistait à activer le terme supplémentaire d'anticipation de l'étage de pinçage non seulement pendant la décélération de l'enrouleur, mais également pendant sa réaccélération, c'est-à-dire durant une certaine période de temps après la disparition du creux de tension. Cette période de temps additionnelle correspond à la durée du creux de tension lui-même. Cette technique, tout comme la précédente, a pour objectif de diminuer l'écart de synchronisme entre l'enrouleur et l'étage de pinçage à la reprise du mode d'opération normal. La figure H.13 présente cet avantage sur la réponse en tension dans le matériau du système de bobinage.

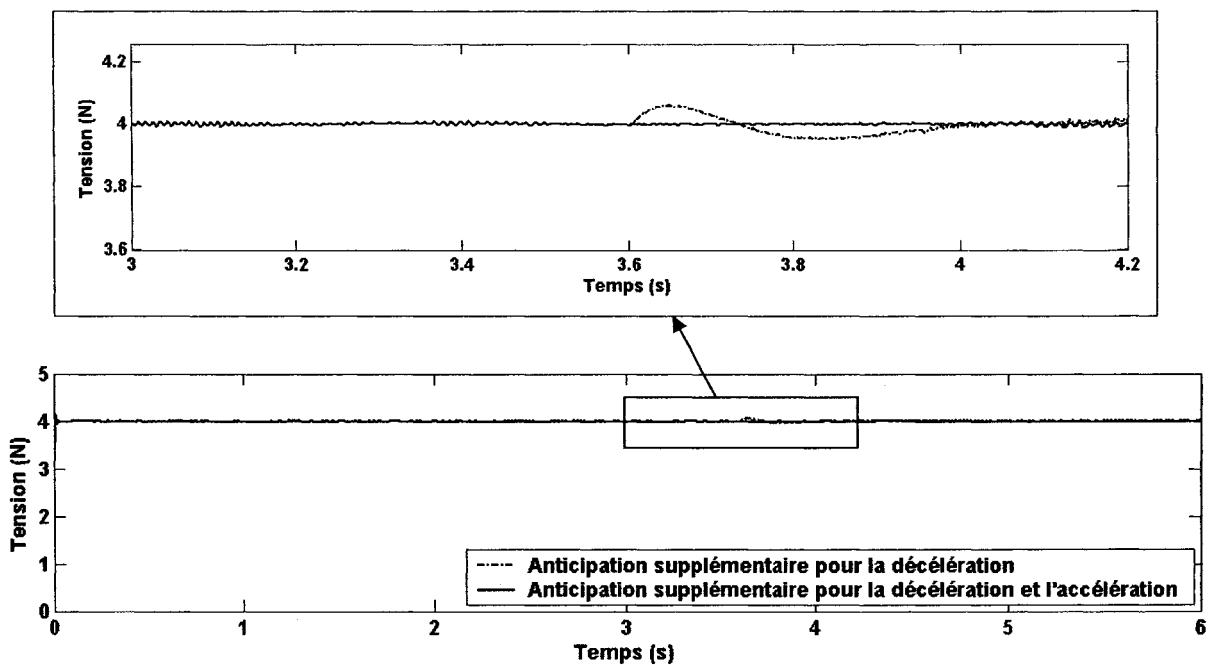


Figure H.13 : Effort de tension dans le matériau.

Alors, la figure H.13 illustre bien que la nouvelle structure de commande du système de bobinage est en mesure de garder un synchronisme constant entre l'étage de pinçage et l'enrouleur. En effet, la variation de l'effort de tension dans le matériau est nulle pour un creux de tension d'une durée de 30 cycles. Seule l'oscillation numérique du simulateur est notable.

#### Logique de gestion pendant les creux de tension

Tel que vu dans les sections précédentes, le contrôleur de vitesse de l'enrouleur est placé en parallèle avec un contrôleur d'asservissement de la tension sur le bus cc. Cette architecture parallèle permet une réponse rapide de la structure de récupération de l'énergie comparativement à une structure en cascade. Cependant, il faut bien gérer les contrôleurs lors

de la commutation afin d'éviter les discontinuités dans les signaux de commande. Cette gestion est réalisée à l'aide d'une logique qui détecte les creux de tension et qui ajuste les contrôleurs avant d'effectuer la commutation. Il en est de même pour les contrôleurs de l'étage de pinçage qui se voit ajouter un terme supplémentaire dans l'anticipation durant les creux de tension. La structure de la logique est présentée à la figure H.14.

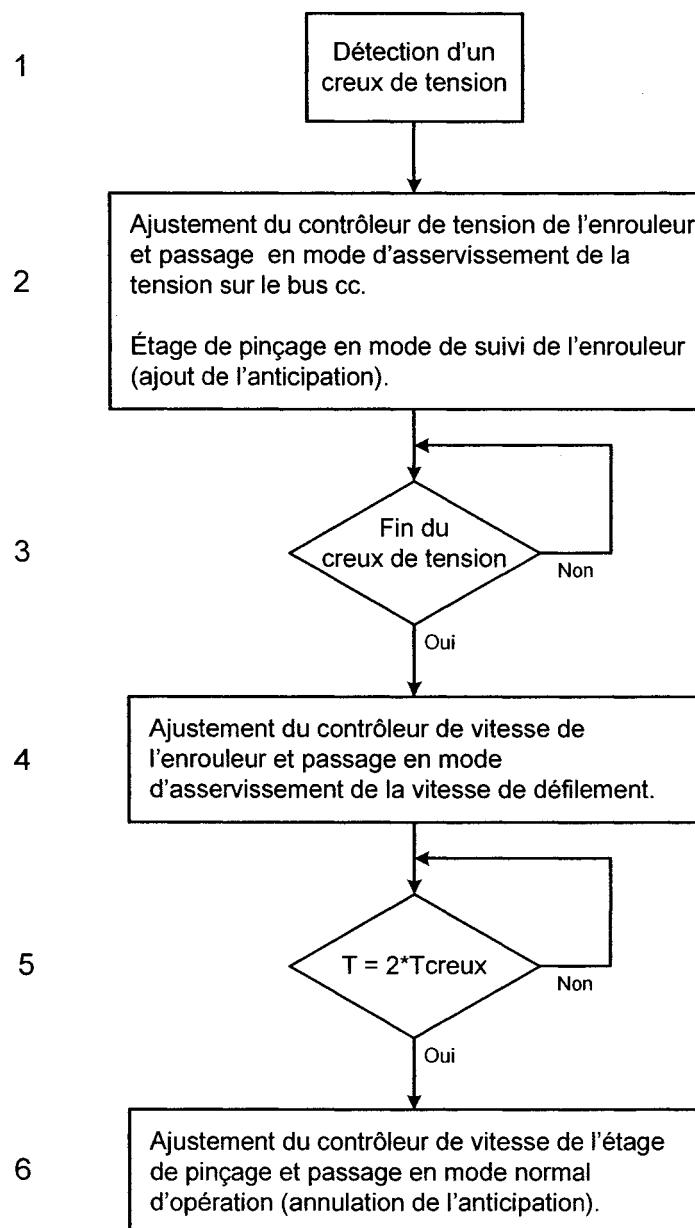


Figure H.14 : Logique de gestion durant les creux de tension.

Regardons plus en détails chacune des étapes de cette stratégie ainsi que les implications qu'elle provoque sur le système de bobinage :

1. La première étape consiste à détecter l'apparition d'un creux de tension sur l'alimentation électrique en utilisant, par exemple, un algorithme tel que décrit dans [Nanga-05b].
2. Ensuite, nous ajustons la valeur du contrôleur de tension de l'enrouleur afin que la sortie de ce dernier corresponde à la sortie de son contrôleur de vitesse. Ceci permet d'éviter les discontinuités dans le signal de commande. Nous basculons son interrupteur sur le mode d'asservissement de la tension sur bus courant continu. Pour le contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage, nous ajoutons un terme dans l'anticipation correspondant à un ratio de  $\Delta C_{im3}$ . Ce terme permet à l'étage de pinçage de suivre plus rapidement le ralentissement engendré par la récupération d'énergie de l'enrouleur et ainsi éviter certaines fluctuations dans l'effort de tension du matériau.
3. La troisième étape consiste à attendre que le creux de tension soit terminé.
4. Par la suite nous ajustons la valeur du contrôleur de vitesse de l'enrouleur afin que la sortie de ce dernier corresponde à la sortie de son contrôleur de tension. Nous basculons son interrupteur sur le mode d'asservissement de la vitesse linéaire. Donc, l'enrouleur revient en mode normal, mais l'étage de pinçage demeure toujours en mode poursuite et il réaccélère au même taux que l'enrouleur.

5. Après, nous attendons que le creux de tension soit terminé depuis une période de temps équivalente à celle du creux de tension. En effet, si le creux de tension a une durée de 30 cycles, nous attendons encore 30 autres cycles avant de passer à l'étape suivante.
  
6. Finalement, nous ajustons la valeur du contrôleur de vitesse de l'étage de pinçage afin que la sortie de ce dernier corresponde à sa propre sortie moins le terme supplémentaire de l'anticipation. Nous annulons ensuite ce terme dans l'anticipation.

### **Recommandations**

Cette nouvelle structure de commande proposée dans cette annexe permet de désensibiliser considérablement les systèmes de bobinage aux creux de tension lorsque nous pouvons remplacer les contrôleurs existants. Cependant, sous un certain seuil de tension sur le bus courant continu, les observateurs de flux des contrôleurs à flux orienté des moteurs à induction ( $im1$  et  $im3$ ) ne peuvent estimer certains paramètres correctement. C'est pourquoi il est recommandé d'instaurer un autre type d'observateur qui tiendrait compte de la tension d'alimentation des moteurs.

De plus, le modèle des moteurs utilisé n'est pas tout à fait représentatif de la réalité en mode transitoire. En effet, certains comportements ne sont pas pris en compte lorsque la machine passe du mode moteur au mode génératrice et vice-versa. Il devient alors difficile de récupérer rapidement l'énergie cinétique pour la transformer en énergie électrique dans la simulation. C'est pourquoi il est recommandé de valider le modèle de transition de la machine.