

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

NOURDINE EL OUARIACHI

MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN SYSTÈME
MULTI-MOTEUR EN PRÉSENCE
DE CREUX DE TENSION

Automne 2003

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.

RÉSUMÉ

Dans de nombreux procédés de fabrication continue comme l'industrie du papier, du textile, le bobinage et l'extrusion de plastique, les entraînements électriques sont fréquemment appelés à travailler en synchronisme, avec des tolérances souvent élevées pour assurer une qualité uniforme du produit et éviter les bris. Les creux de tension sont la cause principale d'arrêt d'un moteur dans un système multi-moteur ou la perte momentanée de synchronisme entre les moteurs peut causer un arrêt complet du système.

Dans ce travail nous allons développer un système d'entraînement constitué de deux entraînements ca avec un bus cc commun et qui sont couplés mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable. Le matériel transféré est caractérisé par ses propriétés élastiques et géométriques. Nous allons évaluer la réponse du système en présence des creux de tension, concevoir une loi de compensation des creux et évaluer l'efficacité de cette loi par simulation. Les systèmes considérés sont ceux qui peuvent supporter une baisse de vitesse mais pour lesquels le synchronisme est particulièrement important. Nous modéliserons les composants du système d'entraînement, qui permet d'émuler un système de production continue (bobinage ...), sous la forme de blocs fonctionnels et d'équations d'état. Le système va être modélisé sous *Power System Blockset*, et séparé sous RT-LAB et ARTEMIS pour la simulation rapide. Les résultats seront validés par simulation à l'aide de *Power System Blockset*.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ

TABLE DES MATIÈRES.....i

REMERCIEMENTS.....v

LISTE DES FIGURES.....vi

LISTE DES TABLEAUX.....xvii

LISTE DES SYMBOLES.....xviii

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....1

1.1 Problématique.....1

1.2 Objectifs.....3

1.3 Méthodologie.....4

CHAPITRE 2 : CREUX DE TENSION, SOURCES, EFFETS ET CARACTÉRISATION....6

2.1 Introduction.....6

2.2 Sources.....7

2.3 Types de creux de tension.....9

2.4 Effet des creux de tension sur les entraînements à vitesse variable ca.....14

2.5 Moyens de correction.....17

2.5.1 Modification des topologies des convertisseurs.....17

2.5.2 Utilisation d'une alimentation de soutien.....18

2.5.3 Installation des dispositifs de compensation.....19

2.5.4	Éléments de stockage sur l'entraînement à vitesse variable.....	19
2.5.5	SMES (<i>Superconducting magnetic energy storage</i>).....	20
2.5.6	Commande de systèmes.....	21
2.6	Caractérisation des effets des creux de tension.....	22
2.7	Conclusion.....	24
 CHAPITRE 3 : MODÉLISATION D'UN SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENTS		
	À VITESSE VARIABLE COUPLÉS.....	25
3.1	Structure du système étudié.....	25
3.2	Modélisation de la machine asynchrone.....	26
3.2.1	Introduction.....	26
3.2.2	Modèle mathématique de la machine asynchrone réelle.....	27
3.3	Commande vectorielle.....	32
3.3.1	Orientation du flux statorique.....	32
3.3.2	Orientation de flux rotorique.....	33
3.3.3	Orientation de flux d'entrefer.....	34
3.4	Développement du modèle de couplage mécanique.....	35
3.5	Loi de commande pour le système couplé.....	40
3.6	Séparation de modèle pour la simulation sur calculateurs multi-processeurs.....	44
3.6.1	Introduction.....	44
3.6.2	Méthode de séparation du modèle.....	45
3.6.3	Processus de séparation du modèle.....	47
3.6.4	Implantation sous RT-LAB/ARTEMIS.....	48
3.7	Conclusions.....	53

CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DES ENTRAÎNEMENTS À VITESSE VARIABLE EN PRÉSENCE DE CREUX DE TENSION.....	54
4.1 Introduction.....	54
4.2 Creux de tension.....	56
4.3 Effets des creux de tension sur un système EVV avec commande par orientation de flux.....	59
4.3.1 Résultats de simulations.....	61
4.3.1.1 Creux équilibré (type A).....	63
4.3.1.2 Creux déséquilibré de type B.....	65
4.3.1.3 Creux déséquilibré de type C.....	67
4.3.2 Analyse des résultats.....	69
4.4 Effet des creux de tension sur un système d'EVV couplés.....	71
4.4.1 Résultats de simulations.....	74
4.4.1.1 Creux équilibré (type A).....	77
4.4.1.2 Creux déséquilibré de type B.....	81
4.4.1.3 Creux déséquilibré de type C.....	86
4.4.2 Analyse des résultats.....	91
4.5 Proposition et évaluation d'une méthode de compensation des creux de tension sur un système d'EVV couplés.....	94
4.5.1 Logique de commande.....	95
4.5.2 Résultats de simulation.....	99
4.5.3 Analyse des Résultats.....	102
4.6 Conclusion.....	103

CHAPITRE 5 : CONCLUSION.....	105
RÉFÉRENCES.....	108
ANNEXE A Résultats de simulation d'un système d'EVV couplés en présence de creux de tension de type A.....	114
ANNEXE B Résultats de simulation d'un système d'EVV couplés en présence de creux de tension de type B.....	135
ANNEXE C Résultats de simulation d'un système d'EVV couplés en présence de creux de tension de type C.....	156
ANNEXE D Paramètres de simulation.....	177
ANNEXE E Caractéristiques des outils RT-LAB et ARTEMIS.....	179

REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible grâce au support financier du CRSNG et de la Chaire de Recherche Hydro-Québec sur la Puissance et l'Énergie Électrique. Les simulations ont été effectuées sur un système obtenu avec le support de la Fondation Canadienne d'Innovation, du Gouvernement du Québec, de Opal-RT Technologies inc. et du Japanese Research Institute.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, Mr. Pierre Sicard, pour son soutien technique, ses compétences, sa disponibilité, et son attitude disciplinaire tout au long de la réalisation de ce travail. De même, mes remerciements sont à mon codirecteur, Mr. Sylvain Lahaie.

Je remercie et dédie ce travail à tous les membres de ma famille, spécialement à mes parents et mes deux sœurs pour leurs patiences, leurs encouragements incessant, et leurs supports moral durant mes longues années d'étude.

Enfin, je le dédie à mes amis et à toute personne qui m'a aidé de près ou de loin tous le long de mon cheminement.

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Exemple d'un creux de tension sur une phase	7
Figure 2.2	Aperçu général des sources de creux de tension	9
Figure 2.3	Différents types de creux de tension	10
Figure 2.4	Système d'entraînement à vitesse variable ca	15
Figure 2.5	Variation de la tension du lien cc et des courants de lignes en présence de creux de tension sur la phase c seulement	16
Figure 2.6	Variation de la tension du lien cc et des courants de lignes en présence de creux de tension sur les trois phases	16
Figure 2.7	Ajout d'un convertisseur élévateur en parallèle pour la compensation de creux de tension	17
Figure 2.8	Alimentation de soutien pour la désensibilisation aux creux de tension.....	18
Figure 2.9	Schéma de principe d'un DVR.....	19
Figure 2.10	Schéma de principe des éléments de stockage	20
Figure 2.11	Schéma de principe d'un SMES.....	21
Figure 2.12	Importance des creux de tension mesurés dans une usine industrielle alimentée à partir d'un système 115-kV [Lamoree94].....	22
Figure 3.1.	Structure du système étudié.....	25
Figure 3.2	Représentation des enroulements de la machine asynchrone.....	28
Figure 3.3	Transformation d'axes (3phases)-(dq)	31

Figure 3.4	Modèle d'un entraînement à vitesse variable à ca sous PSB avec son contrôleur d'orientation de flux	36
Figure 3.5	Modèle complet du système d'entraînements à vitesse variable couplés sous PSB	36
Figure 3.6	Modèle du matériau entre R1 et R2	37
Figure 3.7	Modèle du couplage sous PSB	40
Figure 3.8	Structure générale de commande	41
Figure 3.9	Représentation de la structure générale de commande	41
Figure 3.10	Deux sous-systèmes couplés par un condensateur C	45
Figure 3.11	Séparation des deux systèmes pour simulation sur 2 processeurs	46
Figure 3.12	Modèle de découplage du processus de transfert du matériau	48
Figure 3.13	Architecture du modèle sous RT-LAB TM avec 2 CPU	49
Figure 3.14	Nœud d'acquisition.....	50
Figure 3.15	Nœud du modèle du système de puissance	50
Figure 3.16	Modèle Simulink du moteur 2.....	51
Figure 3.17	Modèle de séparation du moteur avec le lien cc	52
Figure 3.18	Modèle de séparation du moteur avec le modèle de couplage mécanique.....	52
Figure 4.1	Présentation des types étudiés de creux de tension	57
Figure 4.2	Variations des tensions de phase en présence de 90% de creux, de type A.....	58
Figure 4.3	Variations des tensions de phase en présence de 90% de creux, de type B.....	58
Figure 4.4	Variations des tensions de phase en présence d'un saut de phase de 50° de creux, de type C.....	59
Figure 4.5	EVV avec commande par orientation de flux sous PSB	60
Figure 4.6	Commande par orientation de flux sous PSB.....	61

Figure 4.7	Tension du lien cc dans un système d'EVV en présence de différents types de creux de tension, cas 3 et 4.....	62
Figure 4.8	Vitesse du moteur dans un système d'EVV en présence de différents types de creux de tension, cas 3 et 4.....	62
Figure 4.9	Tension du lien cc dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type A	64
Figure 4.10	Courant cc d'entrée dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type A	64
Figure 4.11	Vitesse du moteur dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type A	65
Figure 4.12	Tension du lien cc dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type B.....	66
Figure 4.13	Courant cc d'entrée dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type B.....	66
Figure 4.14	Vitesse du moteur dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type B.....	67
Figure 4.15	Tension du lien cc dans un système d'EVV simple en présence de 50° de saut de phase, de type C	68
Figure 4.16	Courant cc d'entrée dans un système d'EVV simple en présence de 50° de saut de phase, de type C	68
Figure 4.17	Vitesse du moteur dans un système d'EVV simple en présence de 50° de saut de phase, de type C	69
Figure 4.18	Modèle d'EVV couplés sous PSB.....	72
Figure 4.19	Modèle de la bande de matériau.....	72

Figure 4.20	Modèle du contrôleur du moteur 1	73
Figure 4.21	Modèle du contrôleur du moteur 2	74
Figure 4.22	Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de différents types de creux de tension	75
Figure 4.23	Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de différents types de creux de tension, cas 3 et cas 4	76
Figure 4.24	Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A	78
Figure 4.25	Courant cc d'entrée dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A	78
Figure 4.26	Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A	79
Figure 4.27	Vitesse des moteurs dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A	79
Figure 4.28	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type A	80
Figure 4.29	Ratio entre la valeur maximum du courant cc et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type A	80
Figure 4.30	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction du nombre de cycles de creux de tension, type A	81
Figure 4.31	Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type B	82
Figure 4.32	Courant cc d'entrée dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type B	82

Figure 4.33	Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type B	83
Figure 4.34	Vitesse des moteurs dans un système d'EVV couplé en présence de 50% de creux de tension, de type B	84
Figure 4.35	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type B	85
Figure 4.36	Ratio entre la valeur maximum du courant cc et la valeur nominale en fonction du creux de tension, type B	85
Figure 4.37	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction du nombre de cycle de creux de tension, type B.....	86
Figure 4.38	Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C	87
Figure 4.39	Courant cc d'entrée dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C	87
Figure 4.40	Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C.....	88
Figure 4.41	Vitesse des moteurs dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C.....	89
Figure 4.42	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction du creux de tension, type C	90
Figure 4.43	Ratio entre la valeur maximum du courant cc et la valeur nominale en fonction du creux de tension, type C	90
Figure 4.44	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de nombre du cycle de creux de tension, type C.....	91

Figure 4.45	Modification de la consigne de vitesse du moteur 2	96
Figure 4.46	Tension du lien cc, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A.....	99
Figure 4.47	Tension mécanique T, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A.....	100
Figure 4.48	Vitesse des moteurs, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A.....	100
Figure 4.49	Erreur de vitesse du moteur 2, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A	101
Figure 4.50	Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type A en utilisant la méthode de compensation de creux	101
Figure A.1	Résultats de simulation pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 1cycle	115
Figure A.2	Résultats de simulation pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 1cycle	116
Figure A.3	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 1cycle	117
Figure A.4	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 1cycle	118
Figure A.5	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 1cycle	119
Figure A.6	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 10 cycles.....	120

Figure A.7	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 10 cycles.....	121
Figure A.8	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 10 cycles.....	122
Figure A.9	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 10 cycles.....	123
Figure A.10	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 10 cycles.....	124
Figure A.11	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 20 cycles.....	125
Figure A.12	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 20 cycles.....	126
Figure A.13	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 20 cycles.....	127
Figure A.14	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 20 cycles.....	128
Figure A.15	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 20 cycles.....	129
Figure A.16	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 30 cycles.....	130
Figure A.17	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 30 cycles.....	131
Figure A.18	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 30 cycles.....	132

Figure A.19	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 30 cycles.....	133
Figure A.20	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 30 cycles.....	134
Figure B.1	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 1cycle.....	136
Figure B.2	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 1cycle.....	137
Figure B.3	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 1cycle.....	138
Figure B.4	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 1cycle.....	139
Figure B.5	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 1cycle.....	140
Figure B.6	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 10 cycles	141
Figure B.7	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 10 cycles	142
Figure B.8	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 10 cycles	143
Figure B.9	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 10 cycles	144
Figure B.10	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 10 cycles	145

Figure B.11	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 20 cycles	146
Figure B.12	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 20 cycles	147
Figure B.13	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 20 cycles	148
Figure B.14	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 20 cycles	149
Figure B.15	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 20 cycles	150
Figure B.16	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 30 cycles	151
Figure B.17	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 30 cycles	152
Figure B.18	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 30 cycles	153
Figure B.19	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 30 cycles	154
Figure B.20	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 30 cycles	155
Figure C.1	Résultats de simulation pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase de 10° de creux de tension de type C durant 1cycle	157

Figure C.2	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase de 20° de creux de tension de type C durant 1 cycle	158
Figure C.3	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 1 cycle	159
Figure C.4	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 1 cycle	160
Figure C.5	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 1 cycle	161
Figure C.6	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 10° de creux de tension de type C durant 10 cycles.....	162
Figure C.7	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 20° de creux de tension de type C durant 10 cycles.....	163
Figure C.8	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 10 cycles.....	164
Figure C.9	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 10 cycles.....	165
Figure C.10	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 10 cycles.....	166
Figure C.11	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 10° de creux de tension de type C durant 20 cycles.....	167
Figure C.12	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 20° de creux de tension de type C durant 20 cycles.....	168
Figure C.13	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 20 cycles.....	169

Figure C.14	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 20 cycles.....	170
Figure C.15	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 20 cycles.....	171
Figure C.16	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 10° de creux de tension de type C durant 30 cycles.....	172
Figure C.17	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 20° de creux de tension de type C durant 30 cycles.....	173
Figure C.18	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 30 cycles.....	174
Figure C.19	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 30 cycles.....	175
Figure C.20	Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 30 cycles.....	176
Figure E.1	Schéma bloc du système. [Opal]	180

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Performance de simulation.	53
Tableau 4.1	Caractéristiques des tests	59
Tableau 4.2.	Caractéristiques des tests pour un système d'EVV couplés	71
Tableau 4.3	Valeur RMS de la variation de la tension du lien cc, cas 1	97
Tableau 4.4	Variation relative de la tension mécanique T, cas 1	98
Tableau 4.5	Valeur RMS de la variation de la tension du lien cc, cas 2	98
Tableau 4.6	Variation relative de la tension mécanique T, cas 2	98

LISTE DES SYMBOLES

E	Module d'Young
i_{ar}	Courant dans la phase a du rotor
i_{as}	Courant dans la phase a du stator
i_{br}	Courant dans la phase b du rotor
i_{bs}	Courant dans la phase b du stator
i_{cr}	Courant dans la phase c du rotor
i_{cs}	Courant dans la phase c du stator
i_{dr}	Composante directe du courant rotorique
i_{ds}	Composante directe du courant statorique
i_{qr}	Composante en quadrature du courant rotorique
i_{qs}	Composante en quadrature du courant statorique
i_c	Courant du lien cc
J	Moment d'inertie
K	Constante de rigidité équivalente du matériau
L_{rr}	Inductance propre d'un enroulement rotorique
L	Longueur du matériau
L_{ss}	Inductance propre d'un enroulement statorique
T_{L1}	Couple de charge du moteur 1
T_{L2}	Couple de charge du moteur 2

M	Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques
M_1	Moteur 1
M_2	Moteur 2
P	Pression sur le matériau
$pp.$	Nombre de paires de pôles de la machine
Q	Quantité du matériau
r_1	Rayon du rouleau 1
r_2	Rayon du rouleau 2
R_1	Rouleau 1
R_2	Rouleau 2
S	Section du matériau
T_{em}	Couple électromagnétique produit par la machine
T	Tension dans le matériau
T_L	Couple de charge
T_e	Tension d'entrée du premier rouleau
T_s	Tension de sortie du deuxième rouleau
T_{ref}	Tension de référence
V_c	Tension du lien cc
w_{ref}	Vitesse de référence
Ω_1	Vitesse angulaire du moteur 1
Ω_2	Vitesse angulaire du moteur 2
ΔQ	Variation de la quantité du matériau
ΔL	Variation de la longueur L

CHAPITRE 1:

INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE

Dans de nombreux procédés de fabrication continue comme l'industrie du textile, de la pétrochimie, du bobinage, du laminage, de l'extrusion de plastic, etc., les entraînements électriques sont omniprésents et sont fréquemment appelés à travailler en synchronisme, avec des tolérances souvent élevées pour assurer une qualité uniforme du produit et éviter les bris. Les sources potentielles de bris ou de dégradation des produits sont diverses : performances dynamiques du contrôleur, variation des propriétés des produits d'entrée, perturbation des conditions d'opération, etc. Les creux de tension, définis par la norme IEEE 1159 [IEEE95] comme une baisse de 0.1 à 1 p.u. de la tension RMS pour une durée variant de 0.5 cycle à 1s,

sont la cause principale d'arrêts et de pertes de production dans de nombreuses industries [Duran99], [Jouanne99]. Ils sont principalement causés par des défauts sur le réseau de transmission, de distribution ou de l'usine et par le démarrage de charges motrices importantes en industrie [Zyl98].

Suite à l'apparition d'un creux de tension, les systèmes de protection peuvent immédiatement commander le délestage de charges (arrêt), le courant d'appel élevé requis pour maintenir le niveau de transfert de puissance peut causer une surintensité, ou une surtension peut être causée au niveau du lien cc dans les entraînements de moteurs à ca [Duran99], [Zyl98], [Strangas96]. L'étude [Strangas96] conclut que le facteur prépondérant d'insensibilité des systèmes d'entraînement aux creux de tension est la logique du contrôleur et non les caractéristiques du matériel. L'arrêt d'un moteur dans un système multi-moteur ou la perte momentanée de synchronisme entre moteurs peut compromettre le procédé en entier et requérir un arrêt complet. De plus, la mise hors service de charges motrices suite à un creux de tension a plusieurs répercussions. Par exemple, pour les moteurs à ca, une perte de synchronisme avec le flux est tel que la ré-accelération se fait avec des courants d'appel élevés, avec un facteur de puissance faible et en un temps très long, causant la prolongation du creux de tension. Une procédure de réarmement est donc nécessaire.

Pour réduire les pertes de production et dans certains cas limiter les courants élevés requis pour redémarrer les moteurs après un creux de tension, des équipements et stratégies ont été développés pour maintenir les entraînements en marche pendant des creux de tension de courte et de longue durée. Les solutions sont variées et de coûts fort variables [Jouanne99], [Zyl98] : modification de la logique de protection pour éviter un arrêt prématuré; utilisation de sources

d'énergie d'appoint; modification de la structure des convertisseurs de puissance [Duran99], [Zyl98]; utilisation de l'énergie cinétique des machines tournantes pour maintenir le synchronisme avec le flux de la machine pour en permettre une ré-accélération efficace [Strangas96], [Holtz94].

Les systèmes d'entraînement ca sont le plus souvent interfacés au réseau électrique par un redresseur à diodes. Pendant un creux de tension, certaines phases sont inactives et un appel plus fort de courant est requis des autres pour maintenir le transfert de puissance. De plus, dans le cas d'une baisse de tension sur les 3 phases, le pont redresseur est bloqué et le moteur décélère à un taux qui est fonction de la charge entraînée. Dans ce cas, pour un système multi-moteur, même si les entraînements étaient maintenus en fonction, il y aurait perte de synchronisme, à moins qu'un des moteurs ne puissent servir de génératrice pour établir un réseau local.

1.2 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce travail est de développer un modèle d'un système d'entraînement constitué de deux entraînements ca avec bus cc commun et qui sont couplés mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable, et de contribuer au développement de méthodes de commande en présence de creux de tension pour assurer le maintien du synchronisme entre eux. Pour atteindre cet objectif nous définissons le sous-objectif suivant : caractériser les effets des creux de tension pour un système d'entraînements couplés mécaniquement.

1.3 MÉTHODOLOGIE

Dans ce travail nous allons développer un système d'entraînement constitué de deux entraînements ca avec un bus cc commun et qui sont couplés mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable. Le matériel transféré est caractérisé par ses propriétés élastiques et géométriques. Nous allons évaluer la réponse du système en présence des creux de tension de types A, B et C [Bollen97], concevoir une loi de compensation des creux et évaluer l'efficacité de cette loi par simulation. Les systèmes considérés sont ceux qui peuvent supporter une baisse de vitesse mais pour lesquels le synchronisme est particulièrement important. Nous modéliserons les composants du système d'entraînement, qui permet d'émuler un système de production continue (bobinage ...), sous la forme de blocs fonctionnels et d'équations d'état. Le système est modélisé sous *Power System Blockset*, et séparé sous RT-LAB et ARTEMIS pour la simulation rapide. Les résultats sont validés par simulation à l'aide de *Power System Blockset*.

Le chapitre 2 présente une étude générale sur les creux de tension. Nous présentons les sources et les types de creux de tension. Ensuite, nous exposons les effets et les moyens de correction des creux de tension sur les entraînements à vitesse variable. Finalement nous présentons les caractérisations des effets des creux de tension.

Le chapitre 3 présente la modélisation d'un système d'entraînements à vitesse variable couplés. On commence par la structure du système étudié, puis on aborde la séparation de modèle pour la simulation sur calculateurs multi-processeurs.

Le chapitre 4 décrit les caractérisations des entraînements à vitesse variable couplés en présence de creux de tension, avec et sans contrôle de la tension. Ce chapitre présente aussi la description de la méthode de compensation des creux et les résultats obtenus.

Le chapitre 5 conclut le mémoire en présentant les contributions, les recommandations et les limites du travail.

CHAPITRE 2 :

CREUX DE TENSION - SOURCES, EFFETS ET CARACTÉRISATION

2.1 INTRODUCTION

L'amplitude de la tension est un paramètre essentiel de la qualité de l'électricité. Dans certains cas, l'amplitude peut diminuer fortement, voire tomber à zéro. De manière à caractériser les creux de tensions, deux paramètres sont pris en compte: la durée et la profondeur.

Un creux de tension est défini comme une baisse soudaine de la tension efficace (RMS) sous le seuil des 90% de la valeur nominale, suivie d'un retour à une valeur supérieure à 90% dans un temps variant entre 10 msec et 60 sec. En général, les creux de tension sont attribuables à des

forts appels de courant (court-circuit, démarrage des gros moteurs, etc....) dus à des défauts dans le réseau ou dans les installations des clients. La foudre est aussi une cause fréquente. Il s'agit d'évènements aléatoires et imprévisibles pour la plupart. La figure 2.1 montre l'exemple d'un creux de tension sur une seule phase.

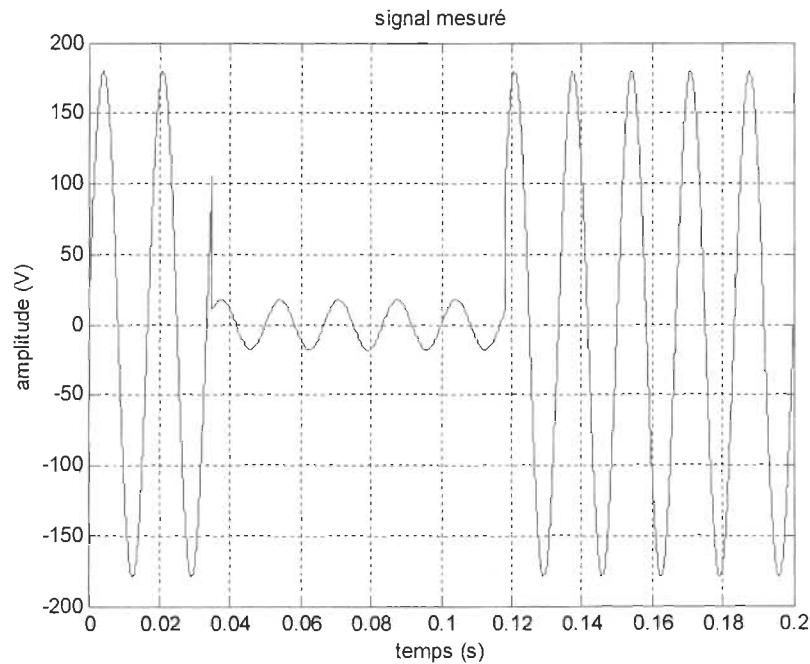


Figure 2.1 : Exemple d'un creux de tension sur une phase

2.2 SOURCES

Les creux de tensions sont dus à des défauts d'isolement dans les réseaux de distribution. Ils peuvent alors être causés par des facteurs internes ou externes (neige sur les lignes, tempêtes, grues qui arrachent les câbles, ...).

Les facteurs internes correspondent à des défaillances. Ils seront influencés par la nature du réseau (aérien ou souterrain) ainsi que par le niveau de tension. Ils peuvent affecter une, deux ou

les trois phases.

Les défauts peuvent être auto-extincteurs, fugitifs (qui s'éliminent après fonctionnement des protections) ou permanents lorsqu'ils entraînent une coupure. Ils peuvent aussi être intermittents.

Les défauts entraînent une variation brutale de la valeur de la tension ainsi qu'un courant de court-circuit. Ce courant, qui peut avoir des conséquences dramatiques, doit être éliminé dans les plus brefs délais. Des disjoncteurs isoleront la partie saine du réseau de celle touchée par le défaut.

Lorsqu'une coupure est générée sur un réseau en antenne, tous les clients connectés en aval sont victimes de la coupure. Dans les réseaux bouclés, les dégâts se limitent le plus souvent à un creux de tension. Selon le type de connexion des transformateurs (Y-D, Y-Y, ...), le nombre de phases affectées peut varier selon que l'on est au primaire ou au secondaire du transformateur.

Les creux de tension peuvent aussi être créés du côté du client. L'enclenchement d'une charge importante peut être la cause d'un creux si la puissance de court-circuit (S_{cc}) est trop faible. À côté des défauts réels, les moteurs importants, les transformateurs et les bancs de capacités sont les générateurs de creux les plus fréquents. L'influence de ces pollueurs peut croître rapidement selon le nombre de clients connectés au même jeu de barres.

La figure 2.2 donne un aperçu général des sources de creux de tension en fonction de leur durée.

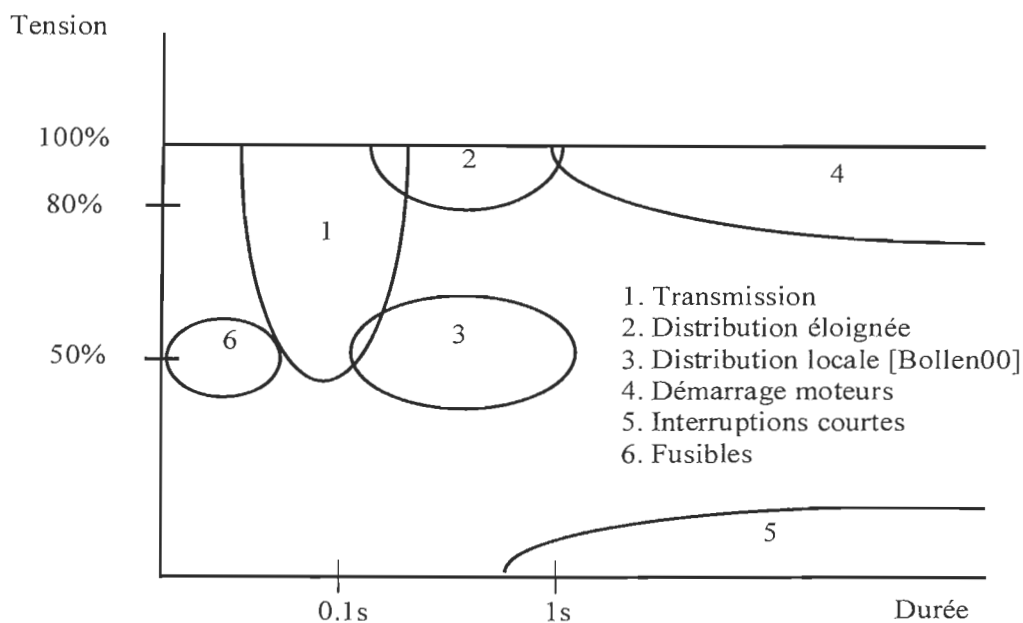


Figure 2.2 : Aperçu général des sources de creux de tension [Bollen00]

2.3 TYPES DE CREUX DE TENSION

Les creux de tension peuvent être soit équilibrés ou déséquilibrés. Les creux de tension sont équilibrés lorsque la diminution de la tension est la même dans chaque phase, par contre si la diminution de la tension est différente sur chacune des trois phases ou le déphasage est autre que 120 degrés, le creux est dit déséquilibré. Selon Bollen [Bollen99], il existe sept types de creux de tension. Ils sont illustrés dans la figure 2.3.

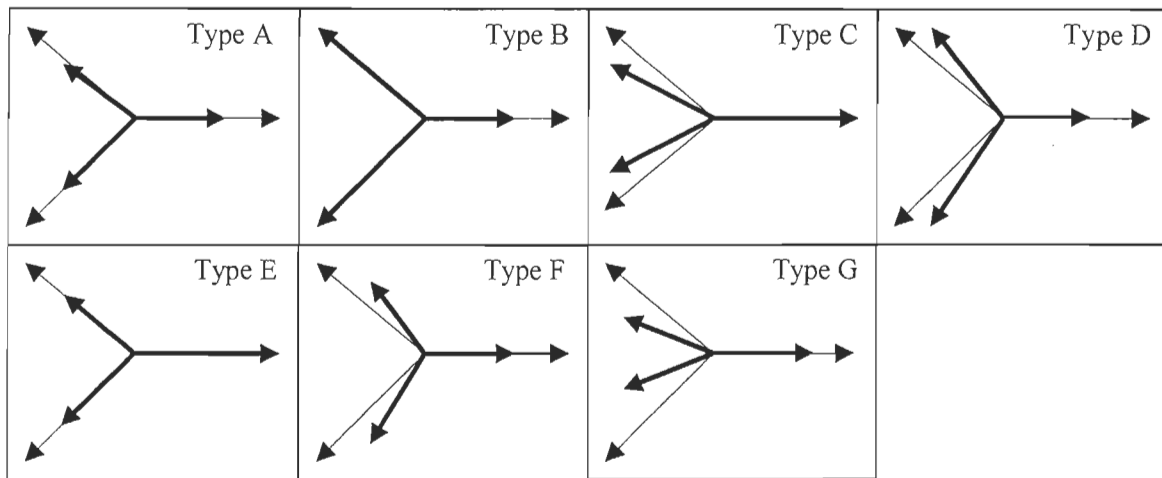


Figure 2.3 : Différents types de creux de tension

2.3.1- Type A

Ce type de creux de tension est causé par des défauts sur les trois phases simultanément; les amplitudes des phases sont identiques, le transfert à un transformateur triphasé n'affectera pas le phaseur à cause de sa symétrie, un seul type de creux lui est associé. Le creux de tension de type A peut être défini par les équations suivantes :

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

2.3.2- Type B

Ce type de creux de tension est provoqué par des défauts entre une phase et la terre; seule une phase a une amplitude différente, les deux autres phases ont des amplitudes identiques. Le creux de tension de type B peut être défini par les équations suivantes :

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

2.3.3- Type C

Ce type de creux de tension est causé par des défauts de phase à phase; les deux phases concernées changent d'angle de déphasage qui est inférieur à 120°. C'est aussi un creux de type B avec le transformateur triphasé connecté en triangle-étoile. Le creux de tension de type C peut être défini par les équations suivantes :

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

2.3.4- Type D

C'est un creux de type C avec un transformateur triphasé de connexion triangle-étoile ou de type B avec deux connexions triangle-étoile. Le type D de fléchissement de tension peut être défini par l'ensemble des équations suivantes :

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

2.3.5- Type E

Ce type de creux est causé par des défauts de deux phases et neutre ; les deux phases ont des amplitudes affectées et une phase reste intacte. Le creux de tension de type E peut être défini par l'ensemble des équations suivantes :

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

2.3.6- Type F

C'est un creux de type E après un transformateur triphasé connecté en triangle-étoile. Le creux de tension de type F peut être défini comme suit :

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

2.3.7- Type G :

C'est de type E après deux connexions triangle-étoile. Le creux de tension de type G peut être défini par l'ensemble des équations suivantes :

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

Le type de charge et les différentes configurations des transformateurs (étoile-triangle, étoile-étoile, triangle-étoile, etc...) influencent les creux de tension. Dans notre travail, nous allons nous

limiter sur le traitement des creux de tension de types A, B, et C. Ces trois types de creux représentent bien qualitativement l'ensemble des creux de tension recensés.

2.4 EFFETS DES CREUX DE TENSION SUR LES ENTRAÎNEMENTS À VITESSE VARIABLE CA

L'équipement industriel peut être particulièrement sensible aux problèmes dus aux creux de tension. Les équipements étant le plus souvent interconnectés, un des composants d'un procédé peut entraîner l'arrêt complet d'une usine.

L'apparition d'un creux de tension dans un réseau peut avoir des effets et des répercussions désastreux sur l'équipement. On peut citer la perte de vitesse (et parfois un arrêt complet), la réduction de la puissance et la surchauffe des moteurs, les pertes de contrôle des procédés industriels et le déclenchement des protections dans les usines, la perte de mémoire dans des ordinateurs, etc. Tous ces problèmes entraînent évidemment des retombées économiques importantes; on parle de l'augmentation des frais d'entretien, des temps d'arrêt qui occasionnent les pertes économiques pour de nombreuses compagnies et l'augmentation des dépenses d'opération.

La figure 2.4 montre une topologie typique d'un entraînement à vitesse variable, qui se compose d'un redresseur à diodes triphasé, d'un lien cc, et d'un onduleur IGBT. Les diodes D1 à D6 forment les diodes de redresseur, L_s représente l'inductance de la source et L_d représente l'inductance du lien cc.

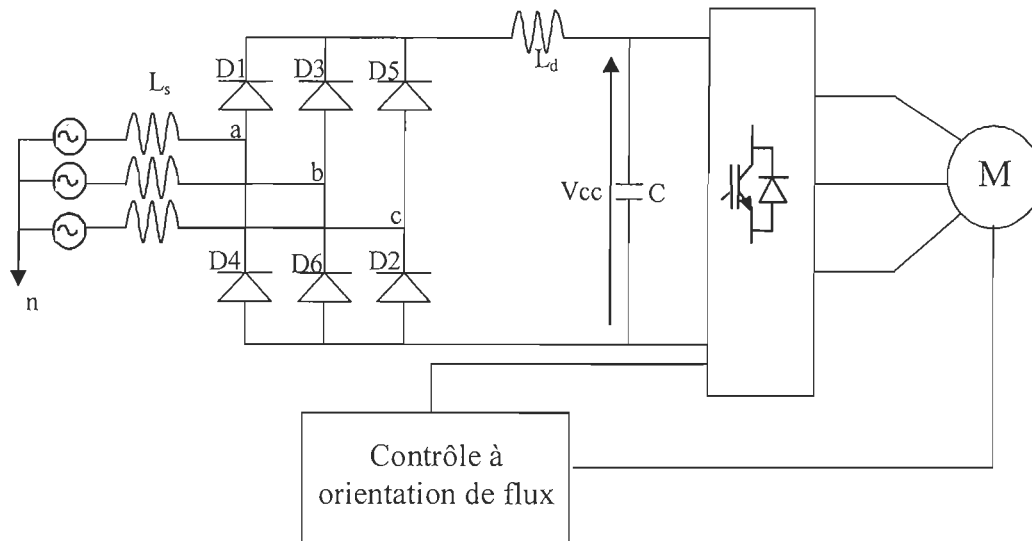


Figure 2.4 : Système d'entraînement à vitesse variable ca

En présence de creux de tension sur une seule phase, soit par exemple sur la phase c, les diodes de redresseur D_5 et D_2 cessent de conduire et le courant de ligne dans la phase c atteint zéro (figure 2.5), donc le redresseur triphasé se comporte comme un redresseur monophasé en présence de creux de tension sur une phase. Par contre le redresseur se bloque en présence de creux sur les trois phases (figure 2.6). Les données utilisées dans la simulation sont présentées dans la section D.1 de l'annexe D. Un creux de tension de 90% pour une durée de 10 cycles est appliqué.

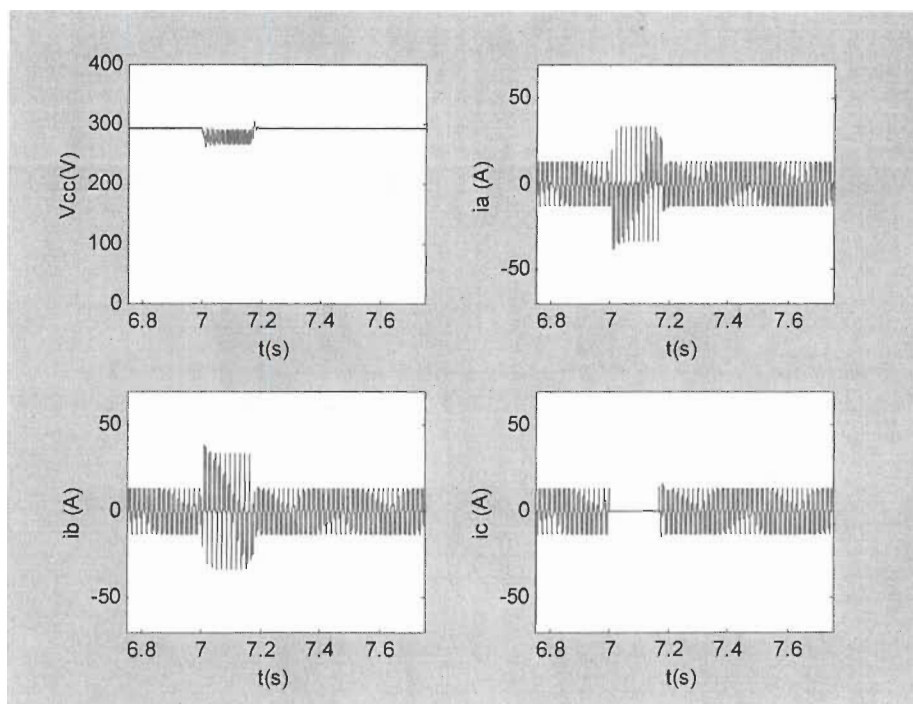


Figure 2.5 : Variation de la tension du lien cc et des courants de lignes en présence de creux de tension sur la phase c seulement.

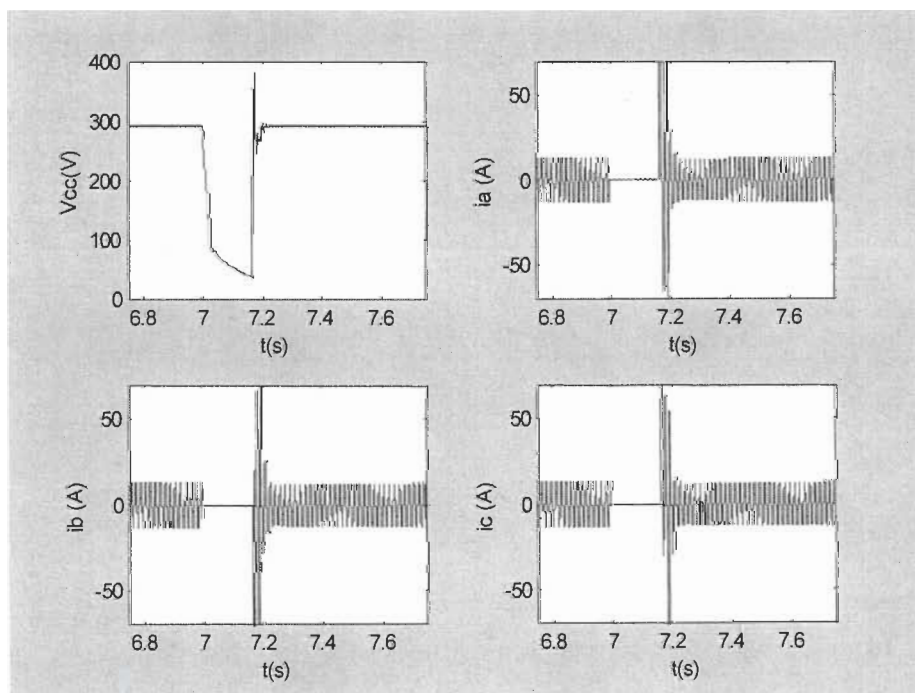


Figure 2.6 : Variation de la tension du lien cc et des courants de lignes en présence de creux de tension sur les trois phases.

2.5 MOYENS DE CORRECTION

Plusieurs solutions [Jouanne99] ont été envisagées pour réduire ou compenser les creux de tension. On peut les classer comme suit [Sicard01].

2.5.1 Modification des topologies des convertisseurs

Lorsque survient un creux de tension dans le réseau, on peut modifier la topologie du convertisseur afin que la charge ne subisse aucun effet de la baisse de tension [Jouanne99]. Il s'agit tout simplement de maintenir la tension du bus continu dans les limites qui permettent à la charge de fonctionner normalement. Un exemple de modification est présenté à la figure 2.7.

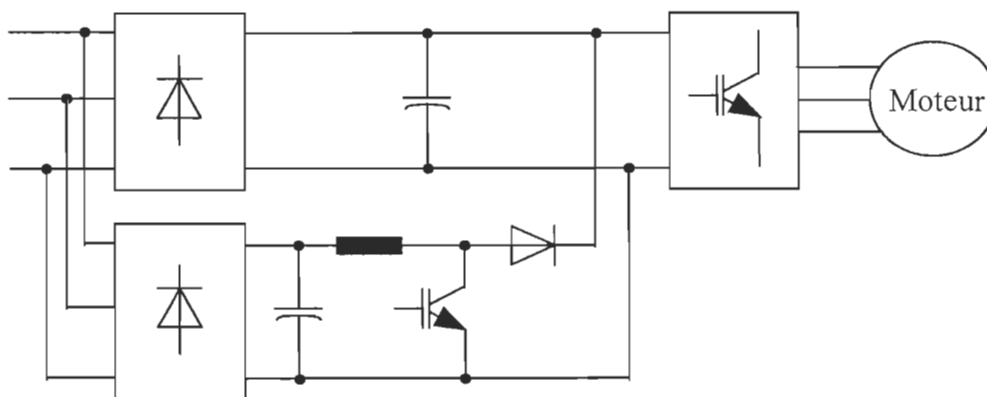


Figure 2.7 : Ajout d'un convertisseur élévateur en parallèle pour la compensation de creux de tension

Dans cet exemple on utilise un élévateur de tension (*boost converter*) qu'on active lorsqu'apparaît un creux de tension. Il permet de réguler la tension dans le bus cc. Les

inconvénients majeurs de ce type de correction sont le coût et l'encombrement associés à l'ajout du convertisseur auxiliaire. Celui-ci devra être conçu pour fournir le courant requis pendant les creux de tension. La compensation de creux de grande amplitude requerra un convertisseur avec une forte capacité en courant.

2.5.2 Utilisation d'une alimentation de soutien

On parle d'alimentation de type UPS (Uninterruptible Power Supply). Cette solution est largement utilisée en industrie parce qu'elle offre une plus grande autonomie et peut être efficace même en l'absence totale de la tension. Un exemple d'une alimentation de soutien est présenté dans la figure 2.8. Les inconvénients majeurs de cette solution sont son coût et son encombrement.

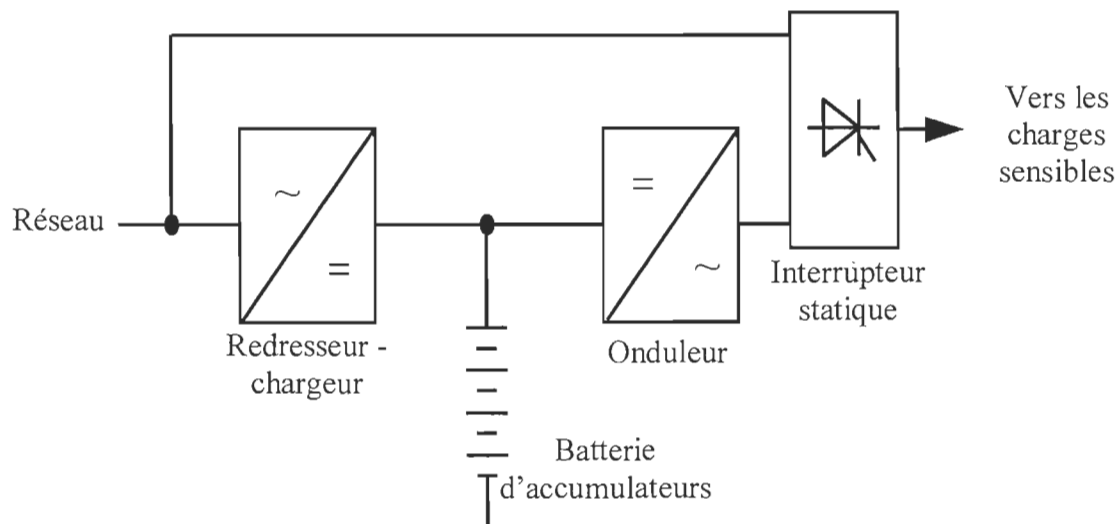


Figure 2.8 : Alimentation de soutien pour la désensibilisation aux creux de tension

2.5.3 Installation de dispositifs de compensation

Il s'agit d'installer dans le réseau de distribution, un système qui apporte une tension additionnelle à celle du réseau en présence de creux de tension. Dans la littérature, ils sont connus sous le nom de DVR pour *Dynamic Voltage Restorer* ou encore compensateurs statiques. Le schéma de principe est présenté sur la figure 2.9. Ces dispositifs ont besoin d'être équipés d'accumulateurs d'énergie afin de compenser d'éventuels creux. La profondeur et la durée du creux qu'on peut compenser sont conditionnées par la quantité d'énergie emmagasinée. L'inconvénient majeur de cette solution est que les appareils de stockage d'énergie sont coûteux.

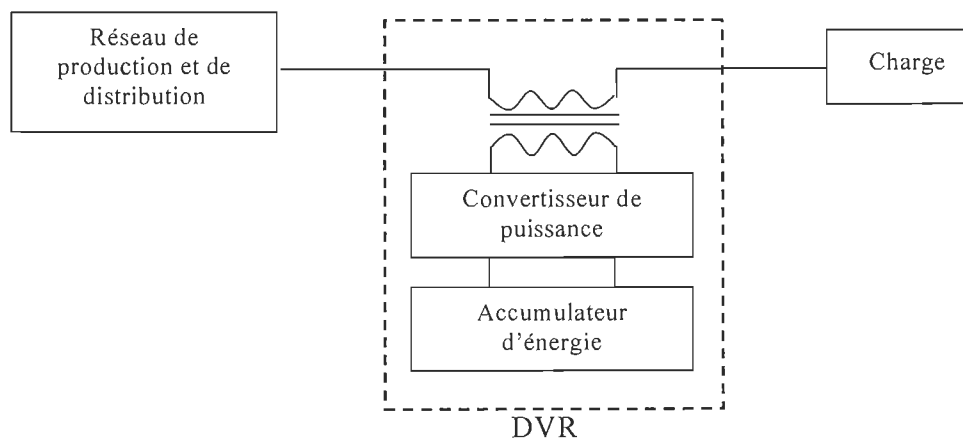


Figure 2.9 : Schéma de principe d'un DVR

2.5.4 Éléments de stockage sur l'entraînement à vitesse variable

Il s'agit d'un ensemble moteur-générateur : un moteur électrique entraîne un générateur synchrone dont la sortie est constante à 60 Hz. La figure 2.10 présente un principe des éléments

de stockage. L'inconvénient majeur de cette solution est l'exigence d'un ajout de matériel et l'entretien des éléments mobiles.

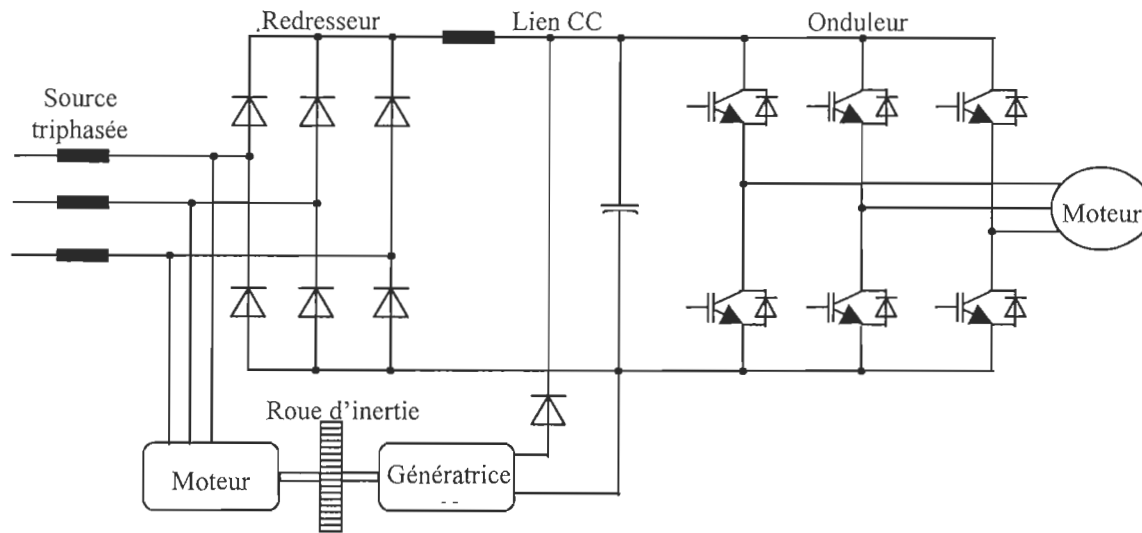


Figure 2.10 : Schéma de principe des éléments de stockage

2.5.5 SMES (*Superconducting magnetic energy storage*)

Dans un système de SMES, une grande quantité de courant est maintenue en circulation dans un aimant ou un inducteur supraconducteur, pour être fournie au système quand nécessaire. Puisqu'il y a seulement des pertes négligeables dans l'inducteur supraconducteur, le transfert de l'énergie dans et hors du stockage est fortement efficace et rapide [Jouanne99]. Le coût important de cette solution, autant à l'installation qu'en opération, représente son inconvénient principal.

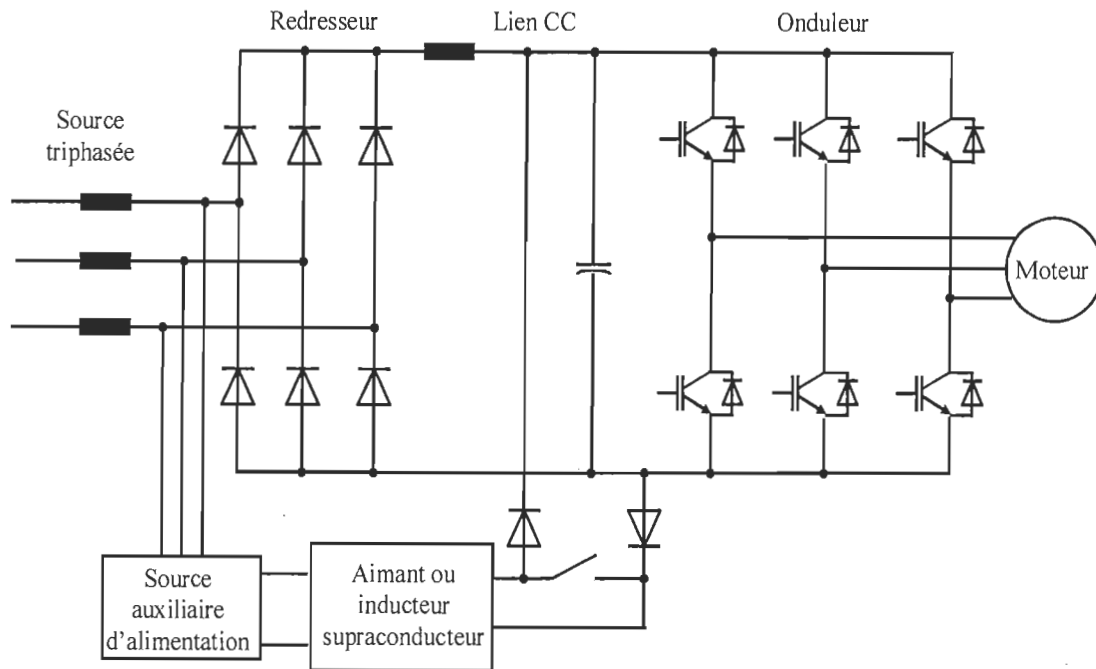


Figure 2.11 : Schéma de principe d'un SMES

2.5.6 Commande de systèmes

Il s'agit de réduire la sensibilité des procédés et des équipements, par exemple d'assurer le maintien du synchronisme des entraînements par l'implantation d'algorithmes de commande et de compensation. Ceci peut requérir la détection rapide des creux de tension. L'avantage principal de ce type de correction est son faible coût puisque la correction est algorithmique et peut n'exiger que la programmation de nouvelles fonctions.

Le sujet de ce projet est un bon exemple de ce type de commande de systèmes, puisqu'on va développer une stratégie et une loi de commande acceptable par l'industrie pour le maintien du synchronisme des entraînements en présence de creux de tension.

2.6 CARACTÉRISATION DES EFFETS DES CREUX DE TENSION

L'amplitude et la durée ne caractérisent pas entièrement les creux de tension mais ils sont essentiels dans la détermination du comportement des matériels et systèmes informatisés. L'amplitude d'un creux est la baisse de la tension efficace en pourcentage (%) ou par unité (p.u) de la tension nominale pendant un creux de tension. La durée d'un creux est le temps de diminution de la tension [Bollen99].

Les creux de tension qui peuvent causer des impacts sur les équipements sont habituellement provoqués par des défauts sur le système d'alimentation. La figure 2.12 montre l'importance des creux de tension mesurés dans une usine industrielle alimentée à partir d'un système 115-kV.

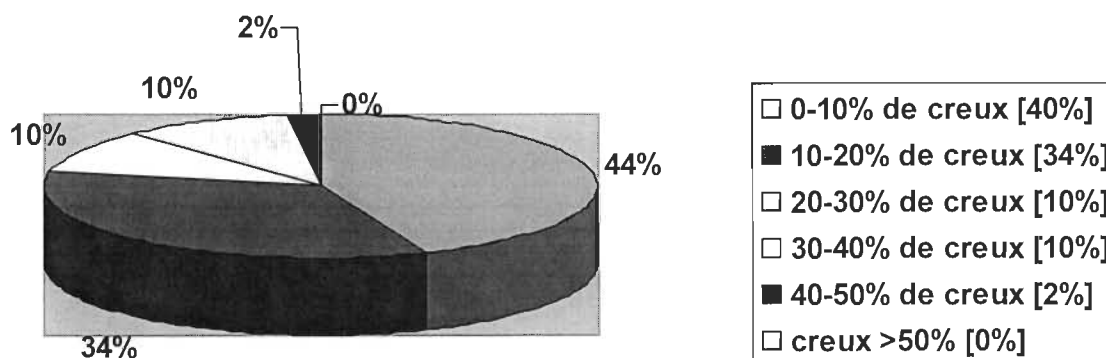


Figure 2.12 Importance des creux de tension mesurés dans une usine industrielle alimentée à partir d'un système 115-kV [Lamoree94].

Une grande partie des creux de tension sont de 10 à 30% inférieure à la tension nominale et aucune interruption brève n'a été mesurée à l'usine pendant la période de test (presque une année) [Lamoree94].

Sur un total de plusieurs milliers de lignes exposées, celles qui affectent l'usine (zone de vulnérabilité) ont été déterminées pour un niveau de creux particulier. Cette estimation sur la performance des défauts (défauts par 100 mille mètres) peut être utilisée pour déterminer le nombre de creux qu'on peut attendre par an en dessous de cette amplitude. Finalement un histogramme tel que celui construit dans [Lamoree94] peut être utilisé directement par l'utilisateur pour déterminer les besoins en traitement de puissance de l'équipement aux charges sensibles dans l'entreprise.

La caractérisation de la sensibilité des entraînements à vitesse variable couplés en présence de creux de tension est le but du chapitre 4.

CONCLUSION

Les creux de tension représentent un problème majeur de qualité d'alimentation électrique en terme de pertes de production. Selon une étude datant de juillet 1998 du *Sandia National Laboratories* (États-unis), les creux de tension à eux seuls coûtent à l'industrie nord-américaine, plus de 100 milliards de dollars annuellement.

L'utilisation accrue des équipements sensibles par les clients, comme dans l'industrie, a mené au développement d'appareils et systèmes de compensation des creux. Ces appareils et systèmes identifient d'abord la perturbation électrique pour ensuite faire la compensation. Une identification en temps réel ou même une anticipation permettra de mieux protéger les équipements sensibles.

CHAPITRE 3 :

MODÉLISATION D'UN SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENTS À VITESSE VARIABLE COUPLÉS

3.1 STRUCTURE DU SYSTÈME ÉTUDIÉ

La figure 3.1 présente un système d'entraînement constitué de deux entraînements ca avec un bus cc commun et qui sont couplés mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable par la commande des deux moteurs [Sicard02]. Le matériel transféré de R1 à R2 est caractérisé par ses propriétés élastiques et géométriques. Le matériel est pincé dans les rouleaux qui sont conduits respectivement par deux moteurs M1 et M2. Nous supposons qu'il n'y a aucun glissement dans les rouleaux. Nous supposerons aussi que la tension d'entrée et la tension de sortie sur le matériel, T_e et T_s respectivement, sont strictement constantes.

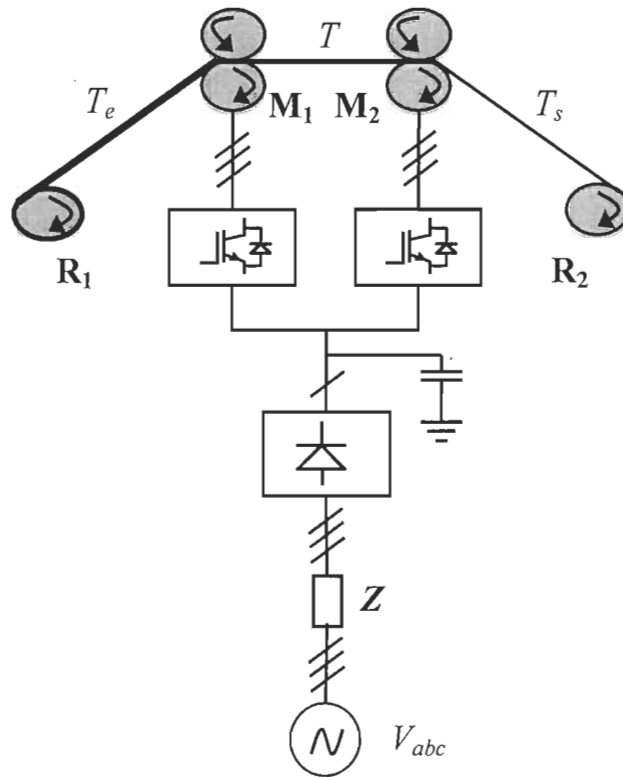


Figure 3.1. Structure du système étudié.

3.2 MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

3.2.1 INTRODUCTION

Les machines asynchrones sont le plus souvent utilisées pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Elles peuvent fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur. Dans le domaine des entraînements à vitesse variable, ces machines sont fréquemment utilisées dans les applications de grandes puissances.

La machine à induction est constituée d'un stator et d'un rotor. Dans le cas de la machine asynchrone à rotor bobiné, les enroulements rotoriques sont accessibles pour y connecter des résistances ou des convertisseurs statiques (cascade hyposynchrone). Tandis que dans le cas de la machine asynchrone à cage, les enroulements rotoriques sont en court-circuit sur eux mêmes. La machine asynchrone à cage est la plus utilisée dans le domaine des entraînements.

Lorsque le rotor de la machine est stationnaire, l'alimentation des enroulements statoriques par des sources de tensions triphasées équilibrées induit des courants dans les enroulements rotoriques à la même fréquence. L'interaction entre le flux produit dans l'entrefer et la force magnétomotrice créée au rotor, donne naissance au couple dans la machine. À la vitesse de synchronisme (c'est-à-dire à glissement nul), le rotor ne peut avoir aucune induction et par conséquent aucun couple n'est produit. En charge, la vitesse de la machine est différente de la vitesse de synchronisme, le flux d'entrefer tourne à la fréquence du glissement par rapport au rotor, ce qui contribue à induire des courants dans ce dernier et produit un couple électromagnétique pour compenser le couple imposé par la charge.

3.2.2 MODÈLE MATHÉMATIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La machine asynchrone est représentée à la figure 3.2 par six enroulements dans l'espace électrique; l'angle α repère l'axe de la phase rotorique de référence R_a par rapport à l'axe de la phase statorique de référence S_a .

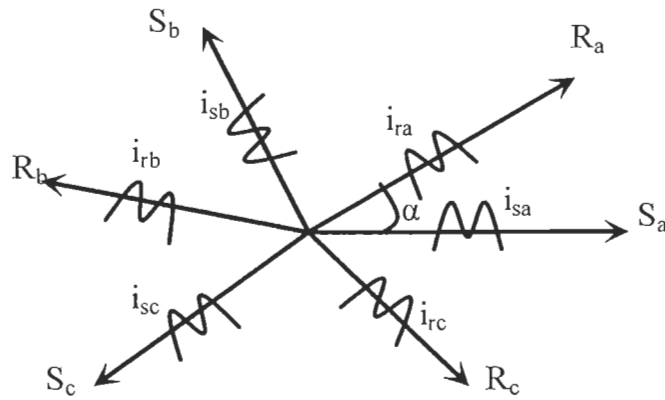


Figure 3.2 Représentation des enroulements de la machine asynchrone.

Les équations mathématiques décrivant la dynamique des six phases couplées de la machine sont

[Rajagopalan87] :

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} [R_{ss}] & [0] \\ [0] & [R_{rr}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{Bmatrix} \quad (3-1)$$

$$T_{em} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{Bmatrix}^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \begin{Bmatrix} [L_{sr}] & [L_{ss}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{Bmatrix} \quad (3-2)$$

$$[R_{ss}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; \quad [R_{rr}] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned}
 [L_{sr}] &= \begin{bmatrix} L_{Aa} \cos(\theta_r) & L_{Ab} \cos(\theta_r + \Phi) & L_{Ac} \cos(\theta_r - \Phi) \\ L_{Ba} \cos(\theta_r - \Phi) & L_{Bb} \cos(\theta_r) & L_{Bc} \cos(\theta_r + \Phi) \\ L_{Ca} \cos(\theta_r + \Phi) & L_{Cb} \cos(\theta_r - \Phi) & L_{Cc} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \\
 [L_{sr}] &= \begin{bmatrix} L_{aA} \cos(\theta_r) & L_{aB} \cos(\theta_r + \Phi) & L_{aC} \cos(\theta_r - \Phi) \\ L_{bA} \cos(\theta_r - \Phi) & L_{bB} \cos(\theta_r) & L_{bC} \cos(\theta_r + \Phi) \\ L_{cA} \cos(\theta_r + \Phi) & L_{cB} \cos(\theta_r - \Phi) & L_{cC} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3-4)
 \end{aligned}$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, \quad \text{et } \Phi = \frac{2\pi}{3} \quad (3-5)$$

Les indices en lettres majuscules correspondent aux grandeurs statoriques. Les indices en lettres minuscules correspondent aux grandeurs rotoriques.

Ces équations sont très générales et peuvent être considérablement réduites si on introduit les hypothèses simplificatrices usuelles :

1. Les paramètres électriques de la machine ne dépendent ni du temps ni des conditions de fonctionnement;
2. La réciprocité des inductances mutuelles;
3. Les enroulements sont identiques du côté stator et du côté rotor;
4. La machine est alimentée par des sources équilibrées;
5. Le neutre des enroulements est indépendant du neutre des alimentations.

Avec ces considérations, on aboutit au modèle mathématique simplifié suivant:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [is] \\ [ir] \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} [Vs] \\ [Vr] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [R_{ss}] & [0] \\ [0] & [R_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [is] \\ [ir] \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$[R_{ss}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; \quad [R_{rr}] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

L'hypothèse de la réciprocité des inductances mutuelles donne :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{AA} & 0 & 0 \\ 0 & L_{BB} & 0 \\ 0 & 0 & L_{CC} \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$[L_{sr}] = \frac{2M}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \Phi) & \cos(\theta_r - \Phi) \\ \cos(\theta_r - \Phi) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \Phi) \\ \cos(\theta_r + \Phi) & \cos(\theta_r - \Phi) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^T \quad (3-9)$$

On note que même avec ce modèle simplifié, la résolution du système reste complexe à cause des coefficients dépendant du temps dans les matrices d'état et du couplage qui existe entre les phases de la machine. La formulation dans l'espace d'état d'un tel système nécessite l'inversion de la matrice $[L_{sr}]$. Malheureusement celle-ci donne des termes en $[\cos(\theta_r)]^{-1}$ qui créent des problèmes de calcul lorsque $\cos(\theta_r)$ devient nul.

Le but est donc de chercher un modèle dont la matrice $[L_{sr}]$ ne dépend pas explicitement de l'angle θ_r , et dont l'inversion par le moyen d'une transformation mathématique ne donnera pas le problème mentionné. Ces transformations devront assurer l'invariance de puissance.

La théorie unifiée des machines électriques classiques, dite encore théorie généralisée, est basée sur la transformation de Park [Lesenne81] qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement appelés d, pour direct, et q, pour quadrature comme sur la figure 3.3.

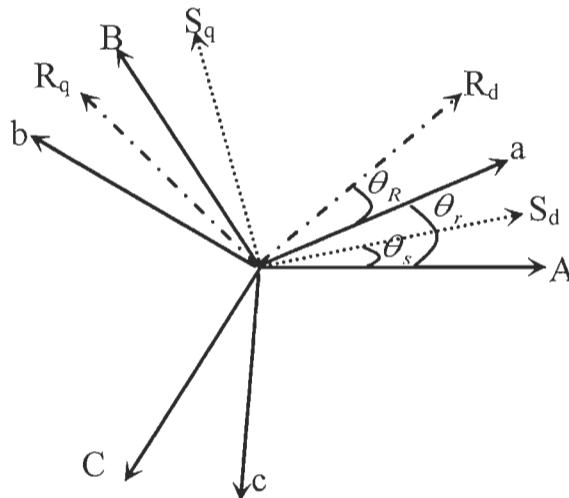


Figure 3.3. Transformation d'axes (3phases)-(dq)

- (A, B, C): Système triphasé statorique;
- (a, b, c) : Système triphasé rotorique;
- (S_d, S_q) : Système diphasé statorique;
- (R_d, R_q) : Système diphasé rotorique.

3.3 COMMANDE VECTORIELLE

Les techniques de commande vectorielle ou techniques de commande par orientation de flux, sont basées sur l'inverse du modèle de la machine, en prenant comme variables d'état les flux dans la machine [Ho89] [Ho88]. Ces flux peuvent être soit les flux statoriques, soit les flux rotoriques ou encore les flux dans l'entrefer.

Ces techniques d'orientation de flux ont pour but de découpler la machine de façon à ce que le couple électromagnétique soit proportionnel à la composante q du courant statorique à flux constant, et que le flux soit aligné suivant l'axe d. Ceci permet d'avoir un comportement similaire à celui d'une machine à courant continu.

3.3.1 Orientation du flux statorique

En considérant comme variables d'état les flux statoriques, 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 [Ho88] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_r} & \omega_g \\ -\omega_g & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma T_r L_s} \begin{bmatrix} 1 + T_r \frac{d}{dt} \\ T_r \omega_g \end{bmatrix} \Psi_s \quad (3-20)$$

$$\text{et : } T_{em} = \frac{3}{2} pp \cdot \Psi_s i_{qs} \quad (3-21)$$

où : ω_g est la pulsation du glissement en rad/s;

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

σ 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 leurs fonctionnements sont détaillés dans [Ba-Razzouk97].

3.3.2 Orientation du flux rotorique

En considérant comme variables d'état les flux rotoriques, 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 [Ho88] :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{M} \begin{bmatrix} 1 + T_r \frac{d}{dt} \\ T_r \omega_g \end{bmatrix} \Psi_r \quad (3-22)$$

$$\text{et : } T_{em} = \frac{3}{2} pp \cdot \frac{M}{L_r} \Psi_s i_{qs} \quad (3-23)$$

Où : ω_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 leurs fonctionnements sont détaillés dans [Ba-Razzouk97].

3.3.3 Orientation du flux d'entrefer

La troisième possibilité d'orientation de flux est obtenue en considérant comme variables d'état les 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 [Ho88] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{r1}} & \omega_g \\ -\omega_g & -\frac{1}{\sigma T_{r1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_{r1}M} \begin{bmatrix} 1 + T_r \frac{d}{dt} \\ T_r \omega_g \end{bmatrix} \Psi_e \quad (3-24)$$

$$\text{et : } T_{em} = \frac{3}{2} pp \cdot \Psi_e i_{qs} \quad (3-25)$$

où : ω_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 leurs fonctionnements sont détaillés dans [Ba-Razzouk97].

3.4 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE COUPLAGE MÉCANIQUE

Les moteurs asynchrones M1 et M2 sont alimentés par des onduleurs IGBT qui sont contrôlés par la technique de la commande d'orientation de flux. La figure 3.4 présente un modèle d'un seul entraînement sous *Power System Blockset* (PSB). On utilise les bibliothèques de PSB parce qu'elles contiennent des modèles complets des moteurs et des convertisseurs qui fournissent des résultats de simulation proches des systèmes réels [Mathworks00].

Chaque moteur contient un contrôleur PI, le PI du premier moteur sert à contrôler la tension mécanique et celui du second à commander la vitesse (figure 3.8). De plus un gain K_d est appliqué pour contrôler la différence de vitesses des deux moteurs et ainsi introduire de l'amortissement dans le système. La structure complète du modèle du système couplé est illustrée dans la figure 3.5. Les inerties composées des moteurs et des rouleaux sont incluses dans le modèle PSB des moteurs. Le frottement est inclus comme boucle externe dans le modèle PSB (F_{v1} et F_{v2} sont des coefficients de frottement en $\text{Nm}/(\text{rad/s})$).

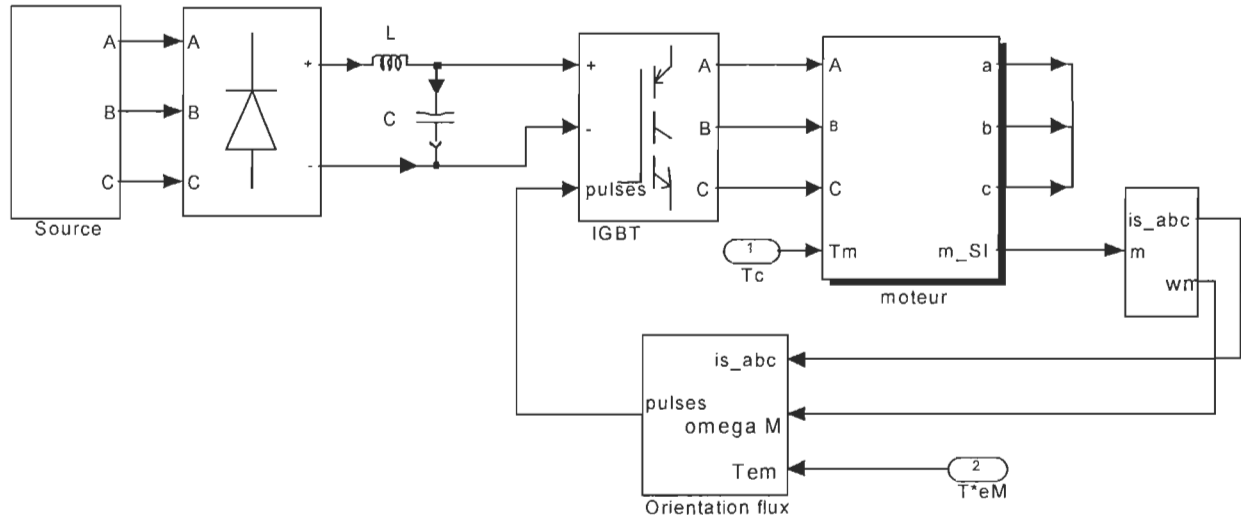


Figure 3.4 Modèle d'un entraînement à vitesse variable à ca sous PSB avec son contrôleur d'orientation de flux.

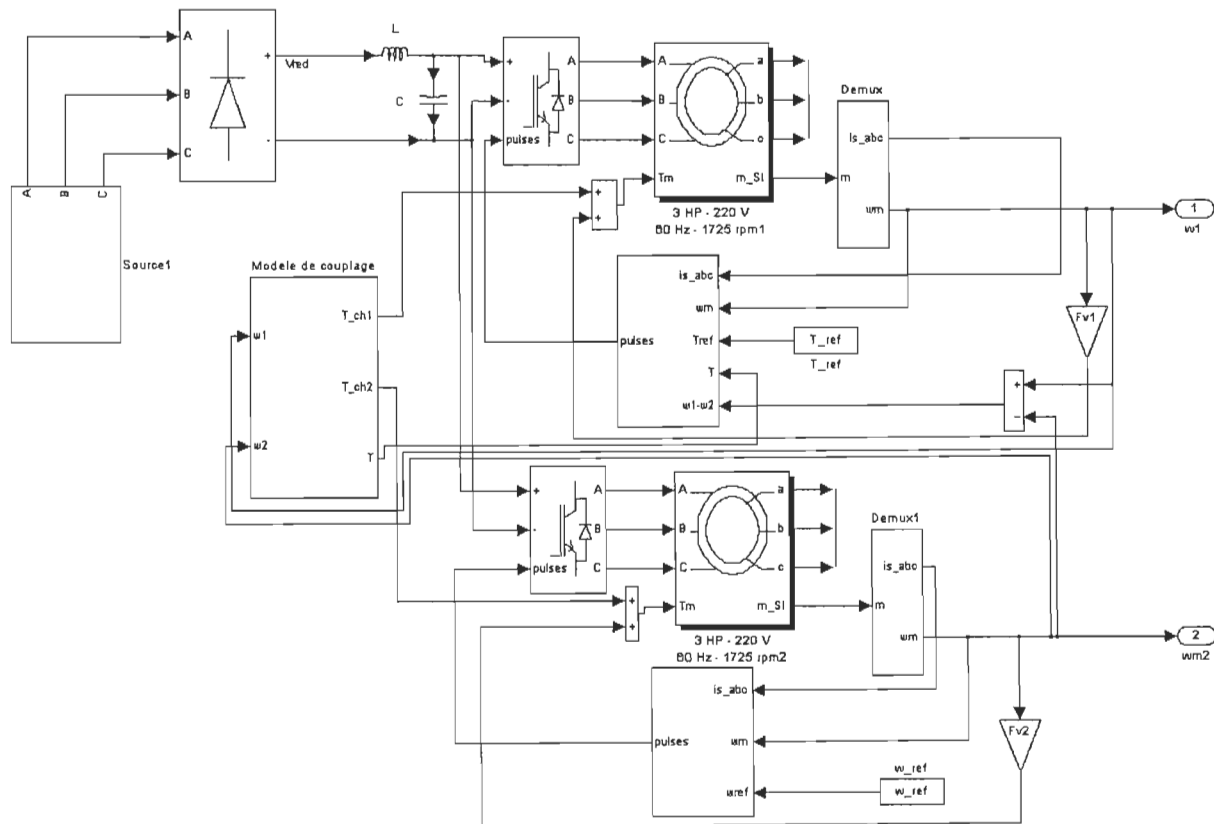


Figure 3.5 Modèle complet du système d'entraînements à vitesse variable couplés sous PSB

Le modèle de couplage mécanique entre les deux rouleaux est développé pour des matériaux flexibles en se basant sur le développement des équations décrivant l'interaction entre les vitesses des rouleaux, la tension du matériau et le couple de charge des moteurs. Pour résoudre le couplage entre la vitesse et la tension du matériau, on utilise la loi de Hooke [Duvaut90] pour modéliser l'élasticité du matériau et la loi de conservation de masse sous forme de loi de conservation de volume puisqu'on suppose la densité massive uniforme.

Nous supposons que l'enchaînement est pincé dans les rouleaux R1 et R2 et qu'il n'y a aucun glissement. D'ailleurs, nous supposons que la section de l'enchaînement est uniforme entre les deux rouleaux, en particulier, nous négligeons la déformation de l'enchaînement aux points de contact avec les rouleaux.

La figure 3.6 montre la structure du matériau entre les deux rouleaux R1 et R2 avec L , la distance en m entre les rouleaux R1 et R2. Nous notons que toutes les quantités sont exprimées en unité de SI.

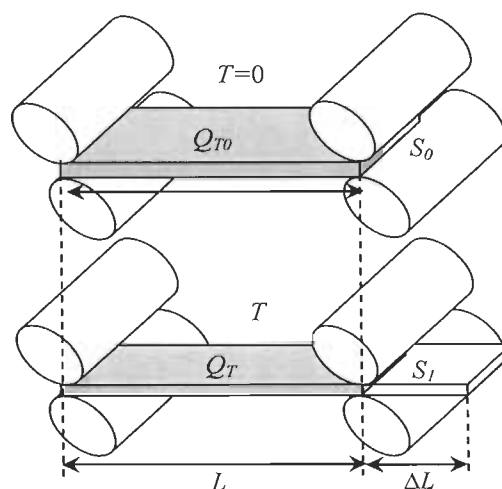


Figure 3.6 Modèle du matériau entre R1 et R2

Sans aucune tension appliquée au matériau, la quantité de matière entre les rouleaux R1 et R2 est donnée par :

$$Q_{T0} = S_0 \cdot L \quad [\text{m}^3] \quad (3-26)$$

où S_0 est la section initiale en m^2 du matériau à $T=0$. Quand on applique une pression P sur le matériau, la quantité du matériau varie de la manière suivante :

$$Q_{T0} = S_1 \cdot (L + \Delta L) \quad [\text{m}^3] \quad (3-27)$$

où S_1 est la nouvelle section du matériau entre les deux rouleaux R1 et R2, ΔL est la variation de la longueur L . La nouvelle quantité du matériau entre R1 et R2 est devenue :

$$Q_T = S_1 \cdot L \quad [\text{m}^3] \quad (3-28)$$

La relation entre la pression et la variation de L est donnée par :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{P}{E} \quad (3-29)$$

où E [N/m^2] est le module de Young. Par contre, la relation entre la tension T [N] et la pression P [N/m^2] est donnée par :

$$P = \frac{T}{S} \quad [\text{N}/\text{m}^2] \quad (3-30)$$

À partir de (3-26), (3-27), (3-29) et (3-30) on trouve S_1 en fonction de S_0 :

$$S_1 = S_0 - \frac{T}{E} \quad [\text{m}^2] \quad (3-31)$$

Soit Q la quantité réelle du matériau entre les deux rouleaux, nous obtenons la tension entre R1 et R2 à partir des équations (3-26), (3-28) et (3-31) :

$$T = (Q_T - Q) \cdot \frac{E}{L} \quad \text{si } Q \leq Q_T \quad (3-32)$$

$$T = 0 \quad \text{si } Q > Q_T \quad (3-33)$$

Utilisons la loi de conservation de masse pour trouver la quantité Q qui est exprimée sous la forme :

$$\frac{dQ}{dt} = S_1 \cdot (\Omega_1 \cdot r_1 - \Omega_2 \cdot r_2) \quad (3-34)$$

où Ω_1 et Ω_2 sont les vitesses angulaires des deux moteurs M1 et M2, r_1 et r_2 sont les rayons en m des rouleaux R1 et R2. Les couples de charge des deux moteurs M1 et M2 sont donnés par :

$$T_{L1} = \frac{T_e - T}{r_1} \quad (3-35)$$

$$T_{L2} = \frac{T - T_s}{r_2} \quad (3-36)$$

où T_e est la tension d'entrée du premier rouleau et T_s est la tension de sortie du deuxième rouleau (figure 3.1.). Ces équations composent le bloc modèle de couplage dans la figure 3.5 qui est illustré dans la figure 3.7.

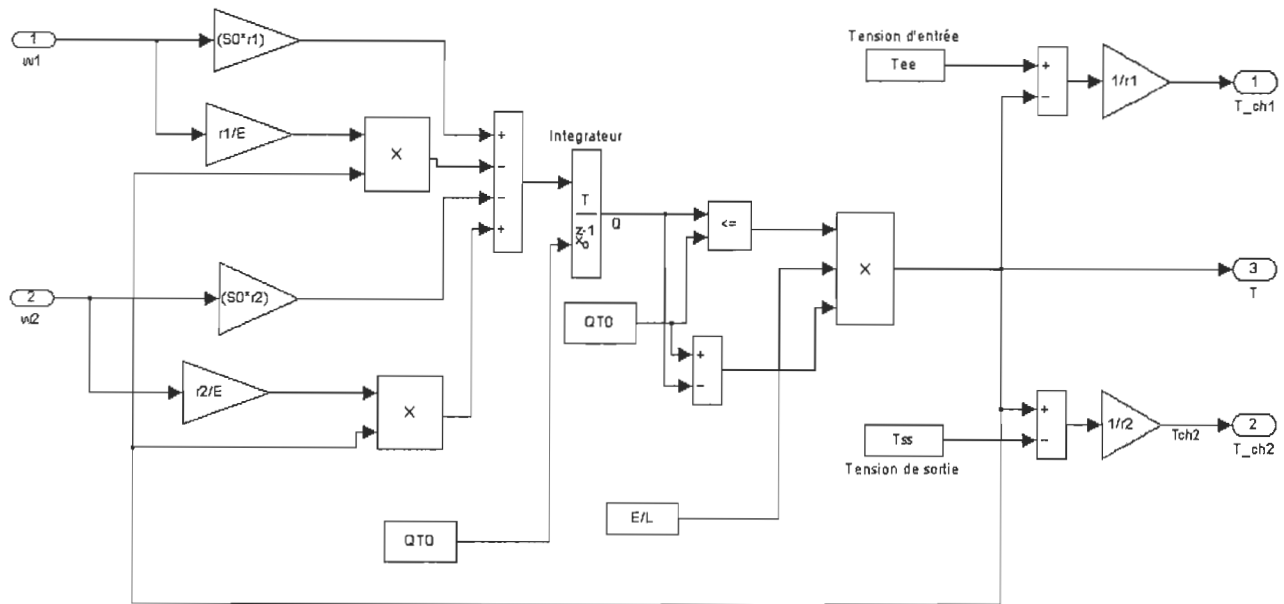


Figure 3.7 Modèle du couplage sous *PSB*

Les paramètres du modèle sont donnés dans l'annexe D.

3.5 LOI DE COMMANDE POUR LE SYSTÈME COUPLÉ

Dans le cadre de ce projet, nous allons nous servir de deux contrôleurs PI pour le contrôle de la tension mécanique du premier moteur et de la vitesse du deuxième moteur. De plus, un gain K_d est appliqué pour le contrôle de la différence de vitesses des deux moteurs. Le but de la commande est la synchronisation des deux moteurs et de maintenir une tension mécanique constante entre les deux rouleaux.

La structure de la loi de commande du système est illustrée dans les figures 3.8 et 3.9.

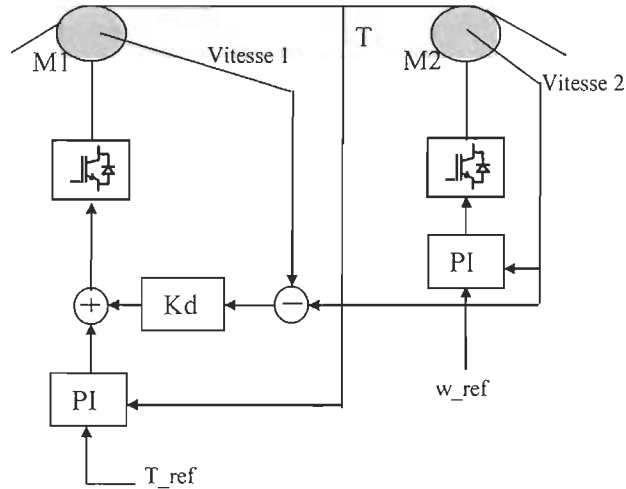


Figure 3.8 Structure générale de commande

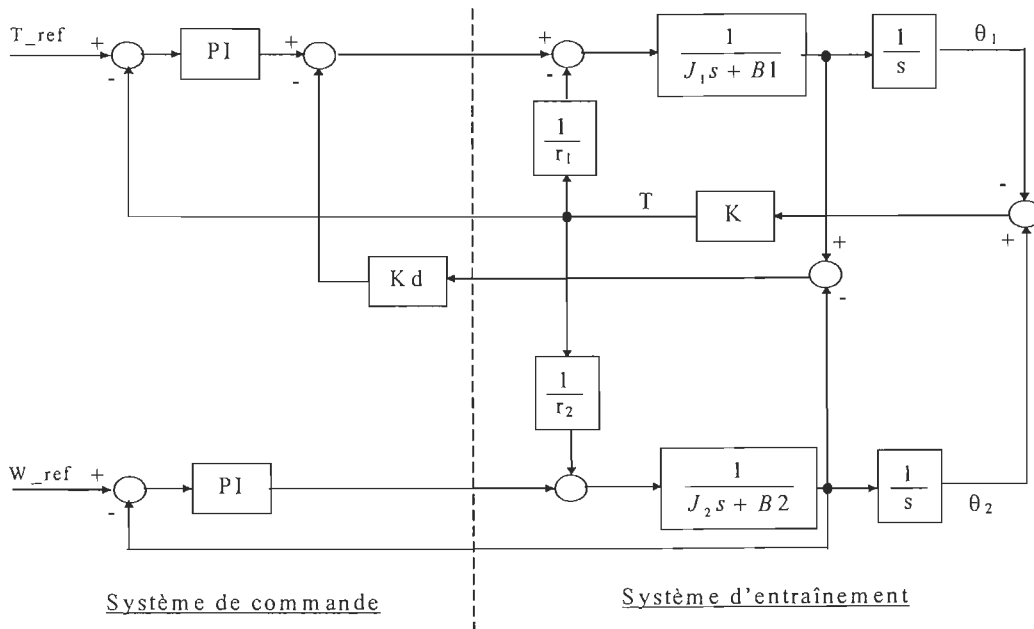


Figure 3.9 Représentation de la structure générale de commande

Sur les figures :

r_1 et r_2 sont respectivement les rayons des rouleaux R1 et R2 ;

J_1 et J_2 sont respectivement les inerties des moteurs M1 et M2 ;

T_{ref} est la tension de référence ;

W_{ref} est la vitesse de référence.

À partir des équations (3-31), (3-32), (3-33) et (3-34) nous allons évaluer la constante de rigidité équivalente du matériau, K :

$$\frac{dQ}{dt} = \left(S_0 - \frac{T}{E} \right) (\Omega_1 r_1 - \Omega_2 r_2) \quad (3-37)$$

$$\Rightarrow \frac{dQ}{dt} = \left(S_0 - \frac{(Q_r - Q)}{L} \right) (\Omega_1 r_1 - \Omega_2 r_2) \quad (3-38)$$

Les équations (3-26), (3-28), et (3-34) nous donnent :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{L} (\Omega_1 r_1 - \Omega_2 r_2) \quad (3-39)$$

$$\Rightarrow \Delta \left(\frac{dQ}{dt} \right) = \frac{\Delta Q}{L} (\Omega_{10} r_1 - \Omega_{20} r_2) + \frac{Q_0}{L} (\Delta \Omega_1 r_1 - \Delta \Omega_2 r_2) \quad (3-40)$$

Soit le point d'opération $\Omega_1 = \Omega_2$ et pour des rayons identiques, nous obtenons :

$$\Delta \left(\frac{dQ}{dt} \right) = \frac{Q_0}{L} (\Delta \Omega_1 r_1 - \Delta \Omega_2 r_2) \quad (3-41)$$

$$\Rightarrow \Delta Q = \frac{Q_0}{L} (\Delta\theta_1 r_1 - \Delta\theta_2 r_2) \quad (3-42)$$

Avec $r_1 = r_2 = r$ on trouve :

$$\Delta Q = \frac{Q_0}{L} r (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \quad (3-43)$$

L'équation (3-32) donne l'expression suivante :

$$\Delta T = -\Delta Q \frac{E}{L} \quad (3-44)$$

(3-43) et (3-44) donnent l'expression finale de ΔT tel que :

$$\Delta T = \frac{Q_0}{L^2} r E (\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1) \quad (3-45)$$

Soit alors l'expression totale de K :

$$K = \frac{Q_0}{L^2} r E \quad (3-46)$$

3.6 SÉPARATION DE MODÈLE POUR LA SIMULATION SUR CALCULATEURS MULTI-PROCESSEURS

3.6.1 INTRODUCTION

Le but des méthodes de séparation est de pouvoir trouver des techniques pour découpler les différentes parties d'un système complexe et de les simuler sur des processeurs différents de façon parallèle. Les processeurs indépendants doivent cependant échanger de l'information entre eux afin de représenter le couplage entre les différentes parties du système original. Nous avons réalisé une étude de performance de la séparation du modèle du système qui est l'objet de la publication [Sicard02a]. Ce travail sera particulièrement pertinent quand un nombre plus grand d'entraînements à vitesse variable sera employé dans le modèle.

Dans le domaine de l'électronique de puissance, des systèmes ayant des plages dynamiques différentes coexistent souvent dans les convertisseurs statiques ou les entraînements électriques. La simulation du système au complet s'avère inutilement trop lente puisqu'elle doit être réalisée à un taux assez faible de façon à bien représenter la partie la plus rapide du système étudié. Il serait judicieux de pouvoir séparer les différentes dynamiques, de façon à pouvoir simuler chaque partie avec un pas de calcul approprié et non nécessairement celui requis par le sous système le plus rapide [Ba-razzouk02], (l'étude [Hui97] utilise une autre approche basée sur le même principe).

Le modèle peut être séparé au niveau de différents points comme l'inductance de ligne, le condensateur du lien cc, les inductances du stator, les inductances du rotor, l'inertie du moteur, la bande de matériau flexible et dans les contrôleurs à temps discret. Cependant, la séparation du modèle sur plusieurs sous-systèmes amène une latence dans les communications qui devient le facteur principal qui influence sur le nombre de sous-systèmes qu'il est efficace de définir. Dans *PSB* et *ARTEMIS*, les modèles des moteurs sont codés, ce qui veut dire qu'on ne peut pas utiliser les inductances des moteurs pour faire la séparation, alors la séparation sera limitée sur deux éléments, le condensateur du lien cc et le matériau qui lie les deux moteurs.

3.6.2 MÉTHODE DE SÉPARATION DU MODÈLE

Pour illustrer la méthode de séparation [Ba-Razzouk02], on considère le cas de deux sous-systèmes couplés par un condensateur C comme dans la figure 3.10.

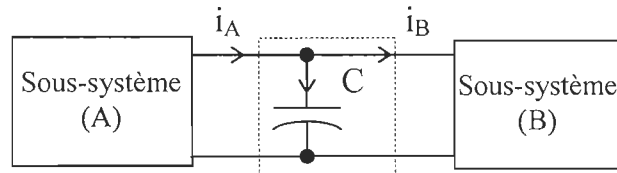


Figure 3.10 Deux sous-systèmes couplés par un condensateur C

L'équation différentielle décrivant la tension aux bornes du condensateur C est donnée par :

$$C \frac{dV_C}{dt} = i_A - i_B \quad (3-47)$$

Si nous discrétisons (3-47), nous définissons une source de tension contrôlée pour chaque sous-système, correspondant à la tension terminale du condensateur. Pour éviter de présenter des retards supplémentaires du système après sa séparation, un algorithme d'intégration de type prédicteur est utilisé. En particulier, nous avons utilisé l'algorithme de Adams-Bashforth de deuxième ordre (AB-2), connu pour sa stabilité et sa précision pour discrétiser l'équation (3-47).

Nous obtenons:

$$V_C(k) = V_C(k-1) + \frac{3h}{2C}(i_A(k-1) - i_B(k-1)) - \frac{h}{2C}(i_A(k-2) - i_B(k-2)) + \Theta(h^3) \quad (3-48)$$

où : h représente le pas de calcul et $\Theta(h)$ représente l'erreur de discrétisation avec l'algorithme de AB-2.

Le système illustré à la figure 3.10 est équivalent aux deux systèmes représentés à la figure 3.11.

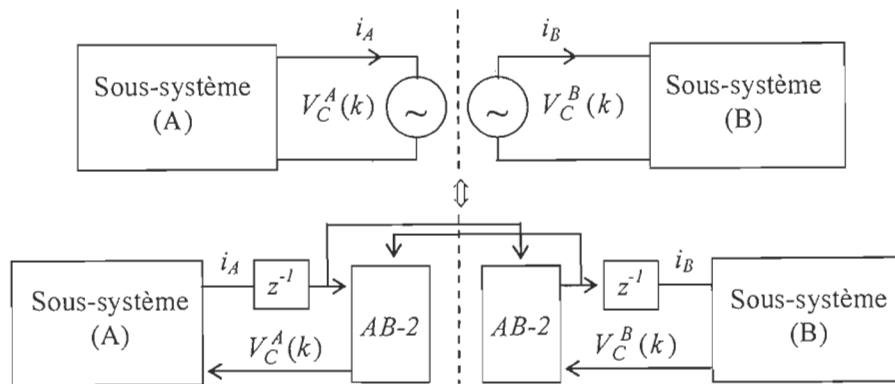


Figure 3.11 Séparation des deux systèmes pour simulation sur 2 processeurs.

La tension $V_C^A(k)$ représente la source de tension équivalente à l'élément de stockage C vu du côté du système A et la tension $V_C^B(k)$ représente la source de tension équivalente à l'élément de stockage C vu du côté du système B. Les deux sources ont la même expression qui est donnée par l'équation (3-48) puisqu'il s'agit de la même tension aux bornes du condensateur C.

Si le système A doit être implanté sur le processeur A et le système B sur le processeur B, le processeur A aura besoin de l'information i_B calculée dans le processeur B, aux instants $k-1$ et $k-2$, pour calculer la source $V_C^A(k)$. De la même façon, le processeur B a besoin de l'information i_A calculée dans le processeur A, aux instants $k-1$ et $k-2$, pour calculer la source $V_C^B(k)$.

Il est essentiel que les sous-systèmes soient connectés par un élément à temps discret strictement causal. La causalité est une propriété importante pour éviter la transmission directe entre les sous-systèmes qui pourrait empêcher la possibilité de parallélisation.

3.6.3 PROCESSUS DE SÉPARATION DU MODÈLE

En exploitant le condensateur du lien cc et l'intégrateur du modèle de couplage mécanique (3-34), on présente le modèle de découplage du processus de transfert du matériau dans la figure 3.12 avec l'échange des courants du lien cc et des vitesses des moteurs [Sicard02a].

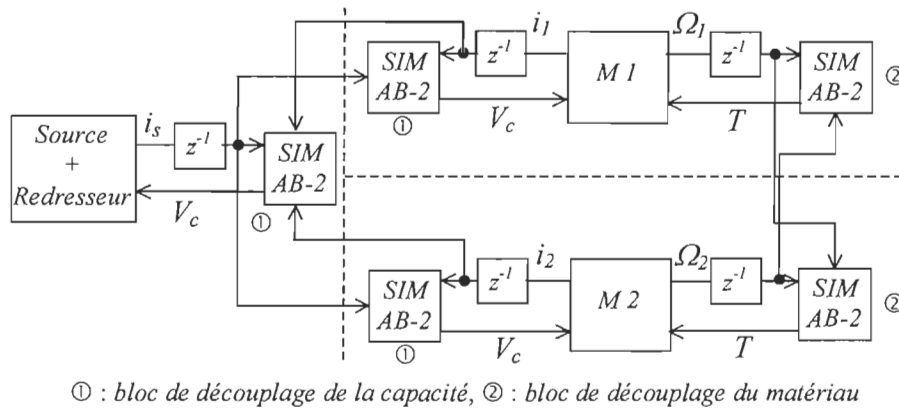


Figure 3.12 Modèle de découplage du processus de transfert du matériau.

Le modèle séparé peut être utilisé de deux manières pour améliorer le temps de simulation. Premièrement, le modèle peut être mise en œuvre sur le modèle de calcul distribuée en introduisant les blocs de communication. Deuxièmement, les éléments de découplage tiennent compte de *ARTEMIS* pour évaluer un modèle d'état pour chaque sous-système isolé par des blocs de découplage, au lieu d'un modèle d'état global, ce qui peut accélérer la simulation si les calculs complémentaires présentés par les blocs de découplage ne sont pas trop importants.

3.6.4 IMPLANTATION SOUS RT-LAB/ARTEMIS

Le modèle séparé est simulé sous RT-LABTM [Rtlab01] et ARTEMISTM [Artemis01] qui constituent un simulateur électrique en temps réel.

L'annexe E présente les caractéristiques générales des deux outils RT-LAB et ARTEMIS.

La figure 3.13 montre l'architecture du modèle des deux entraînements couplés séparés sous RT-LAB™, qui est constitué d'une console pour la visualisation des résultats, d'un maître (figure 3.14.) et d'un esclave (figure 3.15).

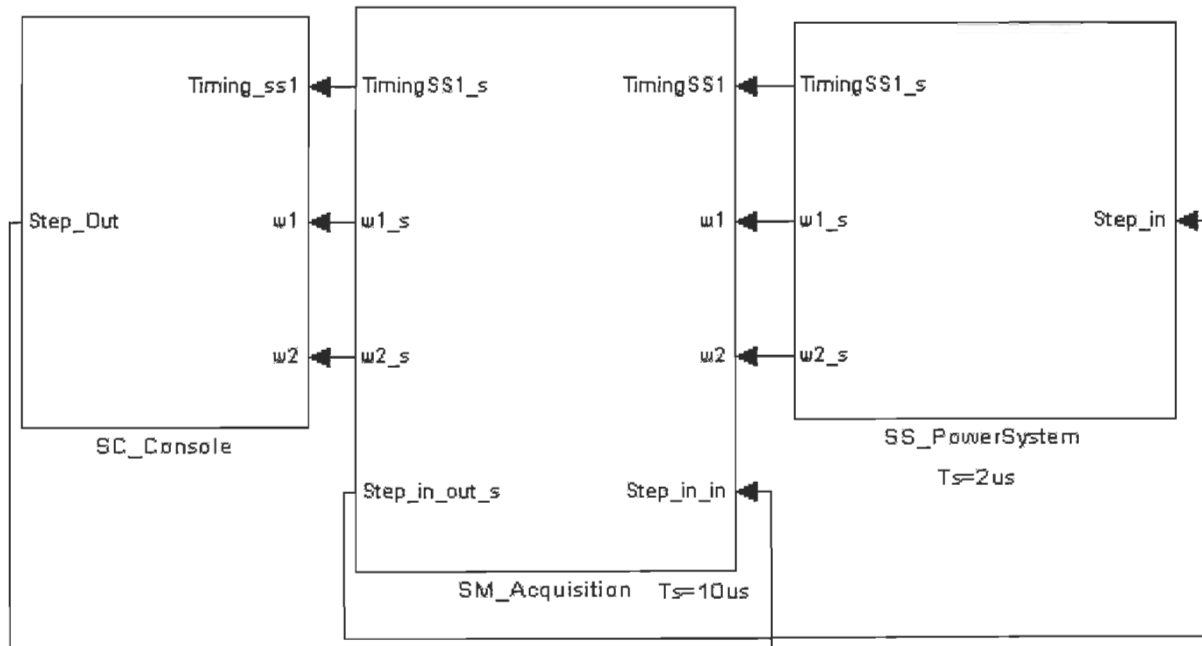


Figure 3.13 Architecture du modèle sous RT-LAB™ avec 2 CPU.

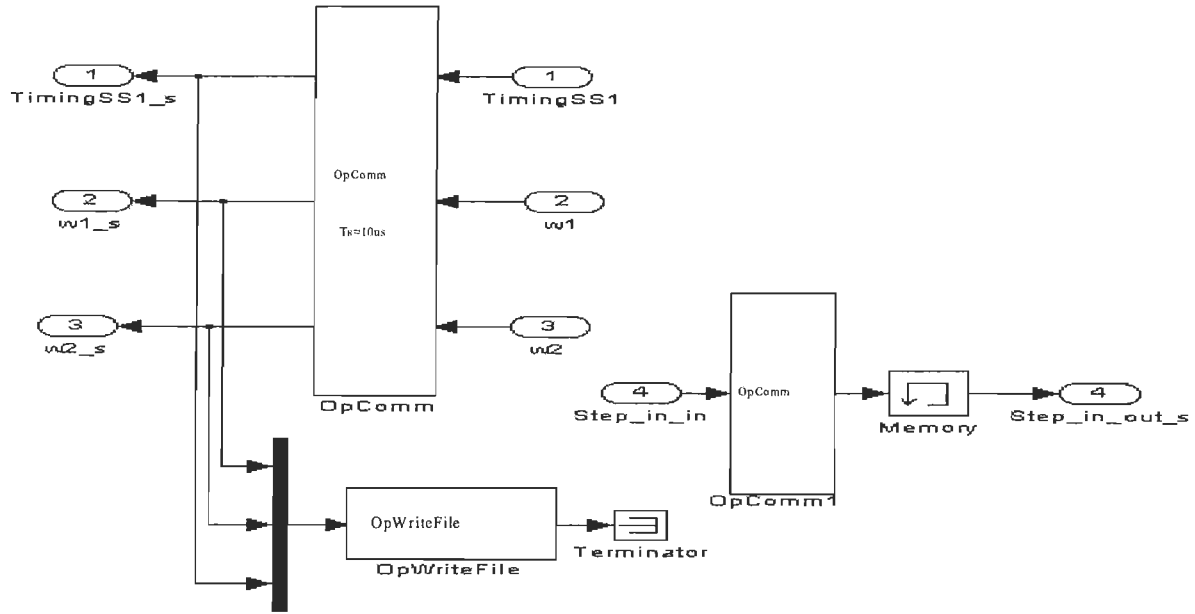


Figure 3.14 Nœud d'acquisition.

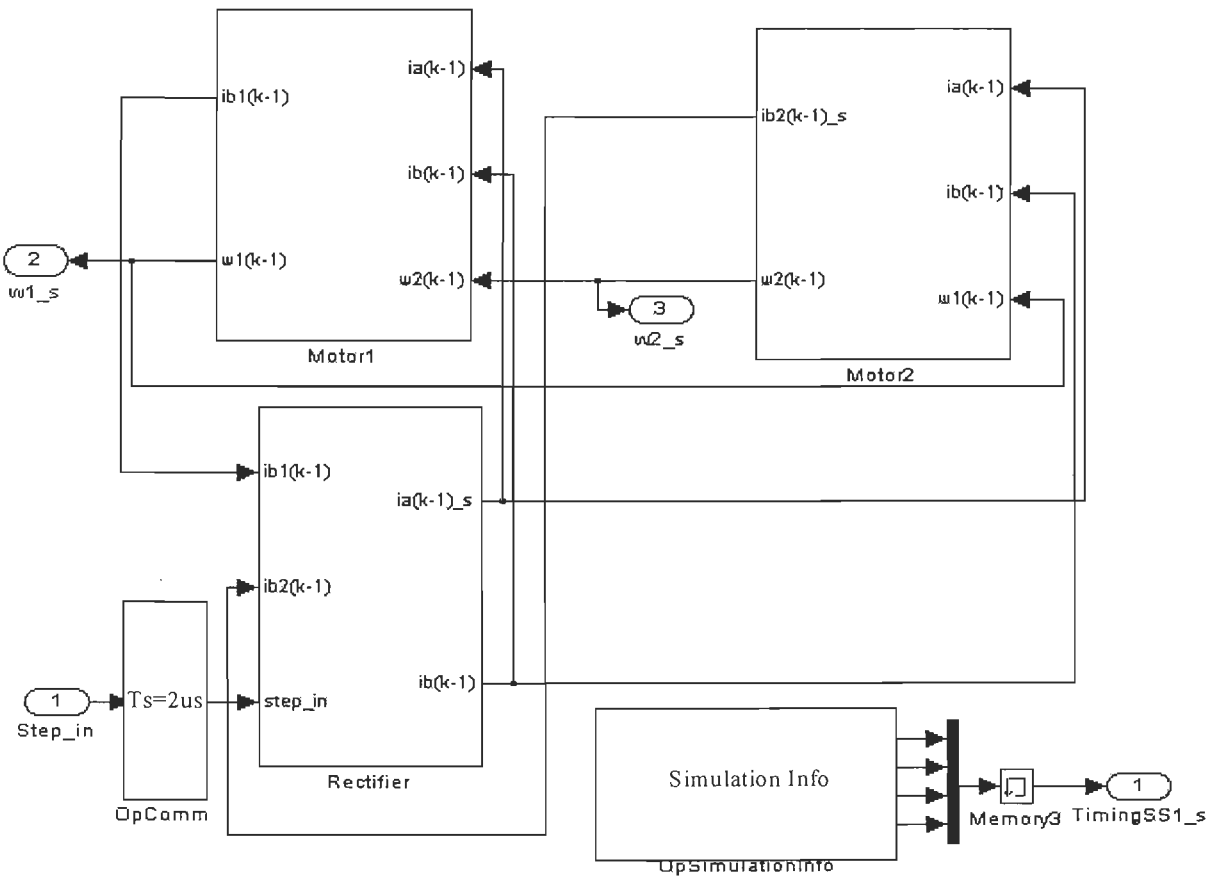


Figure 3.15 Nœud du modèle du système de puissance.

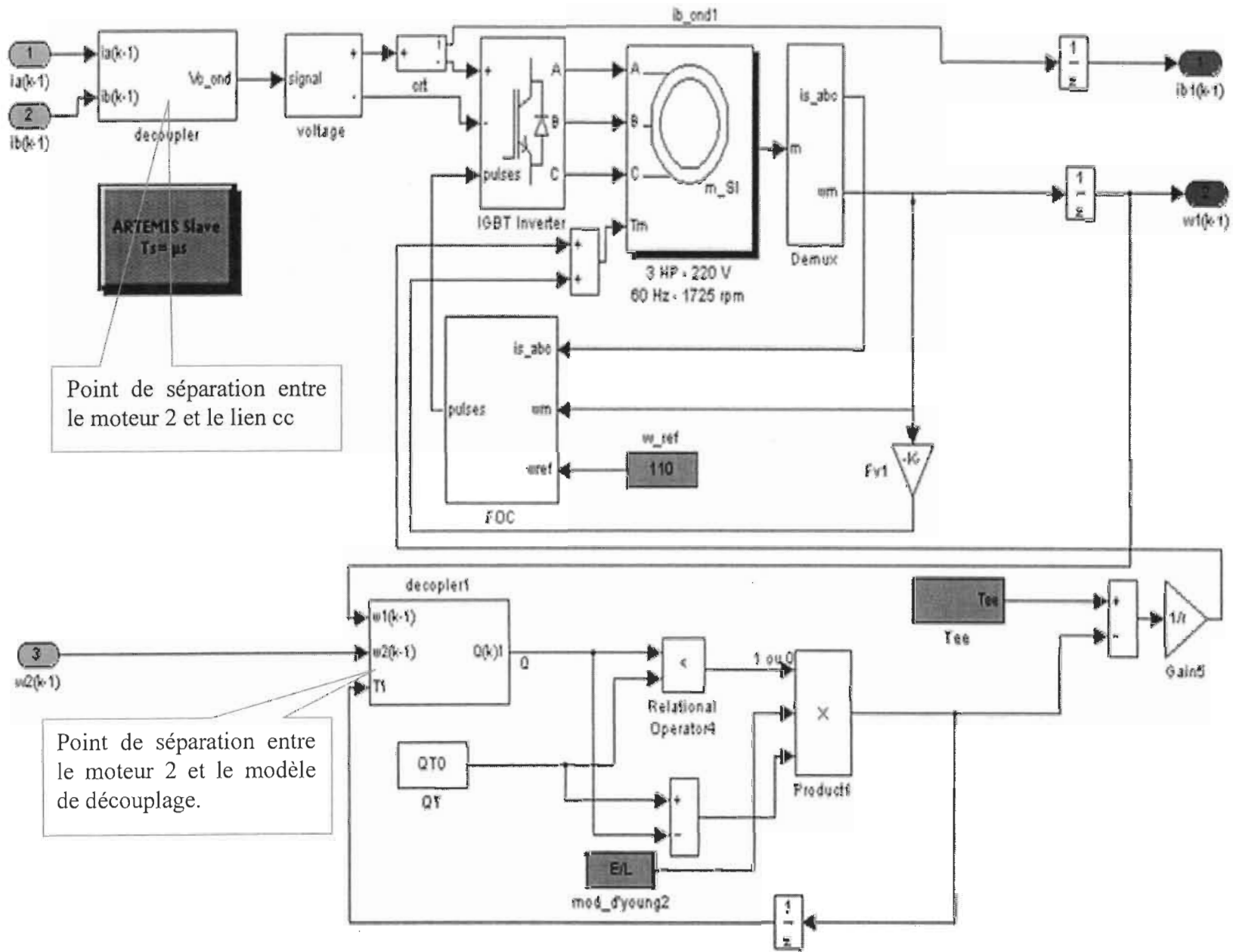


Figure 3.16 Modèle simulink du moteur 2

Les points de séparation indiqués sur la figure 3.16, séparent le moteur 2 du modèle de découplage et du lien cc. On utilise l'équation (3-35) pour séparer le moteur du lien cc comme montré dans la figure 3.17, et l'équation (3-32) pour la séparation du moteur avec le modèle de couplage mécanique comme montré dans la figure 3.18.

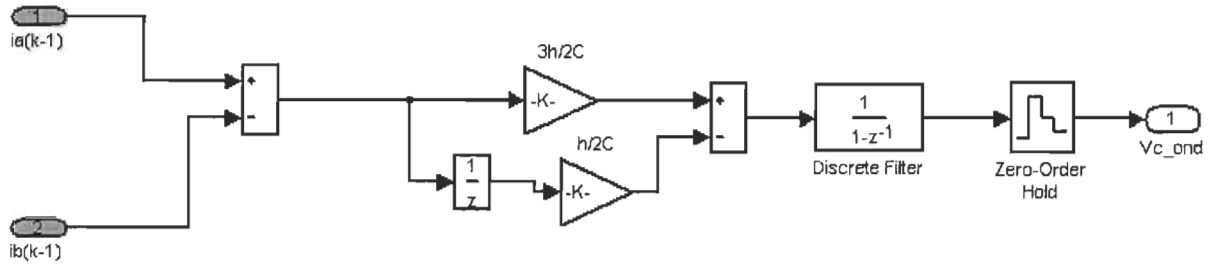


Figure 3.17 Modèle de séparation du moteur avec le lien cc

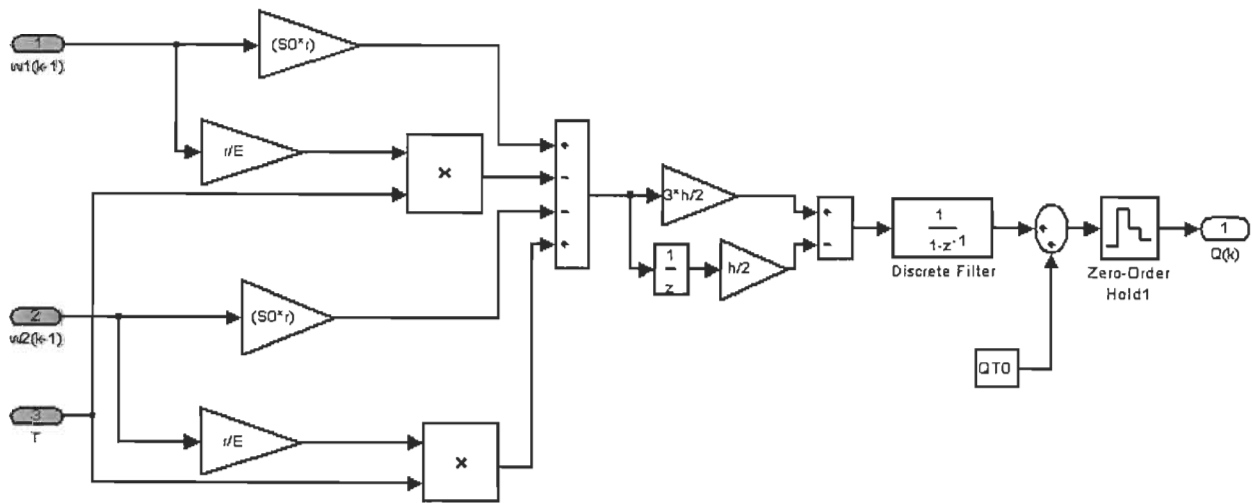


Figure 3.18 Modèle de séparation du moteur avec le modèle de couplage mécanique

La séparation du modèle et la simulation avec *RT-LAB/ARTEMIS* ont sensiblement amélioré la vitesse de simulation par rapport à *Power System Blockset*, le tableau 3.1 montre le temps de simulation avec *PSB* et *RT-LAB/ARTEMIS*. L'article [Sicard02a] montre les conditions de

simulation et les processeurs utilisés pour la simulation du modèle séparé sur calculateurs multi-processeurs.

Tableau 3.1: Performance de simulation.

Mode de simulation	Temps de simulation par pas de calcul	Accélération	Rapport en temps réel
Simulink/PSB $T_s=2 \mu s$	500 μs	1	250
RT-Lab/ARTEMIS $T_s=2 \mu s$	34 μs	14	17

3.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous venons de montrer la structure d'un système d'entraînement constitué de deux entraînements ca avec un bus cc commun et qui sont couplés mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable, en développant les équations du modèle de couplage mécanique.

Ce chapitre présente aussi l'organisation générale de la commande du système couplé et les méthodes de séparation pour la simulation sur calculateurs multi-processeurs.

Ce modèle va nous permettre d'évaluer les caractéristiques et la sensibilité du système en présence des creux de tension, ce qui constitue l'objectif du chapitre IV.

CHAPITRE 4 :

CARACTÉRISATION DES EVV EN PRÉSENCE DE CREUX DE TENSION.

4.1 INTRODUCTION

Les creux de tension [IEEE95], définis par la norme IEEE 1159 comme une baisse de 0.1 à 1 p.u. de la tension RMS pour une durée de 0.5 cycle à quelques secondes, sont la cause principale d'arrêts et de pertes de production dans de nombreuses d'industries [Duran99], [Jouanne99]. En effet, ils sont reconnus pour représenter le problème de qualité de l'alimentation électrique le plus sérieux en termes des pertes de production. Il a été évalué qu'un arrêt de chaîne de production causé par des perturbations de réseau puissance peut coûter entre 10k\$ à 1M\$ US.

Après l'apparition d'un creux de tension, les équipements de protection peuvent demander un arrêt, le maintien de la puissance à la charge peut causer une surintensité ou une sous-tension peut apparaître sur le lien cc des entraînements à vitesse variable (EVV) [Duran99], [Zyl98], [Strangas96]. L'arrêt d'un moteur dans un système multi-moteur ou la perte momentanée de synchronisme entre moteurs peut déstabiliser le procédé en entier et imposer un arrêt complet du système. De plus, la mise hors service de charges motrices suite à un creux de tension a plusieurs répercussions, par exemple, pour les entraînements à ca, perte de synchronisme avec le flux tel que la ré-accélération se fait avec des courants d'appel élevés, avec un facteur de puissance faible et en un temps très long, causant la prolongation du creux de tension.

Des moyens pour corriger ces inconvénients ont été proposés pour maintenir l'équipement en opération pendant les creux de tension. La plupart des publications sur ce sujet traitent d'une conception améliorée des convertisseurs de puissance qui ont la capacité de passer au travers des creux de tension et l'addition d'éléments de stockage au système [Duran99], [Jouanne99], [Zyl98] ou d'une modification de la logique de protection pour maintenir la machine opérationnelle, de même que le synchronisme au niveau de flux pour permettre une accélération efficace [Strangas96], [Holtz94]. Dans ce dernier cas, la modification n'est que du côté logiciel pour programmer le contrôle logique de l'onduleur, qui doit fonctionner en mode génératrice et il est supposé que la perte de vitesse est acceptable.

L'étude [Strangas96] conclut que le facteur dominant de l'insensibilité des entraînements à vitesse variable aux creux de tension est la logique de commande et non les caractéristiques des équipements. Des études ont été faites pour caractériser les entraînements à vitesse variable en présence des creux de tension, expérimentalement et par simulation [Bollen99], [Bollen00a], et

des propositions ont été établies pour définir la sensibilité des EVV aux creux de tension utilisant la courbe CBEMA [Lamoree94]. Ces études n'ont rien présenté sur la sensibilité des systèmes multi-moteur couplés comme dans de nombreux procédés de fabrication continue, par exemple, l'industrie du papier, du textile, la pétrochimie, le bobinage, le laminage, l'extrusion de plastic, etc.

Des lois de conservation et des propriétés matérielles de base sont utilisées pour modéliser le modèle de couplage mécanique. La procédure de modélisation est semblable à [Koç02] dans laquelle le matériau est modélisé en utilisant les lois de Hooke (élasticité), loi de Coulomb (frottement) et la loi de conservation de masse.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la caractérisation de la sensibilité d'un système d'entraînement à vitesse variable couplé mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable en présence de creux de tension [Bollen00a] de types A, B et C. Une loi de commande correctrice sera aussi introduite et évaluée pour les creux de tension de type A.

4.2 CREUX DE TENSION

Une classification des creux de tension non équilibrés a été proposée dans [Bollen97] et a été exposée au chapitre III. Dans notre étude nous allons évaluer la réponse du système (figure 3.5) en présence des creux de tension de types A, B et C (figure 4.1.). Le type A est un creux équilibré; B et C sont des creux non équilibrés. A est due aux défauts triphasés équilibrés, les types B et C sont dus aux défauts monophasés et entre phase. Ces trois types de creux représentent bien qualitativement l'ensemble des creux de tension recensés.

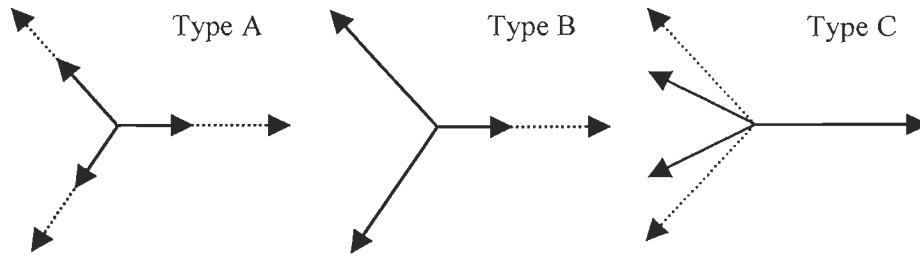


Figure 4.1 Présentation des types étudiés de creux de tension.

Pour les creux de tension de type A (figure 4.2), nous définissons l'amplitude des creux de tension comme la différence entre la tension de phase nominale et la tension de phase réelle, divisée par la tension de phase nominale.

Pour les creux de tension de type B (figure 4.3), nous définissons l'amplitude des creux de tension comme la différence entre la tension de phase nominale et la tension de phase réelle la plus basse, divisée par la tension de phase nominale.

Pour les creux de tension de type C (figure 4.4), nous caractériserons le saut d'angle de phase ϕ (en degrés) comme la valeur absolue du changement de phase; nous supposons que la tension de la phase A ne change pas pendant que les tensions des phases B et C baissent pour maintenir une tension d'ordre zéro. Soit :

$$V_b = V_c = \frac{-V_a}{2 \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\phi * \pi}{180}\right)} \quad (4-1)$$

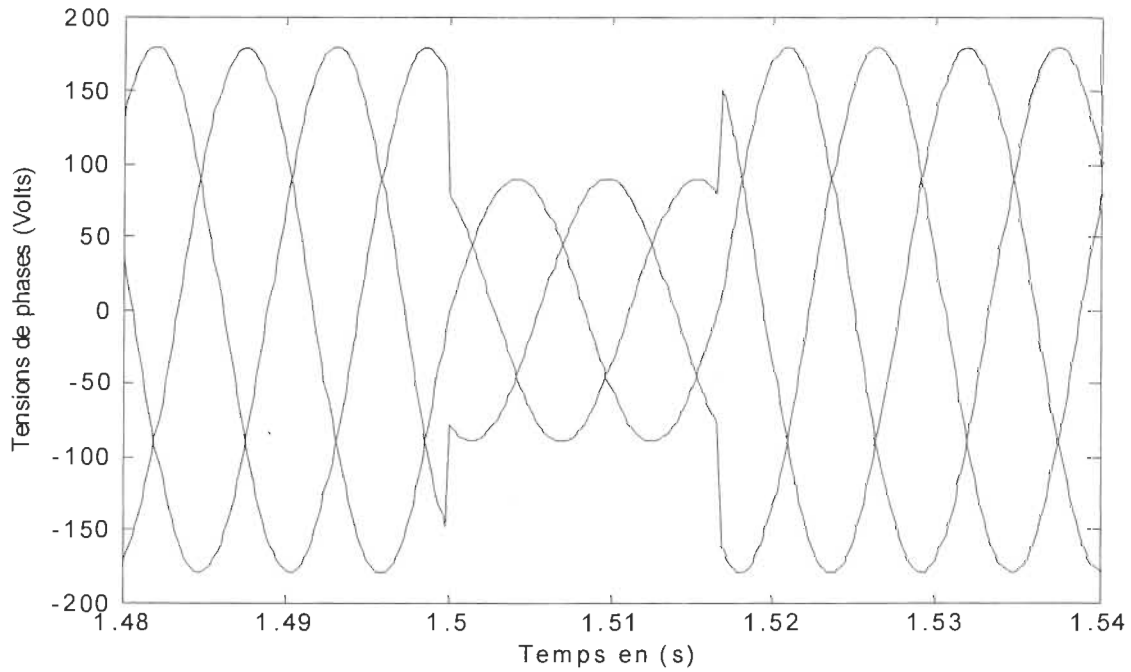


Figure 4.2 Variations des tensions de phase en présence de 90% de creux, de type A.

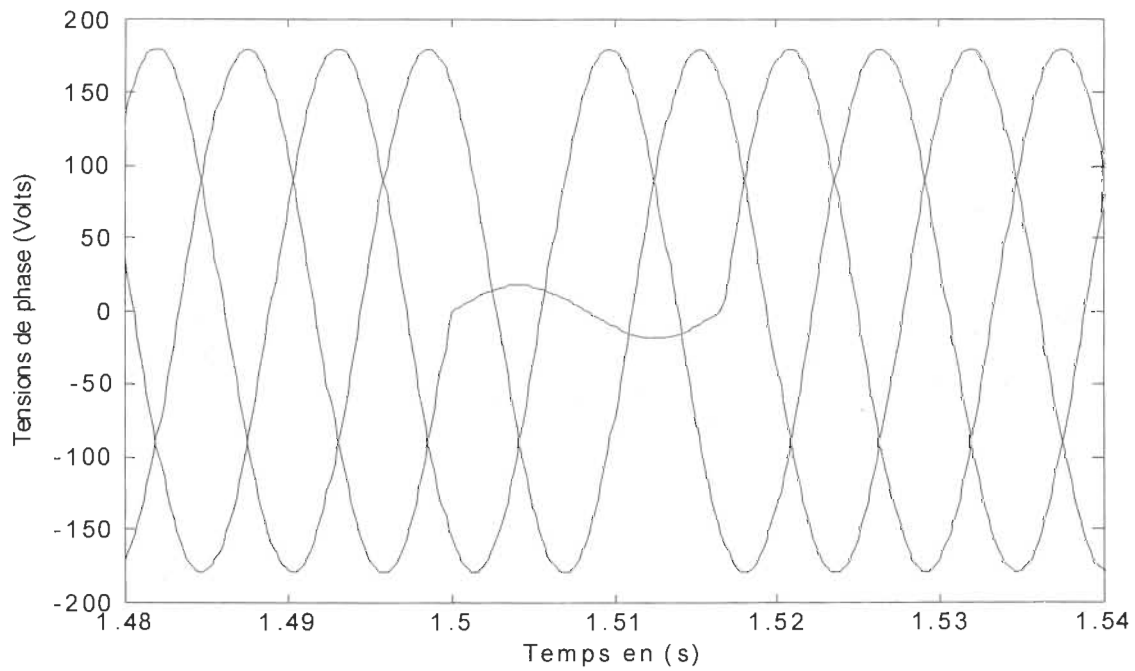


Figure 4.3 Variations des tensions de phase en présence de 90% de creux, de type B.

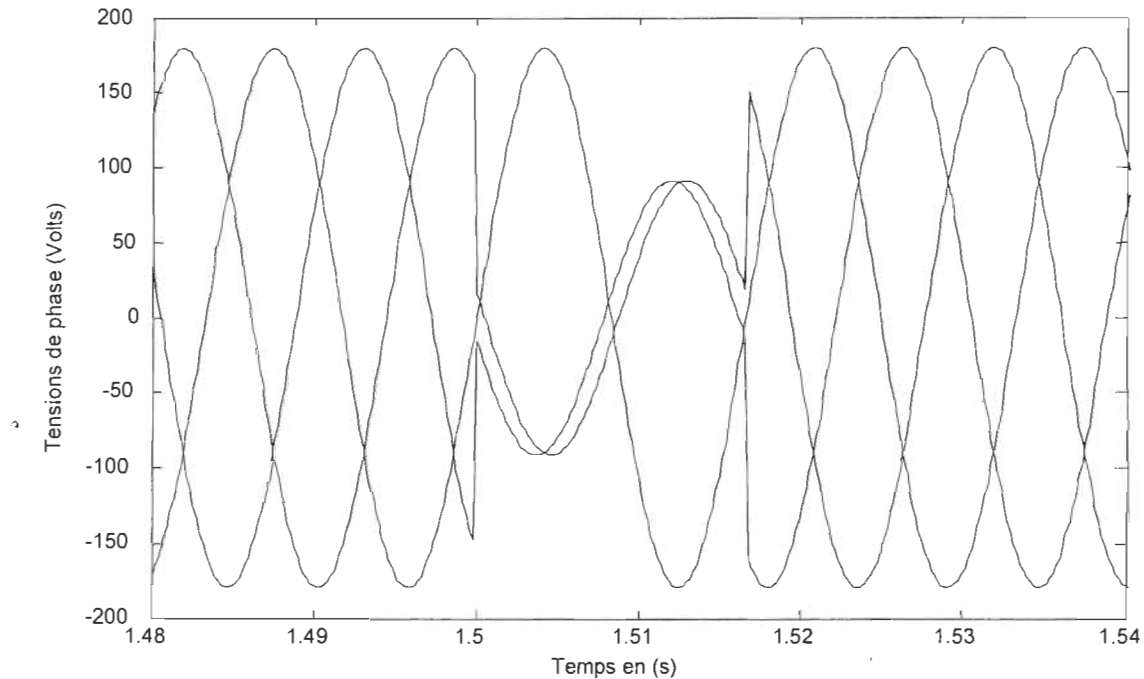


Figure 4.4 Variations des tensions de phase en présence d'un saut de phase de 50° de creux, de type C.

4.3 EFFET DES CREUX DE TENSION SUR UN SYSTÈME D'EVV AVEC COMMANDE PAR ORIENTATION DE FLUX

Chaque type de creux de tension est simulé pour différentes valeurs d'amplitude et de saut de phase avec une durée de 10 cycles. Le tableau 4.1 montre les conditions d'essai pour différentes valeurs d'inertie J et de couple de charge T_L .

Tableau 4.1 : Caractéristiques des tests

	J (kg.m^2)	T_L (N)
<i>cas 1</i>	0.49	20
<i>cas 2</i>	0.245	20
<i>cas 3</i>	0.245	-20
<i>cas 4</i>	0.49	-20

Dans les simulations, la vitesse de référence est maintenue constante. Le régime de démarrage dure environ 1 s et les creux de tension sont appliqués à 1.5 s lorsque le système est dans son état d'équilibre.

La figure 4.5 montre le modèle d'un EVV avec commande par orientation de flux sous *Power System Blockset*, et la figure 4.6 montre le bloc de commande par orientation de flux. Les paramètres du modèle sont présentés dans l'annexe D.

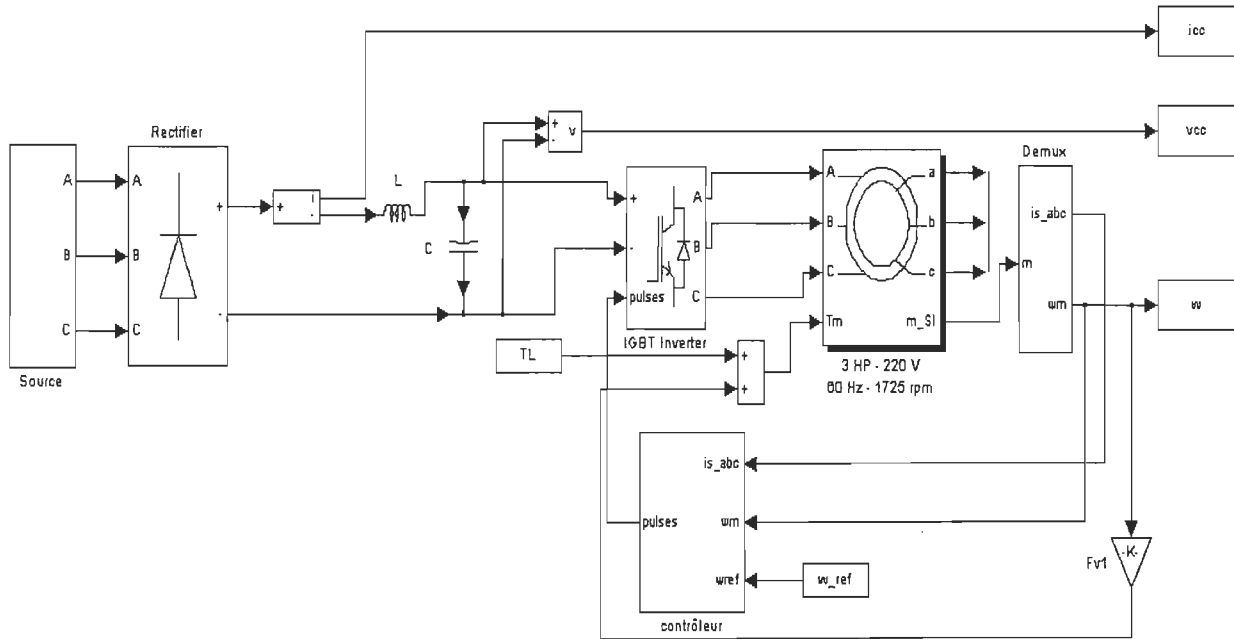


Figure 4.5 EVV avec commande par orientation de flux sous PSB

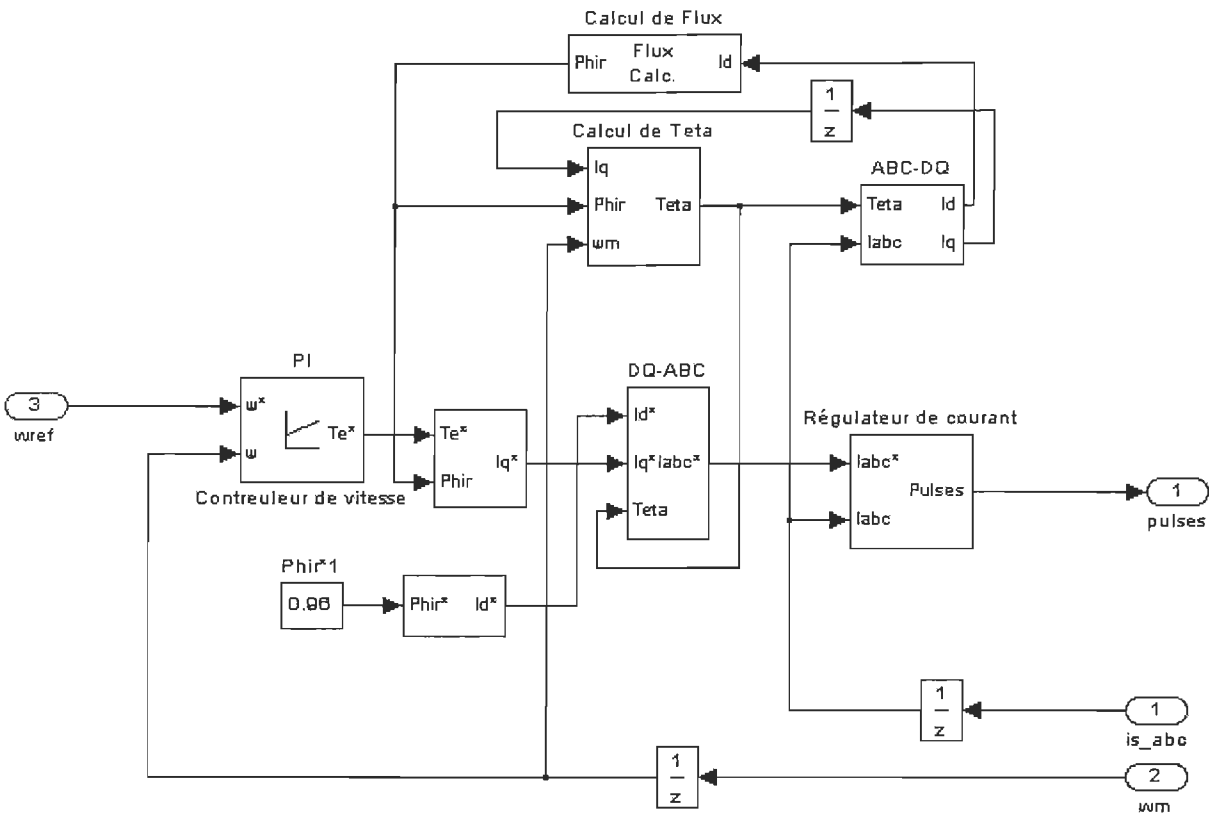


Figure 4.6 Commande par orientation de flux sous PSB

4.3.1 RÉSULTATS DE SIMULATIONS

Pour les différents types de creux de tension, le système d'EVV ne réagit pas dans les cas 3 et 4. Le moteur est en mode génératrice, ce qui amène à un transfert d'énergie à partir du moteur vers le lien cc à travers l'onduleur. Ceci résulte en une augmentation de la tension du lien cc avec une stabilisation à une valeur plus grande que sa valeur moyenne (figure 4.7). La source de couple externe pilote ainsi la charge (le moteur) qui est alors très peu sensible au niveau de l'alimentation ca et qui devient totalement insensible dès que la tension du lien cc dépasse la tension d'alimentation et ainsi que le pont de diodes d'entrée est bloqué. Ainsi, la vitesse du moteur ne varie pas (figure 4.8).

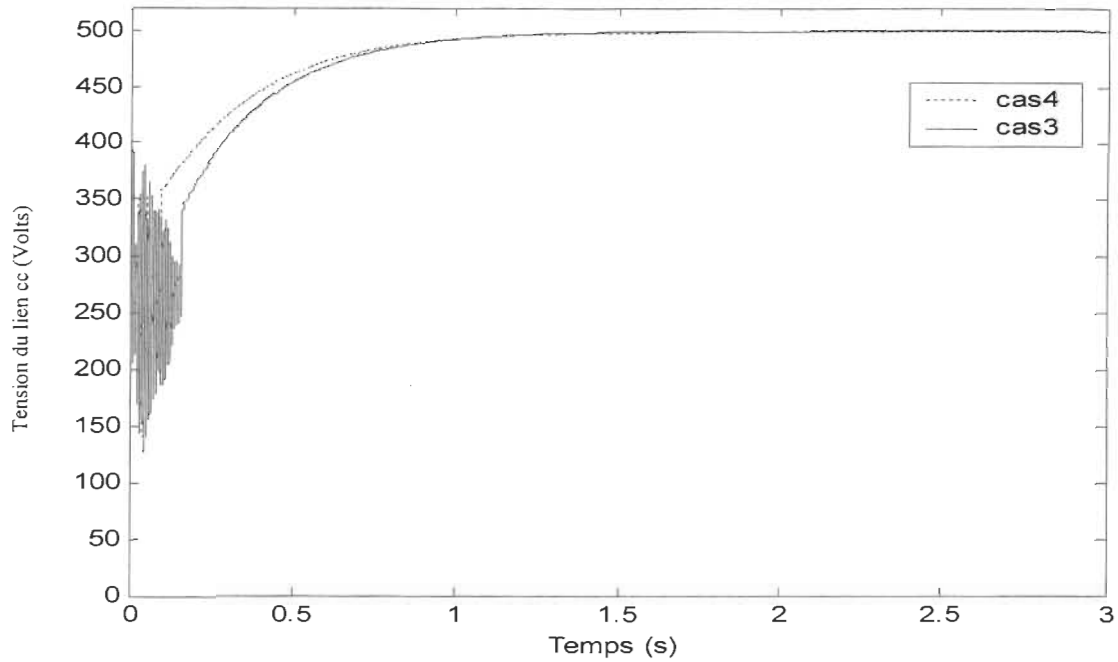


Figure 4.7 Tension du lien cc dans un système d'EVV en présence de différents types de creux de tension, cas 3 et 4.

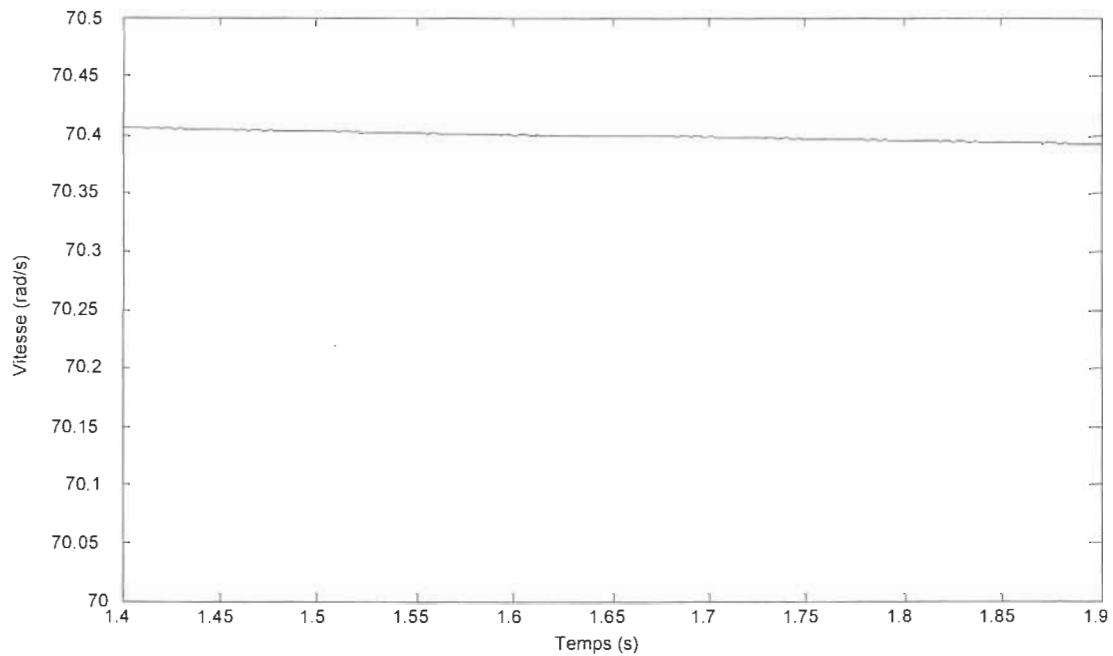


Figure 4.8 Vitesse du moteur dans un système d'EVV en présence de différents types de creux de tension, cas 3 et 4.

Ainsi, dans la suite, nous allons présenter les résultats de simulations pour les cas 1 et 2 seulement, à 50% de creux de tension pour les types A et B, et un saut de phase de 50° pour le type C.

Trois types de réponses transitoires seront présentés :

1. la tension du lien cc en fonction du temps – permet d'évaluer les conditions d'opération de l'onduleur et du redresseur de tête, permet de déterminer au moins partiellement la nature des transferts de puissance en jeu et représente une grandeur qui est suivie pour la protection des EVV;
2. le courant cc d'entrée en fonction du temps – le courant de sortie du pont redresseur à diodes caractérise le courant d'appel sur le réseau ca, soit une grandeur suivie pour la protection du système, et permet de déterminer à quel moment il y a apport d'énergie du réseau ca;
3. la vitesse du moteur en fonction du temps – le suivi de cette grandeur permet d'évaluer l'effet des creux sur la sortie primaire du moteur.

4.3.1.1 CREUX ÉQUILIBRÉ (type A)

Les figures 4.9 à 4.11 présentent les résultats de simulations des cas 1 et 2 à 50% de creux de tension de type A pour une durée de 10 cycles.

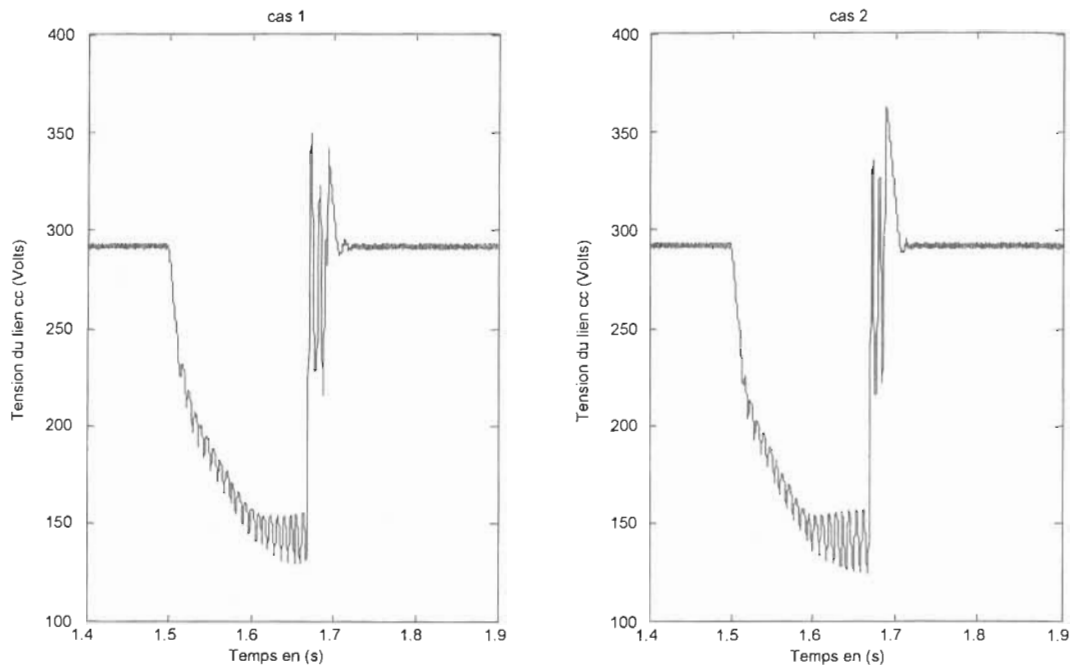


Figure 4.9 Tension du lien cc dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type A.

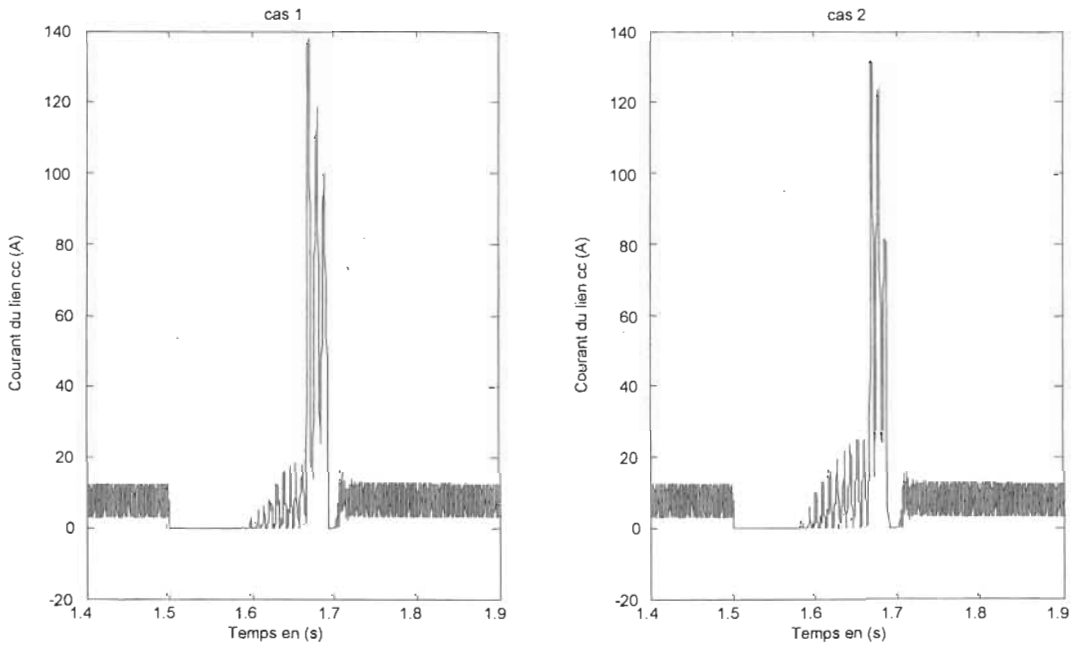


Figure 4.10 Courant cc d'entrée dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type A.

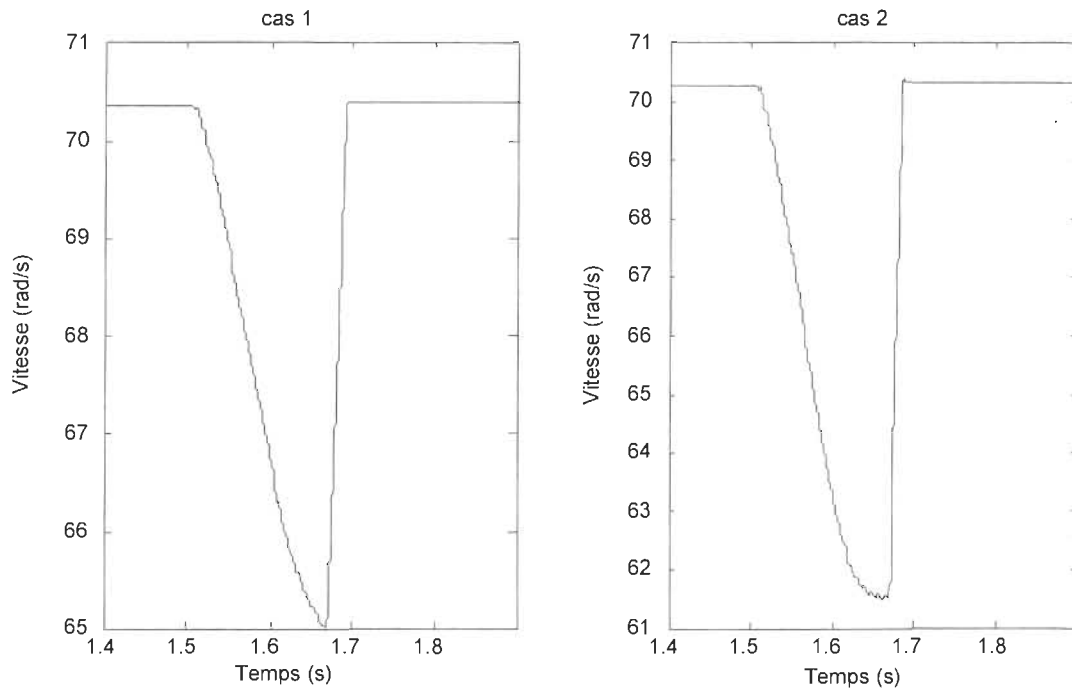


Figure 4.11 Vitesse du moteur dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type A.

4.3.1.2 CREUX DÉSÉQUILIBRÉ DE TYPE B

Les figures 4.12 à 4.14 présentent les résultats de simulation des cas 1 et 2 à 50% de creux de tension de type B pour une durée de 10 cycles.

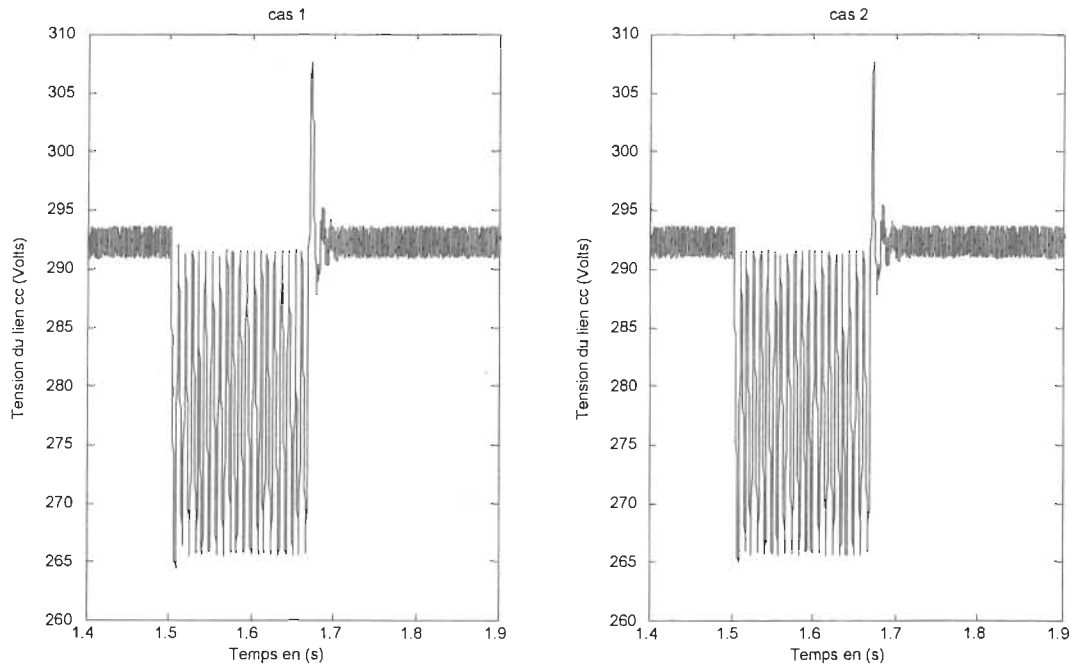


Figure 4.12 Tension du lien cc dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type B.

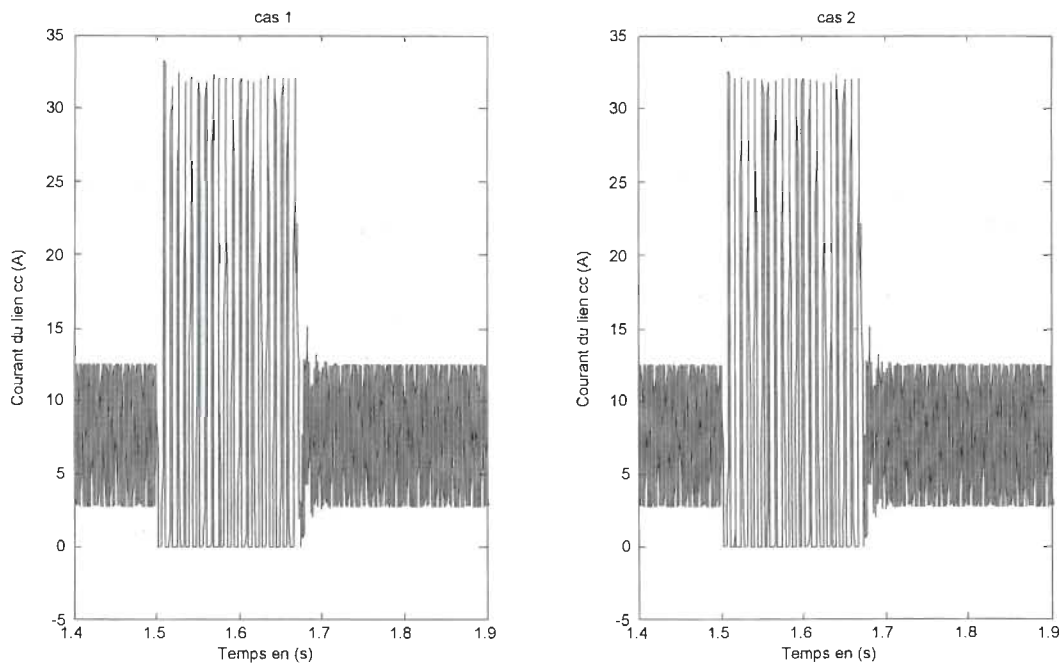


Figure 4.13 Courant cc d'entrée dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type B.

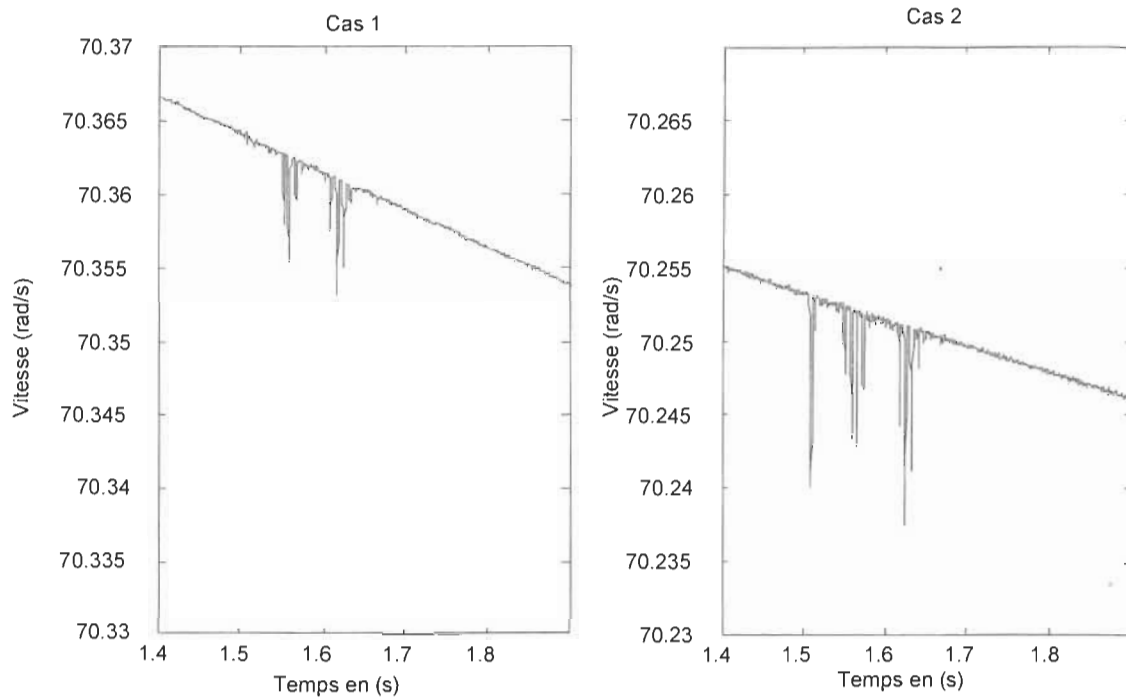


Figure 4.14 Vitesse du moteur dans un système d'EVV simple en présence de 50% de creux, de type B.

4.3.1.3 CREUX DÉSÉQUILIBRÉ DE TYPE C

Les figures 4.15 à 4.17 présentent les résultats de simulation des cas 1 et 2 pour un saut de phase de 50° selon la définition des creux de tension de type C pour une durée de 10 cycles.

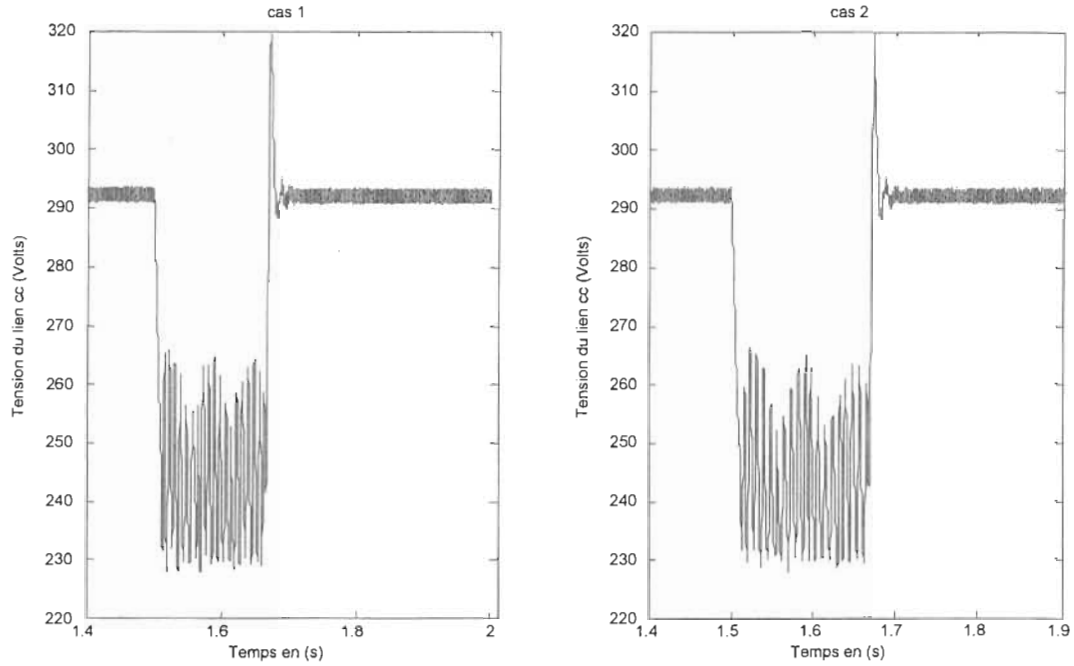


Figure 4.15 Tension du lien cc dans un système d'EVV simple en présence de 50° de saut de phase, de type C.

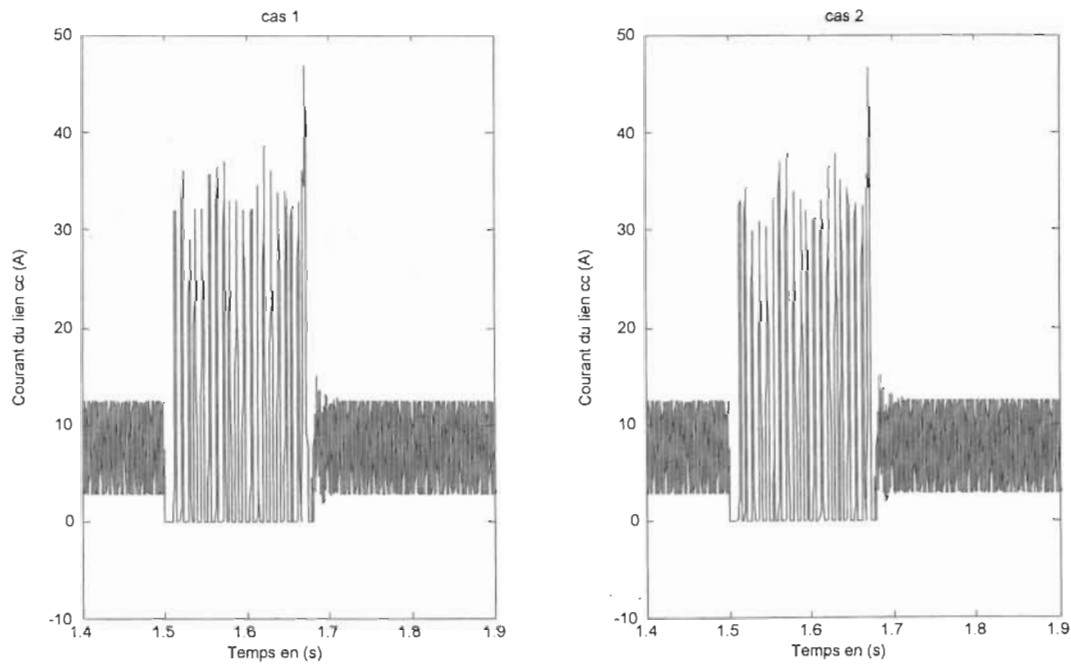


Figure 4.16 Courant cc d'entrée dans un système d'EVV simple en présence de 50° de saut de phase, de type C.

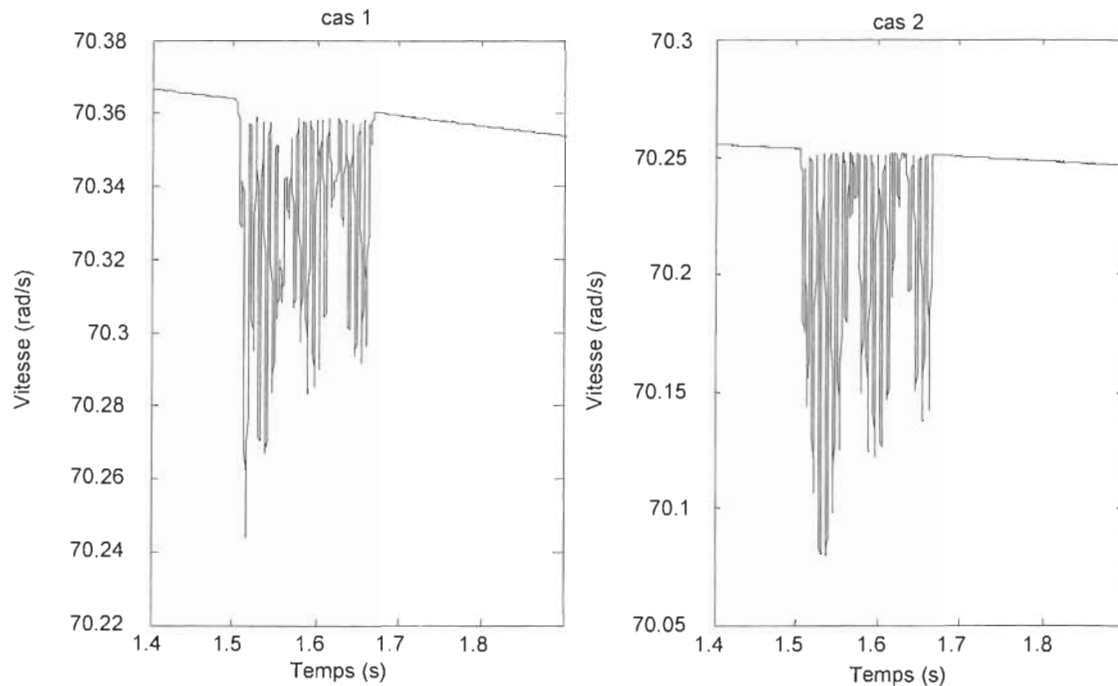


Figure 4.17 Vitesse du moteur dans un système d'EVV simple en présence de 50° de saut de phase, de type C.

4.3.2 ANALYSE DES RESULTATS

À l'apparition de type A de creux de tension, le pont redresseur se bloque car la tension cc est supérieure à la tension d'entrée ca, ce qui amène à un courant cc nul (figure 4.10). Le moteur consomme l'énergie du lien cc et la tension du lien cc baisse (figure 4.9). Vue la diminution de la tension du lien cc, le moteur décélère à un taux imposé par la charge (figure 4.11). Quand la tension du lien cc atteint le niveau de la tension d'entrée ca, le pont de diodes recommence à conduire et le taux de décroissance de vitesse diminue grâce à ce nouvel apport d'énergie. À la fin de creux de tension, le rétablissement brusque de la tension d'entrée ca amène la conduction du pont redresseur d'entrée et un fort appel de courant, ce qui cause une surtension à cause des inductances de ligne et des interrupteurs. Notons que le pont à diodes se bloque de nouveau

pendant la surtension du lien cc; le comportement du système présente donc des changements de mode d'opération qui s'ajoutent aux nonlinéarités déjà présentes dans les modèles. Le moteur accélère jusqu'à sa vitesse de référence.

La présence du creux de tension de type B (creux sur une seule phase), mène à un blocage partiel du pont de diodes, une des tensions de ligne est maintenue à la tension nominale, ce qui permet de maintenir la tension du lien cc (figure 4.12) et un apport d'énergie du réseau pendant les phases saines, ce qui donne la possibilité de maintenir la puissance de sortie appelée par la charge (produit couple de charge – vitesse). Pour transférer cette puissance moyenne, comme aucune puissance n'est reçue du réseau pendant la période de blocage du pont de diodes, la puissance reçue pendant les phases saines doit être plus grande d'où le fort appel de courant du réseau pendant ces périodes de creux (figure 4.13). Ce courant est d'autant plus grand que l'efficacité de la loi de commande par orientation de flux est réduite à cause des fluctuations de la tension du lien cc autant en valeur moyenne qu'au niveau de la forme de la tension (figure 4.12). La transmission du couple électromagnétique pulsé mène à l'apparition des oscillations au niveau de la vitesse du moteur (figure 4.14).

Durant l'apparition du creux de tension de type C, les tensions de ligne maximales sont toutes plus faibles que la valeur nominale, ceci explique que même avec un apport partiel d'énergie du réseau, la tension du lien cc est réduite (figure 4.15), le pont de diodes s'est bloqué partiellement (figure 4.16), ce qui amène à des apparitions d'oscillations au niveau de la vitesse du moteur (figure 4.17). On pourrait en principe maintenir le débit de puissance vers la charge et maintenir la vitesse, mais la diminution de tension du lien cc et la forme de la tension réduisent l'efficacité de la loi d'orientation de flux et détériorent ainsi le régime de fonctionnement de la machine.

Les variations sont plus importantes dans le cas du type A par rapport aux types B et C, parce que pour le type A, le creux de tension affecte les trois tensions de ligne, cela bloque le pont redresseur, et baisse la tension du lien cc, d'où des variations plus importantes au niveau du courant du lien cc et de la vitesse du moteur.

4.4 EFFET DES CREUX DE TENSION SUR UN SYSTÈME D'EVV COUPLÉS

Nous considérons maintenant le système présenté au chapitre III soumis à des creux de tension de types A, B et C. Chaque type de creux de tension est simulé pour différentes valeurs d'amplitude et de saut de phase avec une durée variant de 1 à 30 cycles. Le tableau 4.2 montre les conditions de test pour différentes valeurs d'inertie pour les deux moteurs et de tensions mécaniques d'entrée et de sortie T_e et T_s (figure 3.1) respectivement.

Tableau 4.2. Caractéristiques des tests.

	J_1 (kg.m ²)	J_2 (kg.m ²)	T_e (N)	T_s (N)
<i>cas 1</i>	0.49	0.245	6	0
<i>cas 2</i>	0.245	0.49	6	0
<i>cas 3</i>	0.245	0.49	0	6
<i>cas 4</i>	0.49	0.245	0	6

Dans les simulations, les consignes de vitesse et de tension du matériau sont maintenues constantes. Les creux de tension sont appliqués à 1.5s, après la fin du régime de démarrage.

Le modèle du système couplé sous PSB est montré dans la figure 4.18. La figure 4.19 présente le modèle de la bande de matériau, et les paramètres des moteurs sont présentés dans l'annexe D.

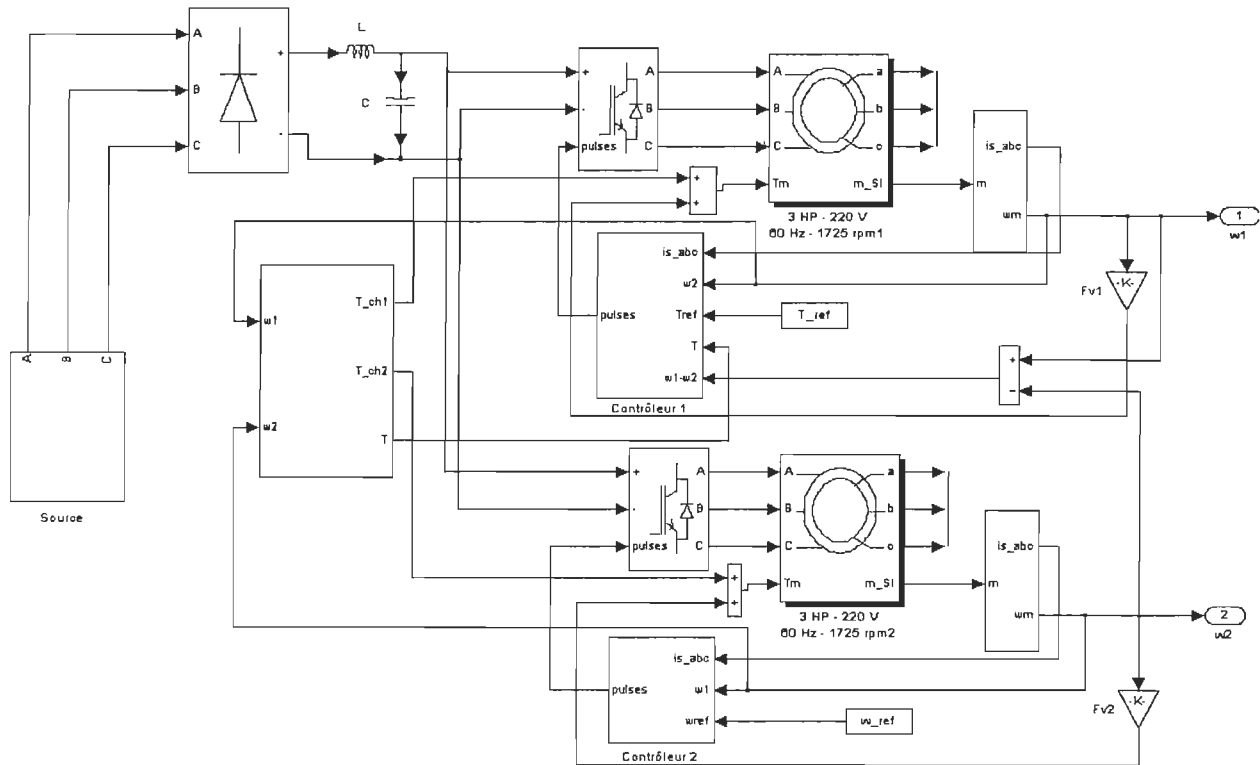


Figure 4.18 Modèle d'EVV couplés sous PSB

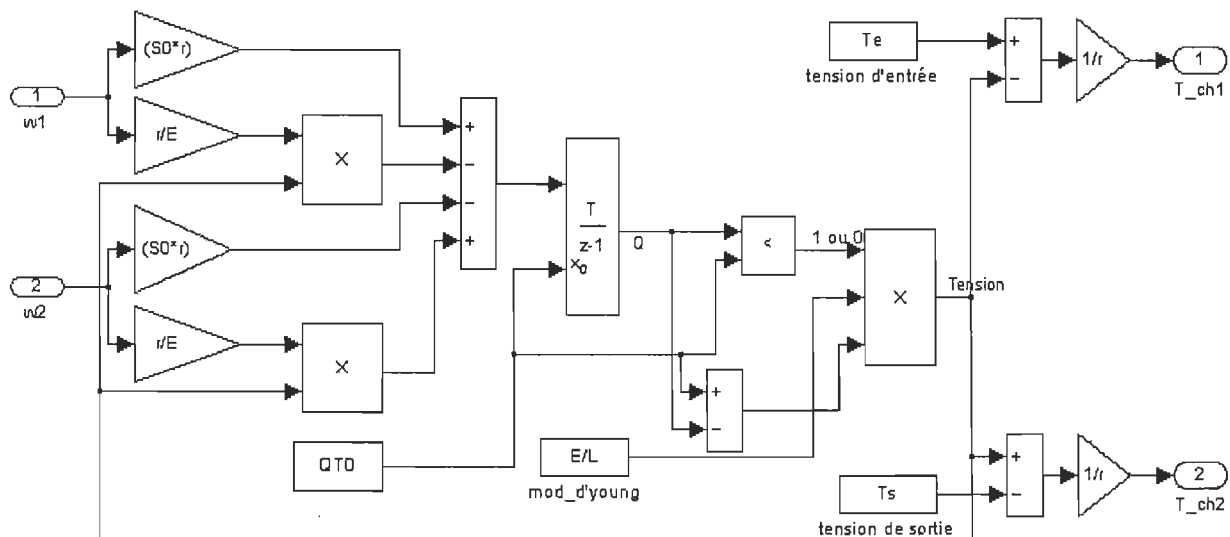


Figure 4.19 Modèle de la bande de matériau

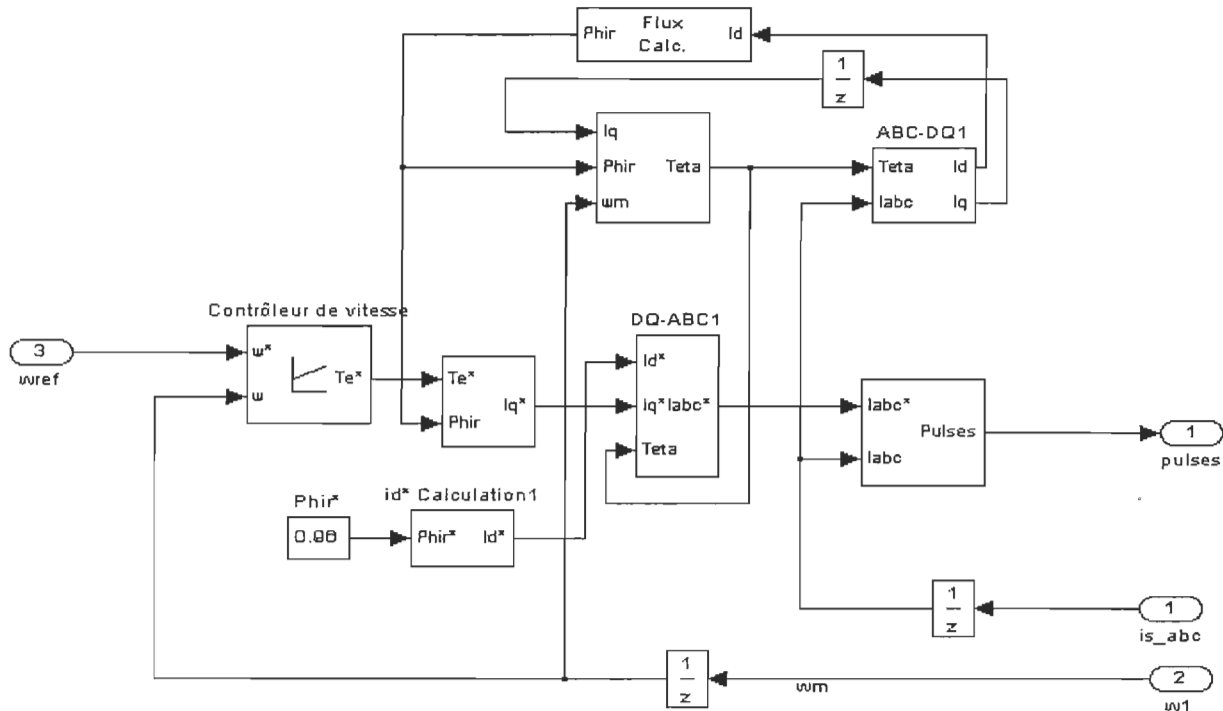


Figure 4.21 Modèle du contrôleur du moteur 2

Notons que les contrôleurs ne considèrent nullement les fluctuations de la tension d'alimentation, ni dans leur structure globale, ni dans la fonction d'orientation de flux. Les résultats de simulation vont être présentés pour les trois types de creux de tension A, B et C avec ces contrôleurs afin d'évaluer leur sensibilité aux creux de tension. Des lois de commande modifiées seront présentées et évaluées dans la prochaine section.

4.4.1 RÉSULTATS DE SIMULATIONS

Pour les cas 3 et 4, les deux moteurs fonctionnent en mode générateur, c'est-à-dire il y a un transfert de l'énergie injectée par la charge vers le lien cc à travers les moteurs et les onduleurs. Ceci cause une augmentation de la tension du lien cc, qui serait normalement limitée à l'aide d'un

hacheur de freinage, avec une stabilisation à une valeur plus grande que sa valeur nominale (Figure 4.22). Le réseau d'alimentation et le lien cc se trouvent donc totalement découplés peu après le début du cycle de démarrage. La tension dans le matériau ne variera donc pas suite à des diminutions de la tension d'alimentation (Figure 4.23). L'analyse de sensibilité aux creux de tension n'est donc pas pertinente. Dans la suite nous n'allons donc présenter que les résultats de simulation des cas 1 et 2 en présence de creux de tension de types A, B et C.

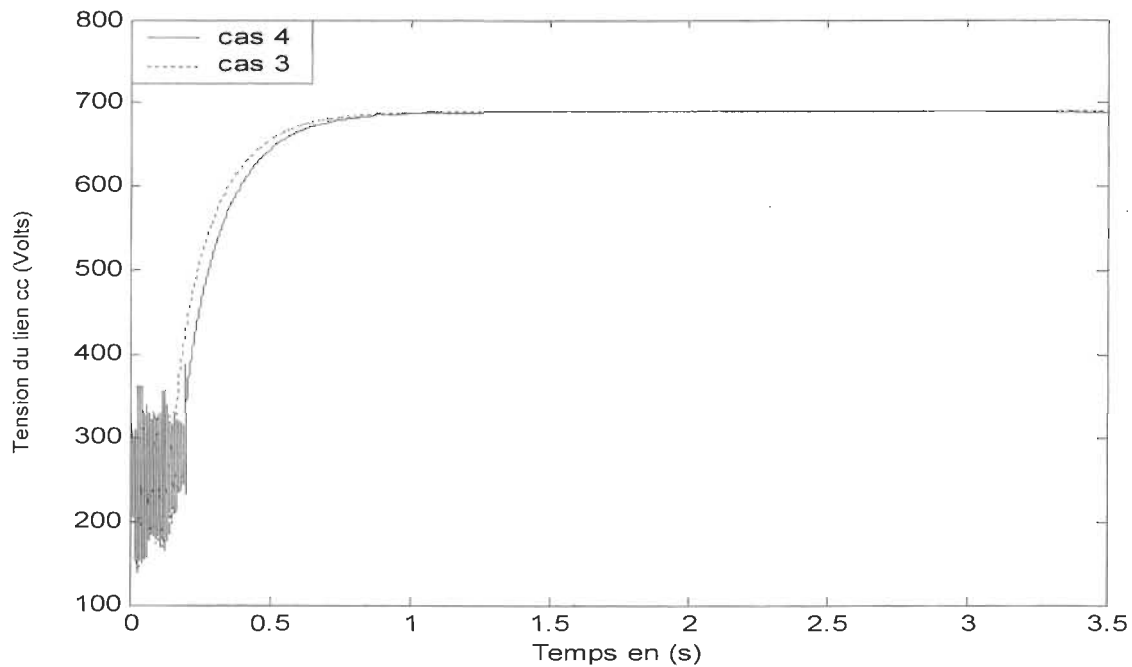


Figure 4.22 Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de différents types de creux de tension.

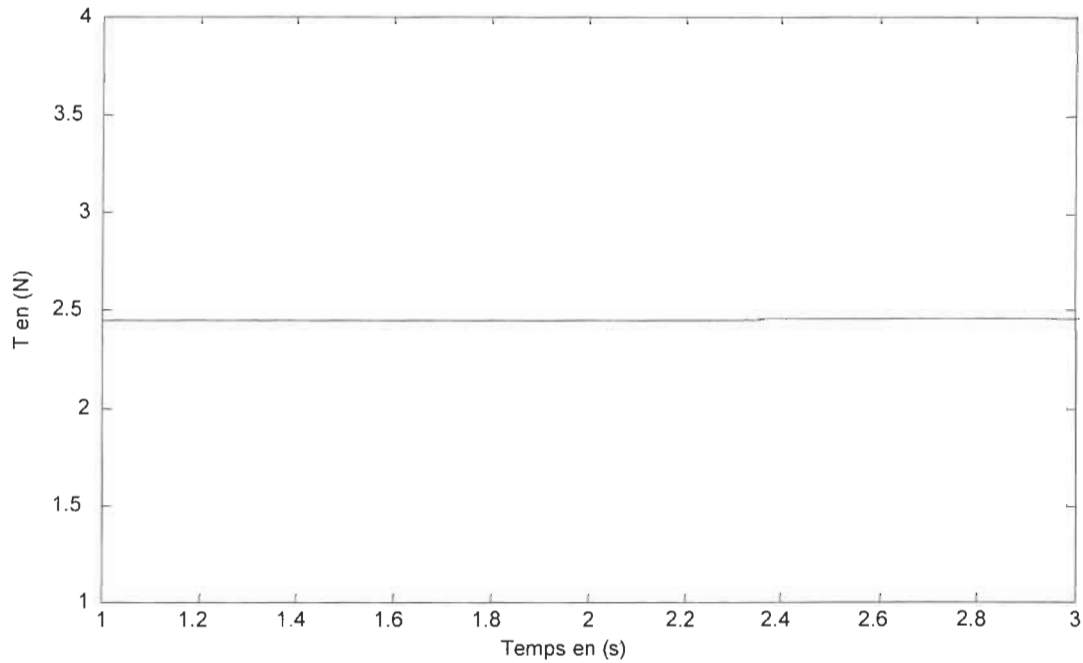


Figure 4.23 Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de différents types de creux de tension, cas 3 et cas 4.

Quatre types de réponses transitoires seront présentés :

1. la tension du lien cc en fonction du temps – permet d'évaluer les conditions d'opération de l'onduleur et du redresseur de tête, permet de déterminer au moins partiellement la nature des transferts de puissance en jeu et représente une grandeur qui est suivie pour la protection des EVV;
2. le courant cc d'entrée en fonction du temps – le courant de sortie du pont redresseur à diodes caractérise le courant d'appel sur le réseau ca, soit une grandeur suivie pour la protection du système, et permet de déterminer à quel moment il y a apport d'énergie du réseau ca;

3. la tension mécanique dans la bande de matériau en fonction du temps - le suivi de cette grandeur permet d'évaluer l'effet des creux sur une des deux sorties primaires du système et permet en particulier de déterminer qualitativement l'effet des creux sur la qualité du produit; les instants de stress maximum sont aussi déterminés à l'aide de ces réponses;
4. la vitesse des moteurs en fonction du temps – le suivi de cette grandeur permet d'évaluer l'effet des creux sur la seconde sortie primaire du moteur et permet de visualiser certains états de vibration.

Trois types de mesures ont été retenus pour les courbes de synthèse :

1. la valeur maximum de la tension dans le matériau en fonction de l'amplitude du creux, la durée du creux étant maintenue constante;
2. la valeur maximum du courant cc d'entrée en fonction de l'amplitude du creux, la durée du creux étant maintenue constante;
3. la valeur maximum de la tension dans le matériau en fonction de la durée du creux, pour une amplitude fixe du creux.

4.4.1.1 CREUX ÉQUILIBRÉ (type A)

Nous allons présenter les résultats de simulations des cas 1 et 2, en présence de 50% de creux de tension avec une durée de 10 cycles. Les résultats pour des creux de durée et d'amplitude variables sont présentés sous formes de graphiques de synthèse, les réponses transitoires associées étant présentées dans l'annexe A.

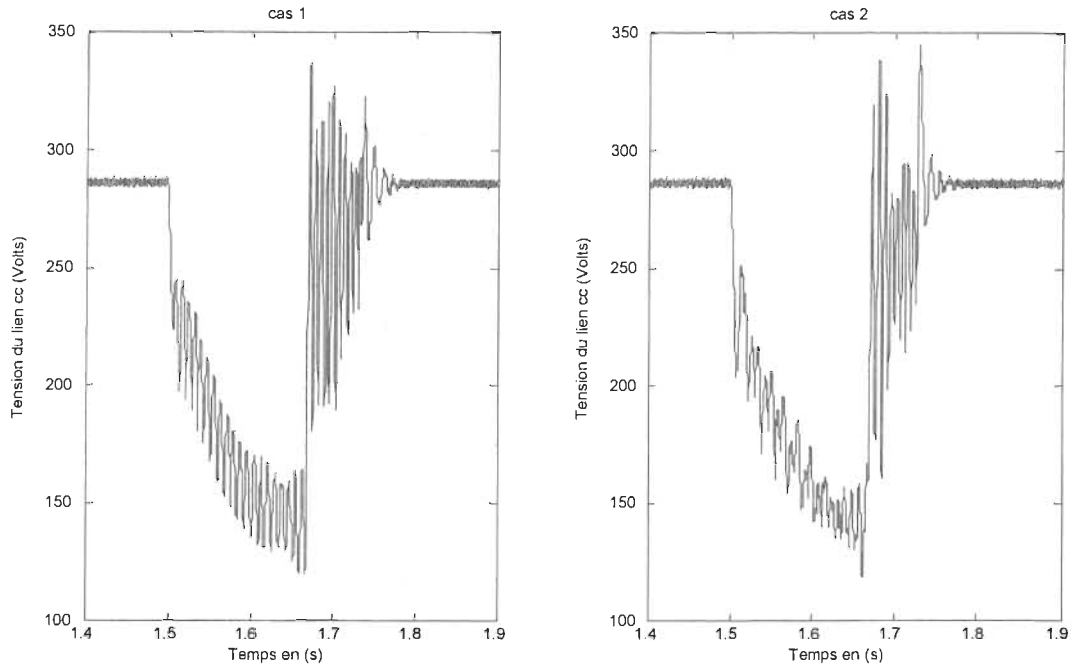


Figure 4.24 Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A.

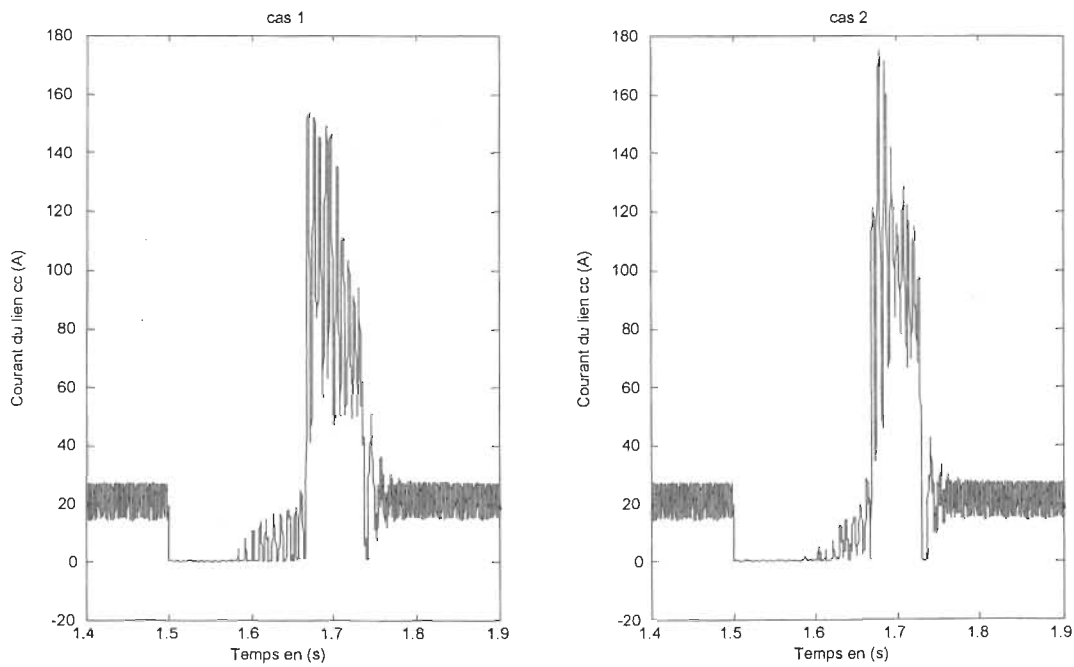


Figure 4.25 Courant cc d'entrée dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A.

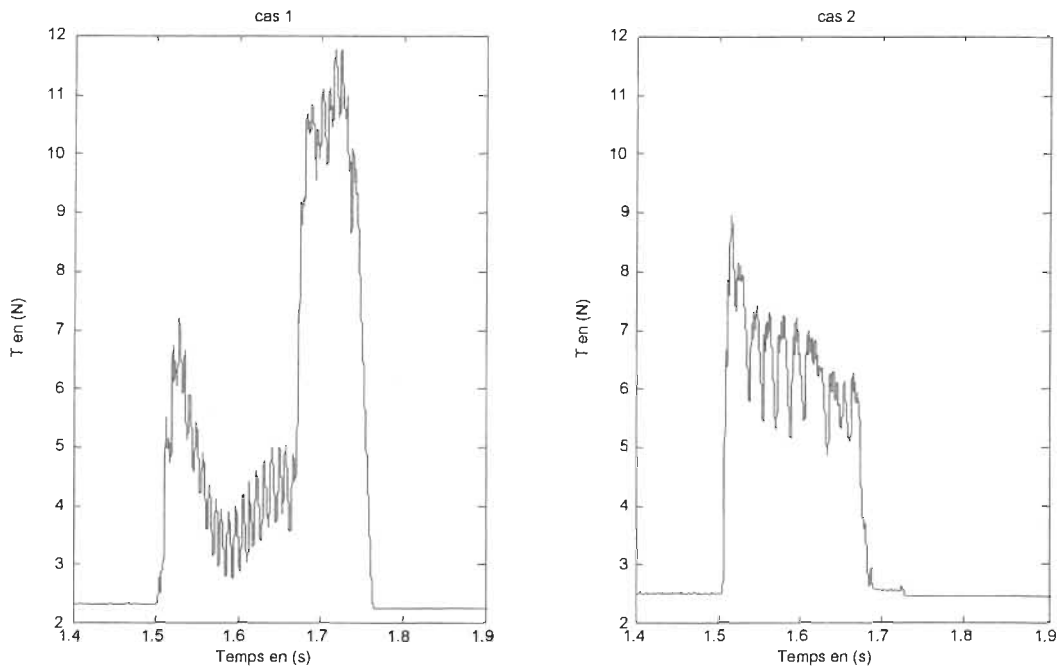


Figure 4.26 Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A.

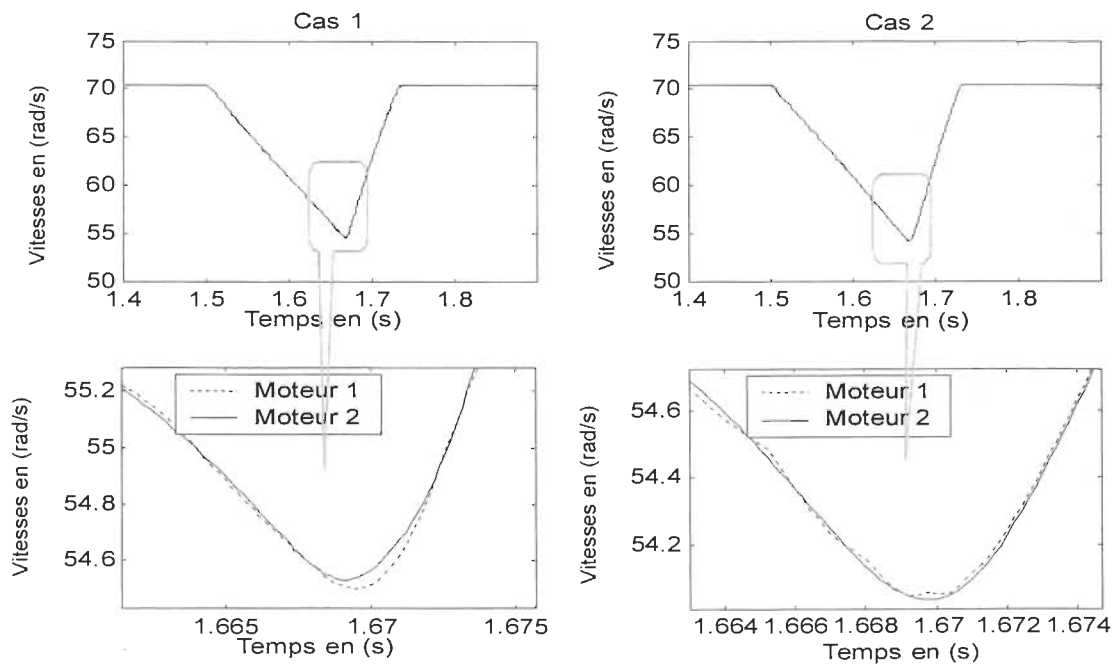


Figure 4.27 Vitesse des moteurs dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type A.

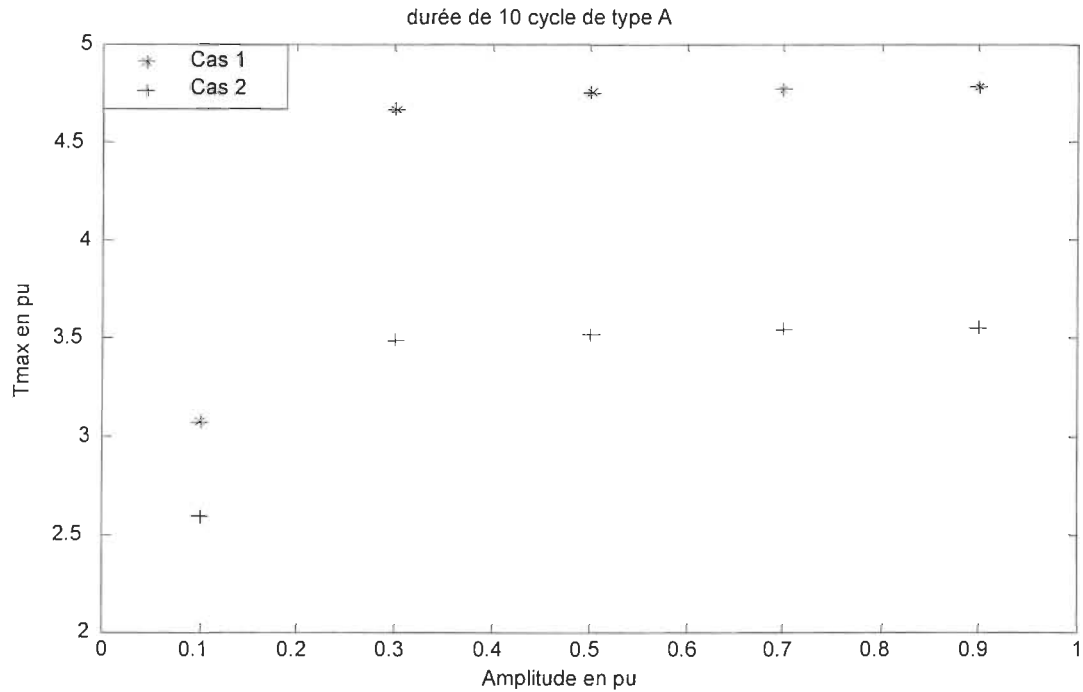


Figure 4.28 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type A

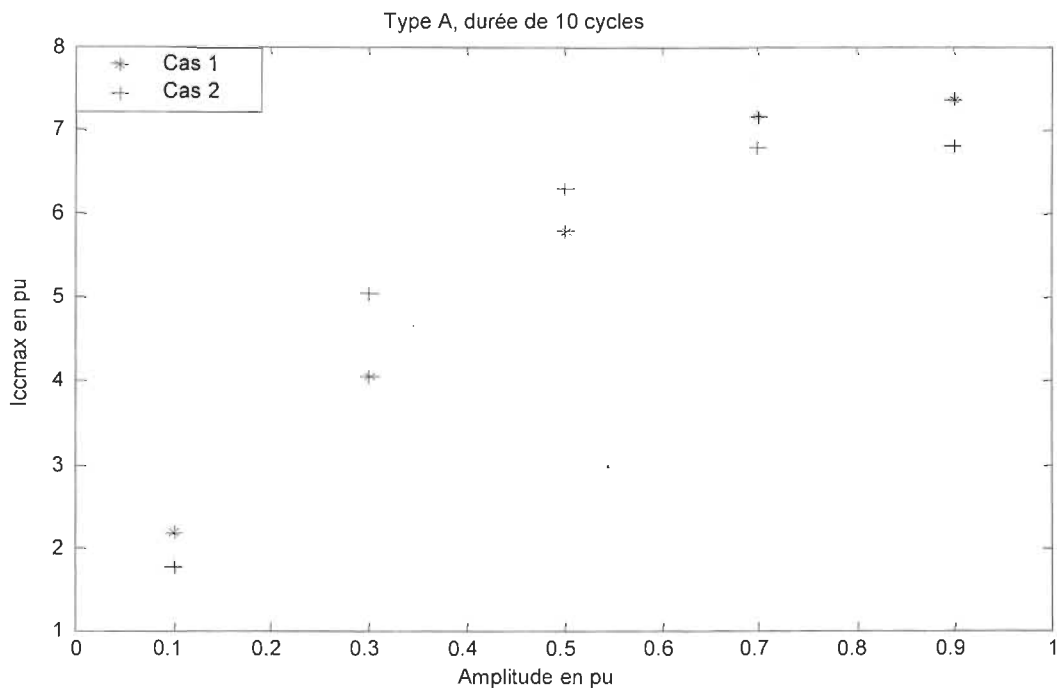


Figure 4.29 Ratio entre la valeur maximum du courant cc et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type A

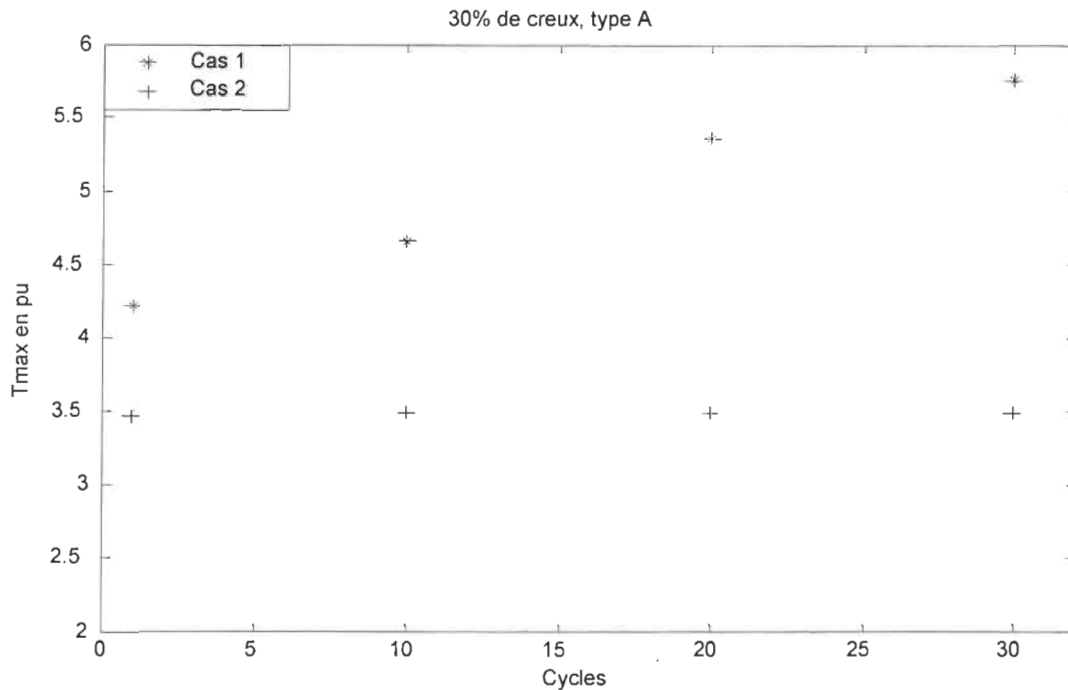


Figure 4.30 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction du nombre de cycles de creux de tension, type A

4.4.1.2 CREUX DÉSÉQUILIBRÉ DE TYPE B

Nous allons présenter les résultats de simulations des cas 1 et 2, en présence de 50% de creux de tension avec une durée de 10 cycles. Les résultats pour des creux de durée et d'amplitude variables sont présentés sous formes de graphiques de synthèse, les réponses transitoires associées étant présentées dans l'annexe B.

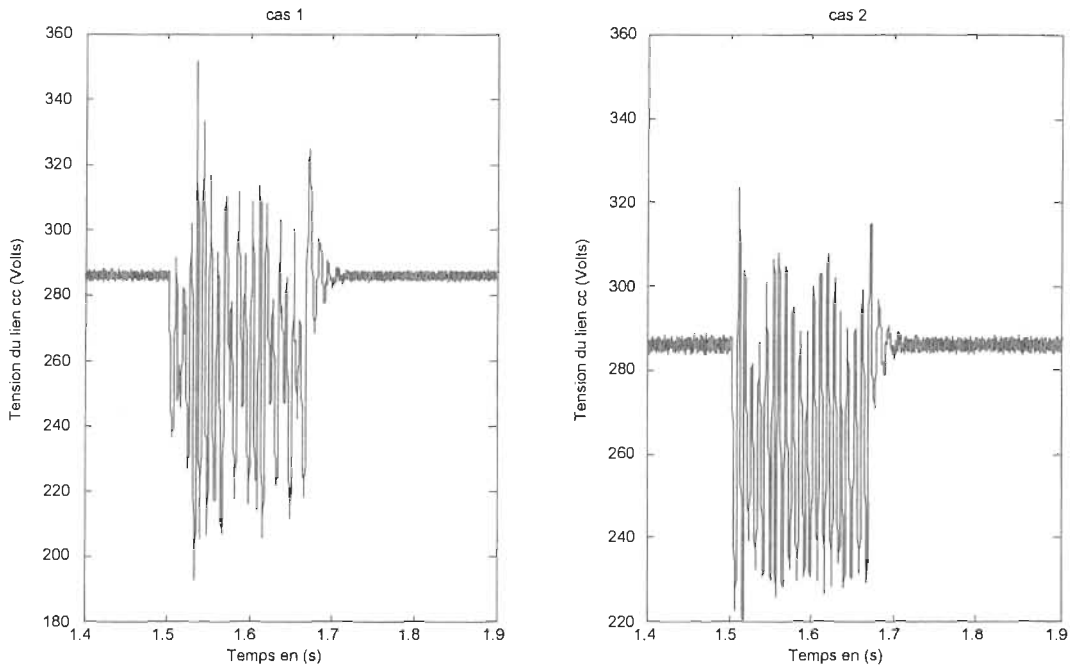


Figure 4.31 Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type B.

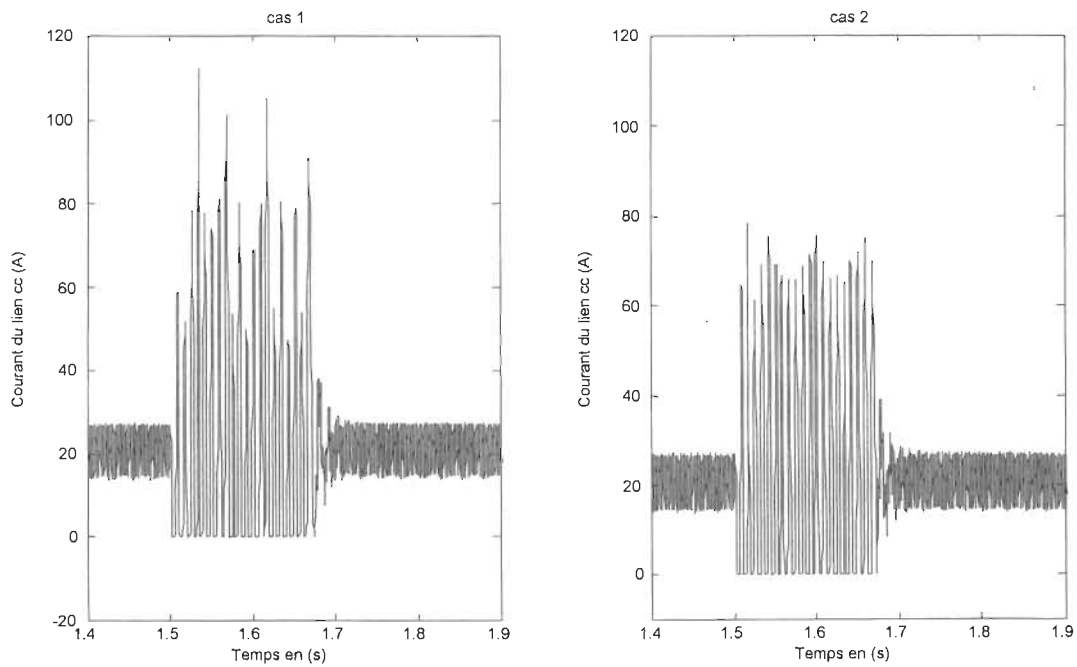


Figure 4.32 Courant cc d'entrée dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type B.

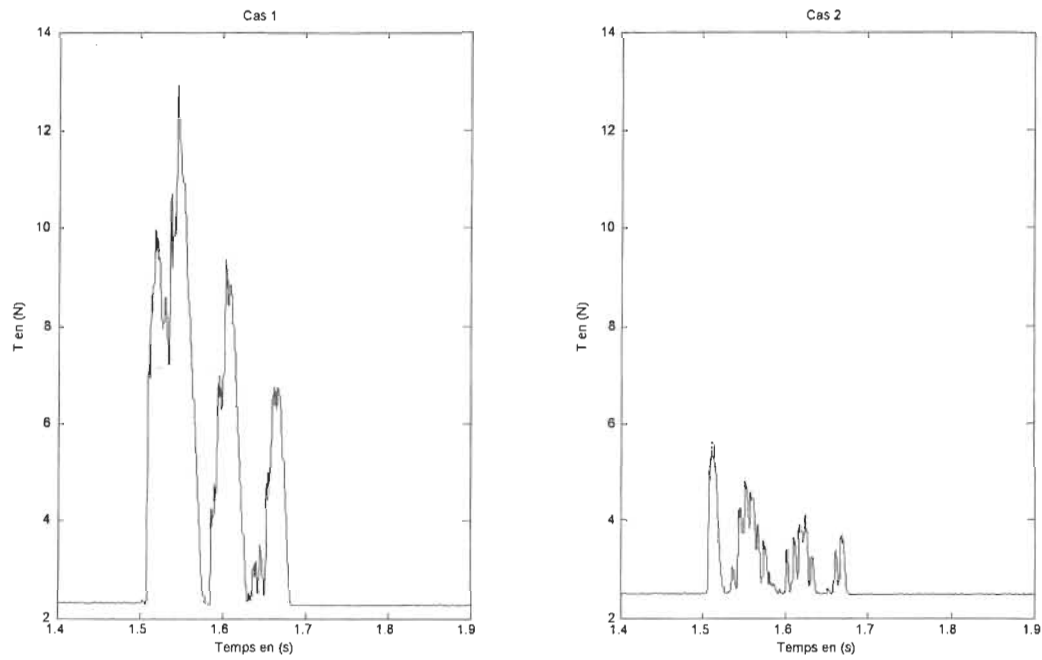


Figure 4.33 Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension, de type B.

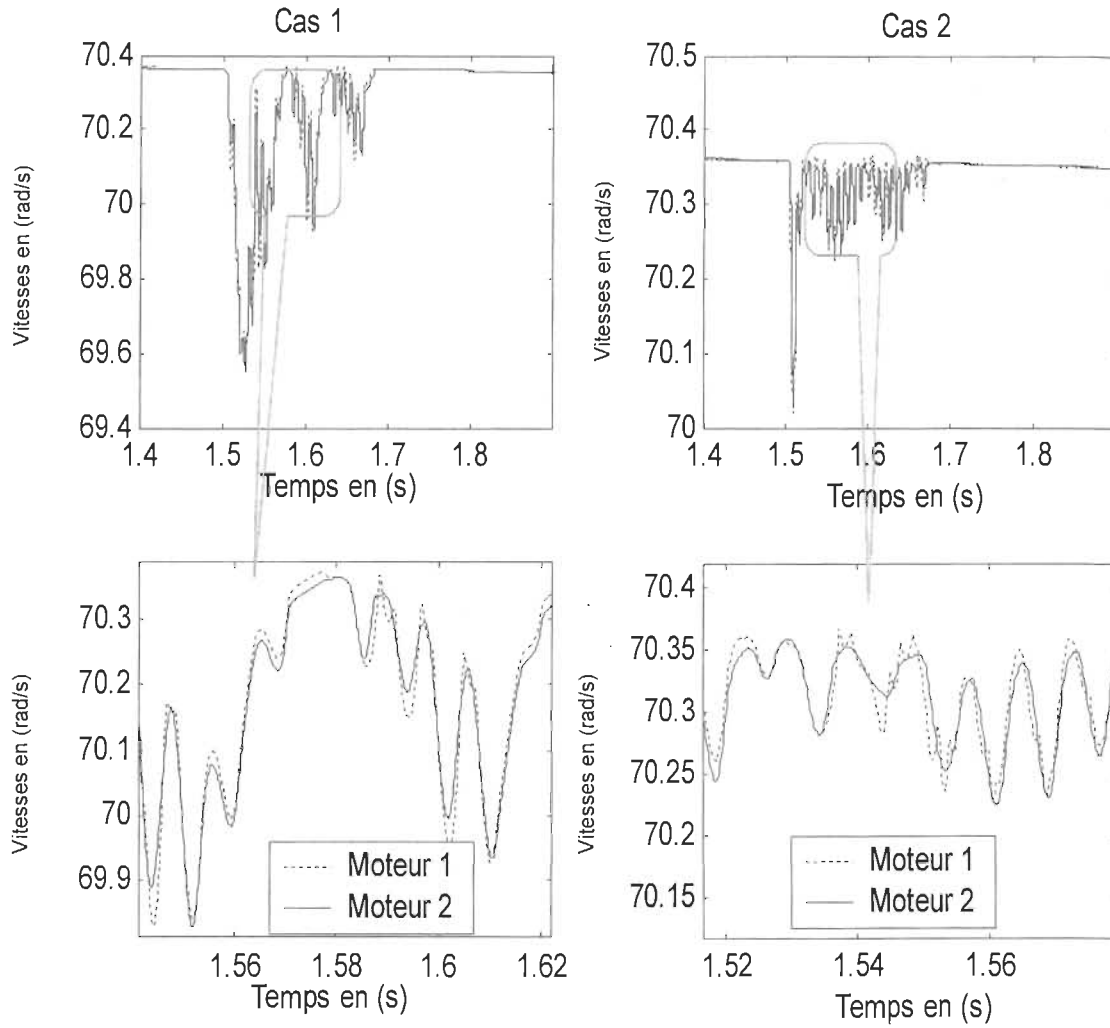


Figure 4.34 Vitesse des moteurs dans un système d'EVV couplé en présence de 50% de creux de tension, de type B.

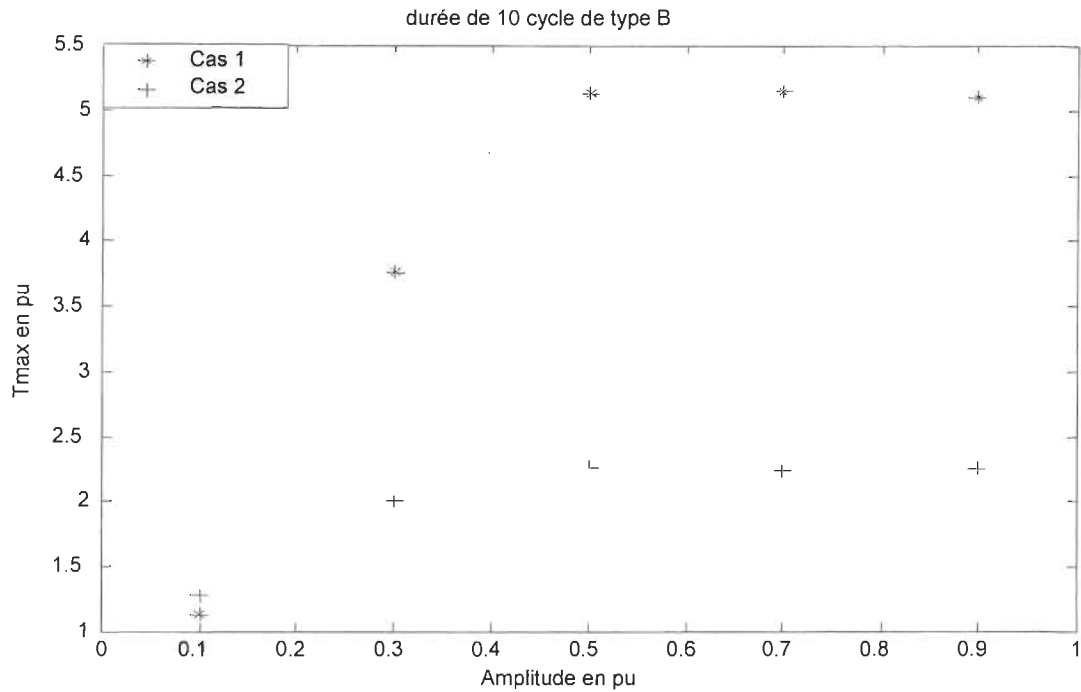


Figure 4.35 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type B

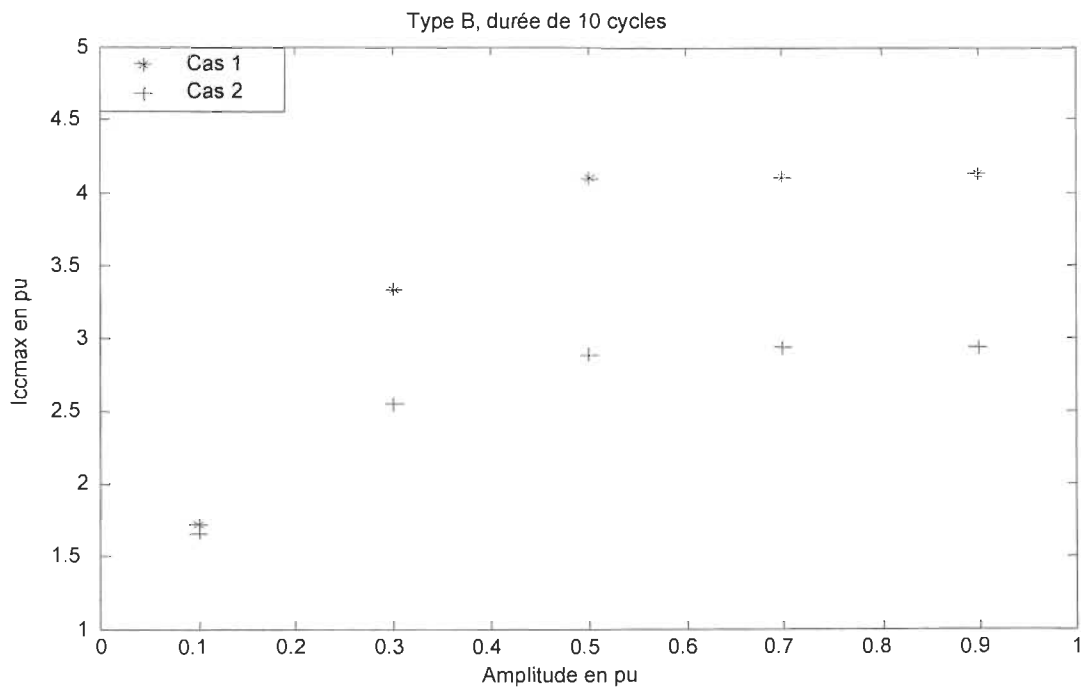


Figure 4.36 Ratio entre la valeur maximum du courant cc et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type B

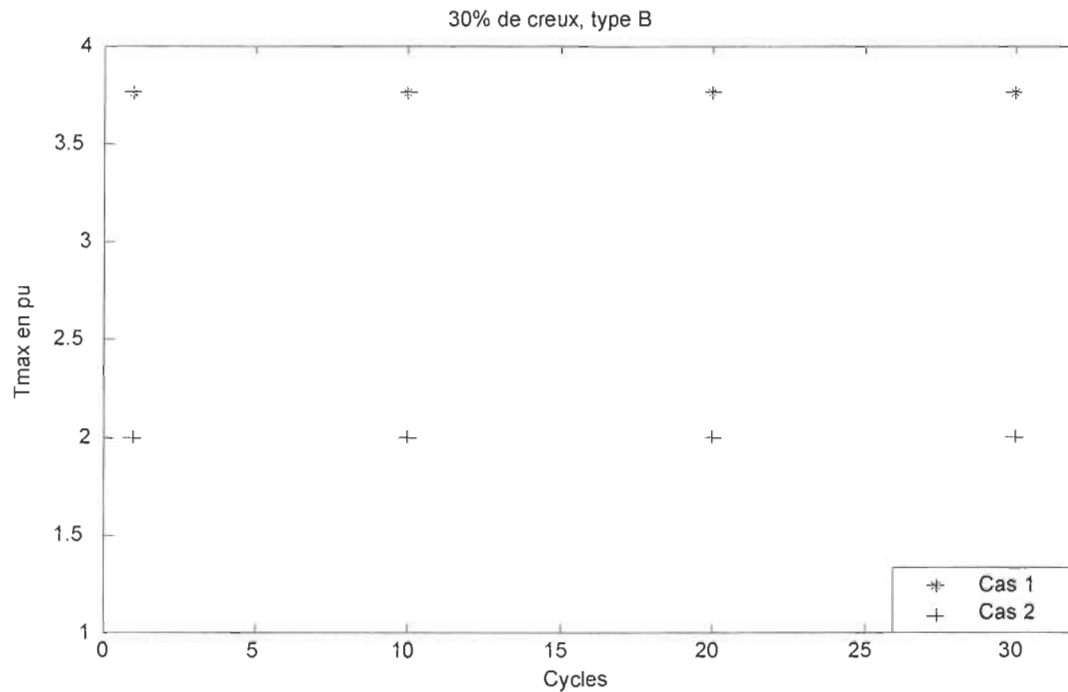


Figure 4.37 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de nombre de cycle de creux de tension, type B

4.4.1.3 CREUX DÉSÉQUILIBRÉ DE TYPE C

Nous allons présenter les résultats de simulations des cas 1 et 2, en présence d'un saut de phase de 30° de creux de tension avec une durée de 10 cycles. Les résultats pour des creux de durée et d'amplitude variables sont présentés sous formes de graphiques de synthèse, les réponses transitoires associées étant présentées dans l'annexe C.

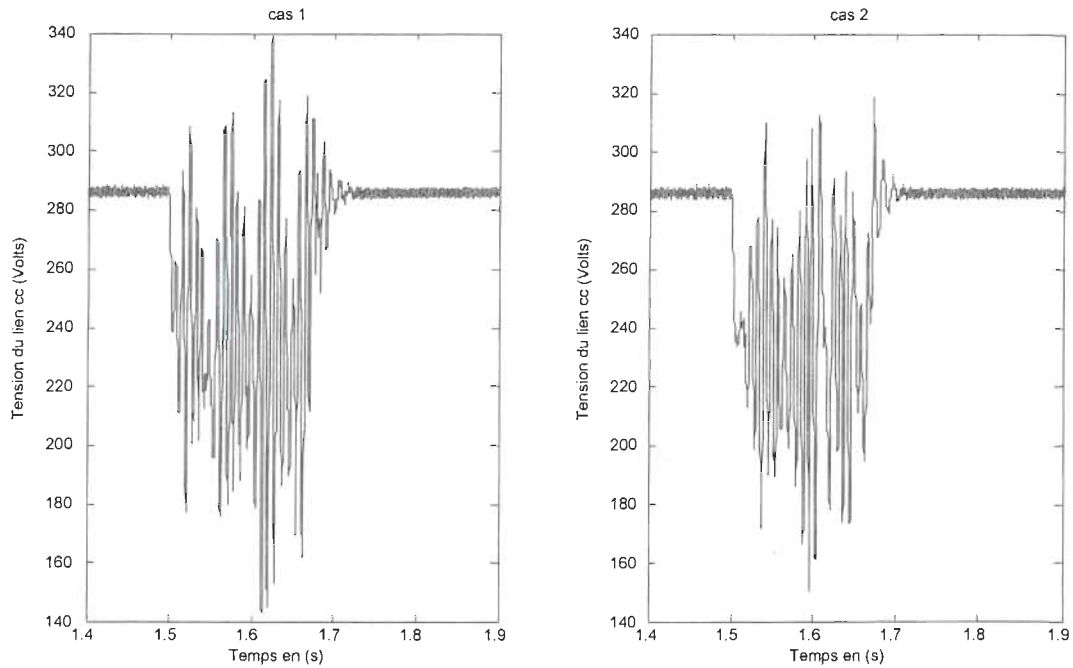


Figure 4.38 Tension du lien cc dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C.

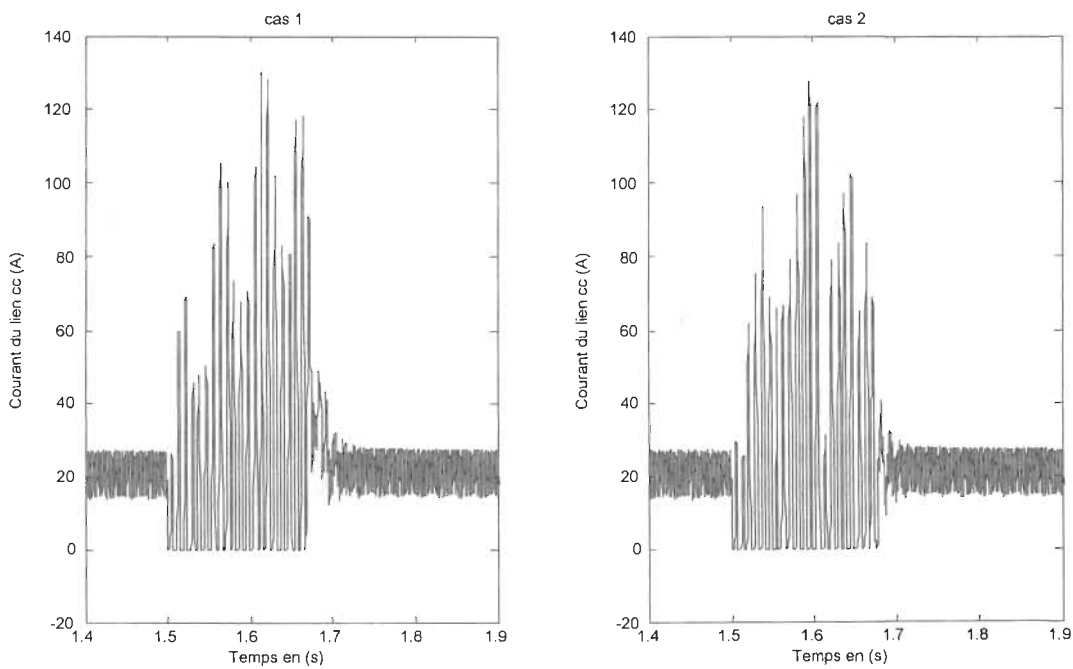


Figure 4.39 Courant cc d'entrée dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C.

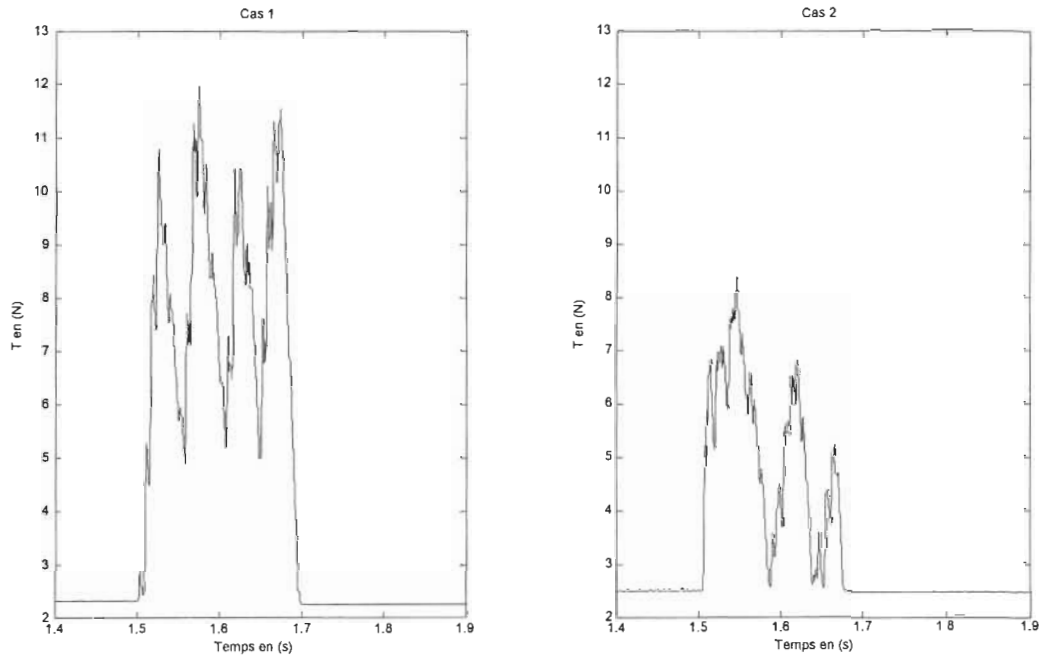


Figure 4.40 Tension du matériau dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C.

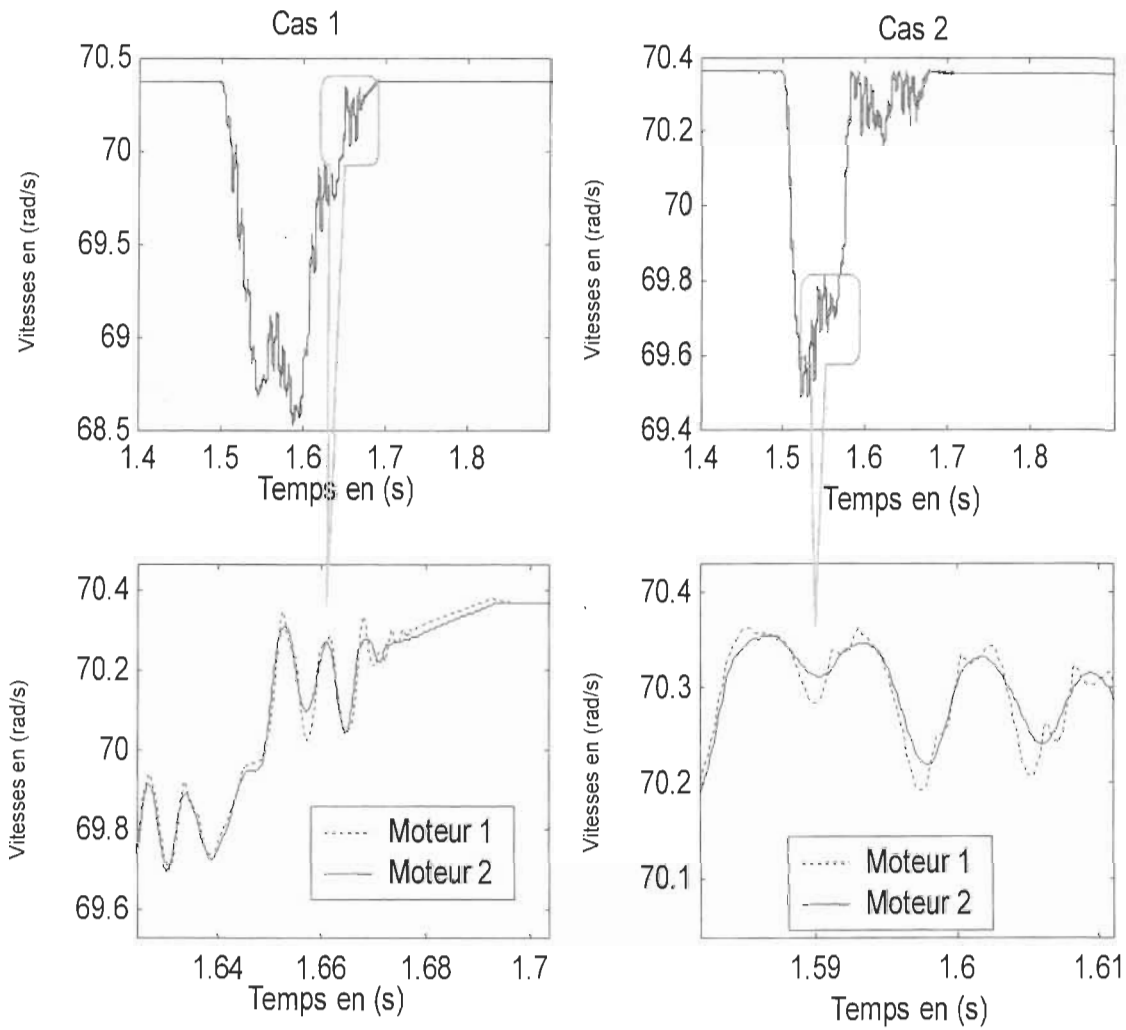


Figure 4.41 Vitesse des moteurs dans un système d'EVV couplés en présence de 30° de saut de phase, de type C.

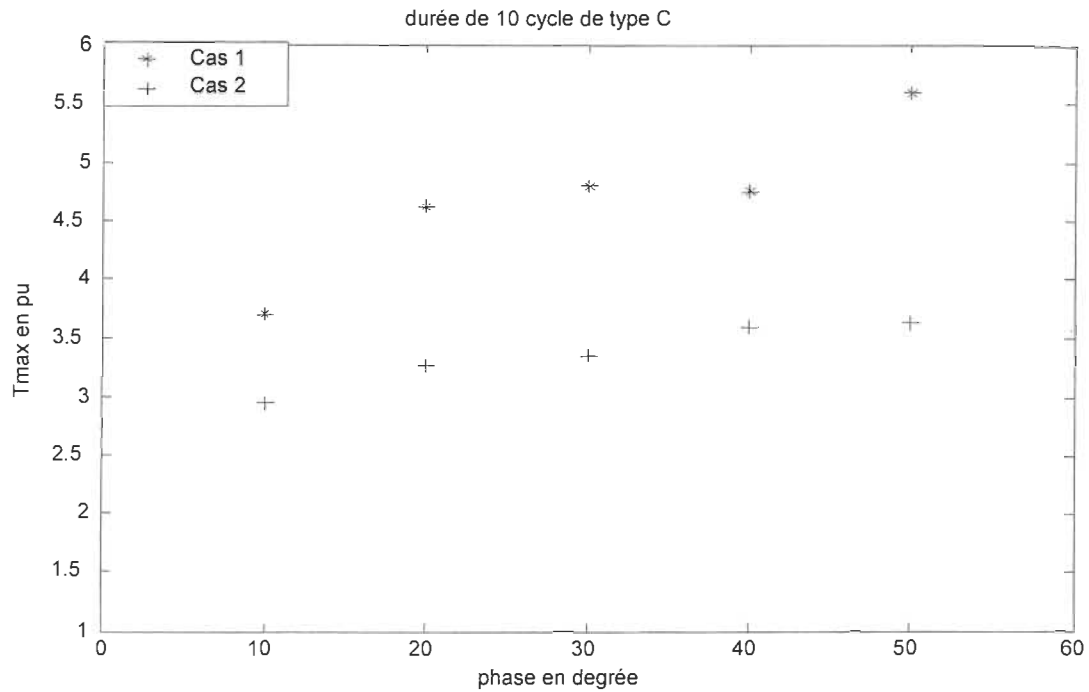


Figure 4.42 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type C

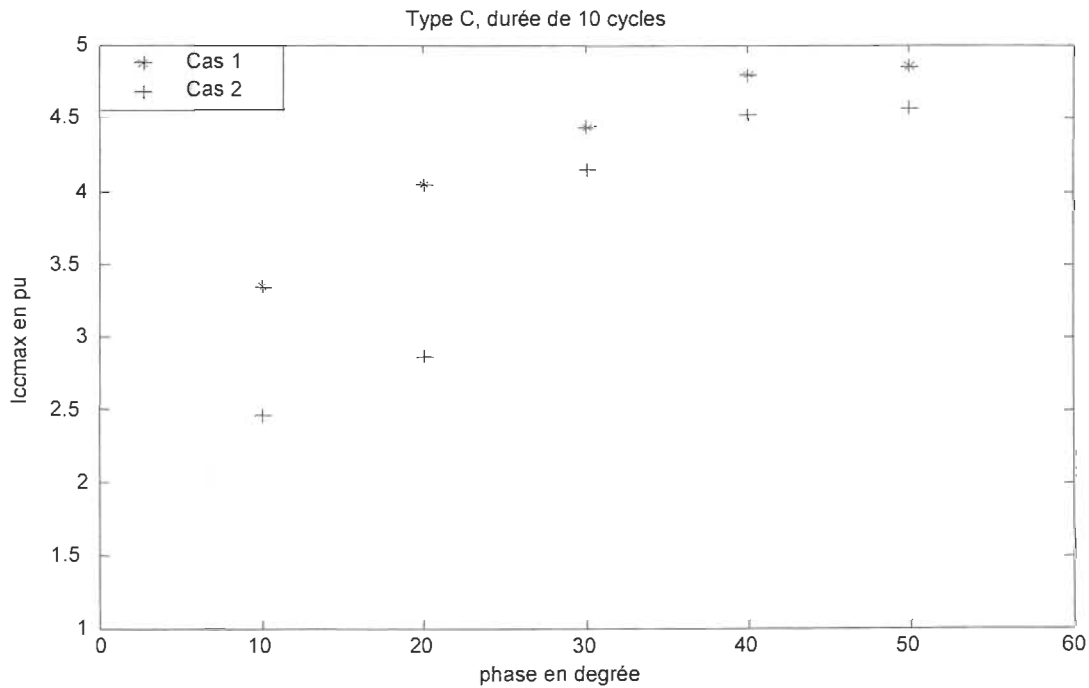


Figure 4.43 Ratio entre la valeur maximum du courant cc et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type C

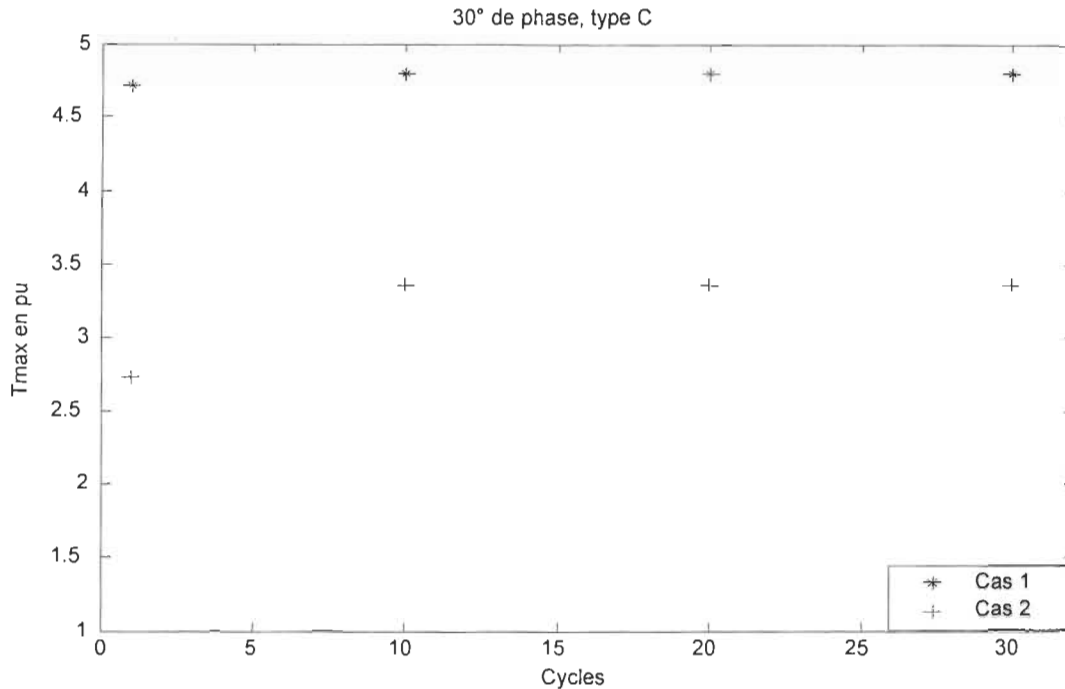


Figure 4.44 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de nombre de cycle de creux de tension, type C

4.4.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

En présence de creux de tension de type A, le pont redresseur se bloque (courant cc nul (figure 4.25)), la tension du lien cc baisse (figure 4.24) et les deux moteurs décélèrent chacun à leur taux (figure 4.27). À cause de la contrainte associée au lien mécanique entre les moteurs par l'intermédiaire de la bande de matériau, les moteurs sont contraints à maintenir des vitesses semblables et il y a apparition d'un accroissement de tension dans le matériau et éventuellement d'oscillations dans le matériau (figure 4.26). Après la disparition du creux de tension, il y a une variation brusque de la différence entre la tension disponible sur le réseau et la tension sur le lien cc, ce qui cause un fort appel de courant (surcourant) pour charger la capacité du lien cc. À cause des inductances dans le système, ceci causera aussi une surtension du lien cc. Le rétablissement

de la tension du lien cc permet aux deux moteurs d'accélérer avec un fort appel de courant pour atteindre la consigne de vitesse. Dans le cas 1, cette accélération non coordonnée des deux moteurs cause une augmentation de la tension dans le matériau. On ne détecte pas ce phénomène dans le cas 2 et le stress mécanique est plus faible dans la bande car dans ce cas, l'inertie du moteur commandé en tension est plus faible, tel que la boucle de contrôle de tension réagit plus rapidement, pour une moins grande sensibilité aux variations de vitesse. En effet, dans le cas 1, la boucle de commande de vitesse tend à être proportionnellement plus rapide que celle de tension lorsque comparé au cas 2. Les figures 4.28 et 4.29 illustrent respectivement le ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et de courant cc d'entrée, et leur valeur nominale, en fonction de l'amplitude du creux de tension de type A. Ces variations sont plus importantes quand on augmente l'amplitude de creux de tension. D'autre part, nous avons une importante variation de tension maximum dans le matériau en augmentant le nombre de cycles de creux de tension (figure 4.30) dans le cas 1, mais pas dans le cas 2, ce qui concorde avec l'analyse précédente de la qualité des boucles de commande.

Durant la présence de creux de tension de type B, le pont de diodes est bloqué partiellement (figure 4.32). Comparativement au cas de l'EVV simple, l'interaction entre les moteurs par la bande des matériaux cause une oscillation mécanique de la vitesse des moteurs (figures 4.33 et 4.34) qui se reflète par le fonctionnement occasionnel du moteur commandé en tension en mode générateur qui cause un transfert d'énergie de la charge vers le lien cc et des oscillations au niveau de la tension du lien cc (figure 4.31). Après la disparition du creux de tension, les deux moteurs reviennent à la vitesse de consigne. Les figures 4.35 et 4.36 illustrent respectivement le ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et de courant cc d'entrée, et leur valeur nominale, en fonction de l'amplitude du creux de tension de type B. Les mêmes tendances que

dans le cas des creux de tension de type A sont observées, à part l'insensibilité de la variation de tension maximum dans le matériau en fonction de la durée du creux pour les deux cas étudiés (pour les creux de 30%). Ceci s'explique par le fait qu'avec le creux de type B de 30%, la déviation maximale de tension apparaît rapidement après l'apparition du creux de tension.

En présence de creux de tension de type C, les tensions de ligne sont réduites, expliquant la baisse de la tension du lien cc (figure 4.38). Le pont de diodes est bloqué partiellement (figure 4.39) et les conditions de tension de ligne ne permettent pas de maintenir la tension du lien cc. Cependant, l'interaction entre les 2 moteurs amène le moteur commandé en tension en régime de freinage occasionnel et l'énergie de freinage est transférée vers le lien cc, résultant en une tension moyenne comparable au cas de l'EVV simple, mais avec des pointes de tension dépassant la tension nominale du lien cc. Encore une fois, l'interaction entre les moteurs et les fluctuations de tension sur le lien cc causent des oscillations dans le matériau (figure 4.40) et de la vitesse des deux moteurs (figures 4.41). Après la disparition du creux de tension, les deux moteurs accélèrent pour atteindre la consigne de vitesse. Les figures 4.42 et 4.43 montrent respectivement le ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et de courant cc d'entrée, et leur valeur nominale, en fonction de l'amplitude du creux de tension de type C. Les mêmes tendances que pour les creux de types A et B sont observées.

De façon générale, les variations maximums de tension dans le matériau et de courant cc d'entrée, en fonction de l'amplitude et de la durée du creux de tension de type B, sont plus importantes que dans les types A et C. De plus, dans le type A, nous avons un courant d'appel important à cause d'une variation plus grande de l'écart entre la tension moyenne du lien cc et la tension redressée disponible (surtout au rétablissement de la tension).

Du côté qualitatif, nous avons plus d'oscillations de vitesse avec les types B et C par rapport au type A, à cause du saut de phase et du couple pulsé résultant.

4.5 PROPOSITION ET ÉVALUATION D'UNE MÉTHODE DE COMPENSATION DES CREUX DE TENSION SUR UN SYSTÈME D'EVV COUPLÉS

La méthode de compensation des creux de tension sur les systèmes d'EVV propose les approches suivantes :

1. modification de la loi de commande d'orientation de flux pour tenir compte des fluctuations de la tension du lien cc;
2. modification de la consigne de vitesse suite à l'apparition du creux de tension afin de rétablir l'équilibre des échanges de puissance dans le système.

La modification de consigne de vitesse correspond à une diminution du régime de production qui est adoptée afin de préserver l'intégrité du matériau suite à l'apparition du creux de tension. Le système se retrouve ainsi dans un cycle semblable à un régime d'arrêt contrôlé ou de démarrage. Seuls les creux de tension de type A seront traités car pour ce type de creux de tension, la tension du lien cc diminue de façon quasi monotone, tel que l'emploi du moteur en mode générateur pour maintenir la tension du lien à cc prend tout son sens. Pour les creux de tension de types B et C, la tension moyenne du lien cc diminue, mais la tension instantanée fait des excursions régulières au dessus de la tension nominale du lien cc. Le traitement de ces types de creux pourra faire l'objet d'un autre projet de recherche.

4.5.1 LOGIQUE DE COMMANDE

Dans la loi de commande d'orientation de flux, nous allons varier la consigne de flux des deux moteurs en fonction de la tension filtrée du lien cc et de la tension nominale suivant la relation suivante :

$$phir_{consigne} = phir \frac{V_{cc \text{ filtré}}}{V_{cc \text{ nominale}}} \quad (4-1)$$

avec :

$$phir = 0.96; \text{ et } V_{cc \text{ nominale}} = 2.34 * 120 = 280.80.$$

Cette modification de consigne a pour but de maintenir un certain équilibre entre la tension du lien cc et la force contre électromotrice équivalente du moteur. Cette approche est très similaire à la réduction du flux pour permettre l'opération en survitesse.

Nous n'allons pas changer la structure de la commande en vitesse du moteur 1. Par contre nous allons commander la vitesse de référence de moteur 2 suivant la logique présenté sur la figure 4.45. Le but est permettre une diminution contrôlée de la vitesse d'opération, pour à la fois maintenir le synchronisme entre les entraînements et éviter un freinage prématuré. L'adoption de la structure proposée permet de ne pas changer la structure des contrôleurs de vitesse et de tension, ce qui est avantageux dans une installation multi-moteur complexe. En effet, l'approche ne requiert pas l'identification des moteurs qui doivent agir en générateur pour maintenir la tension du lien cc (en mode régulation de tension électrique), ni la gestion de la répartition de l'écoulement de puissance entre ces moteurs pour maintenir le synchronisme entre eux.

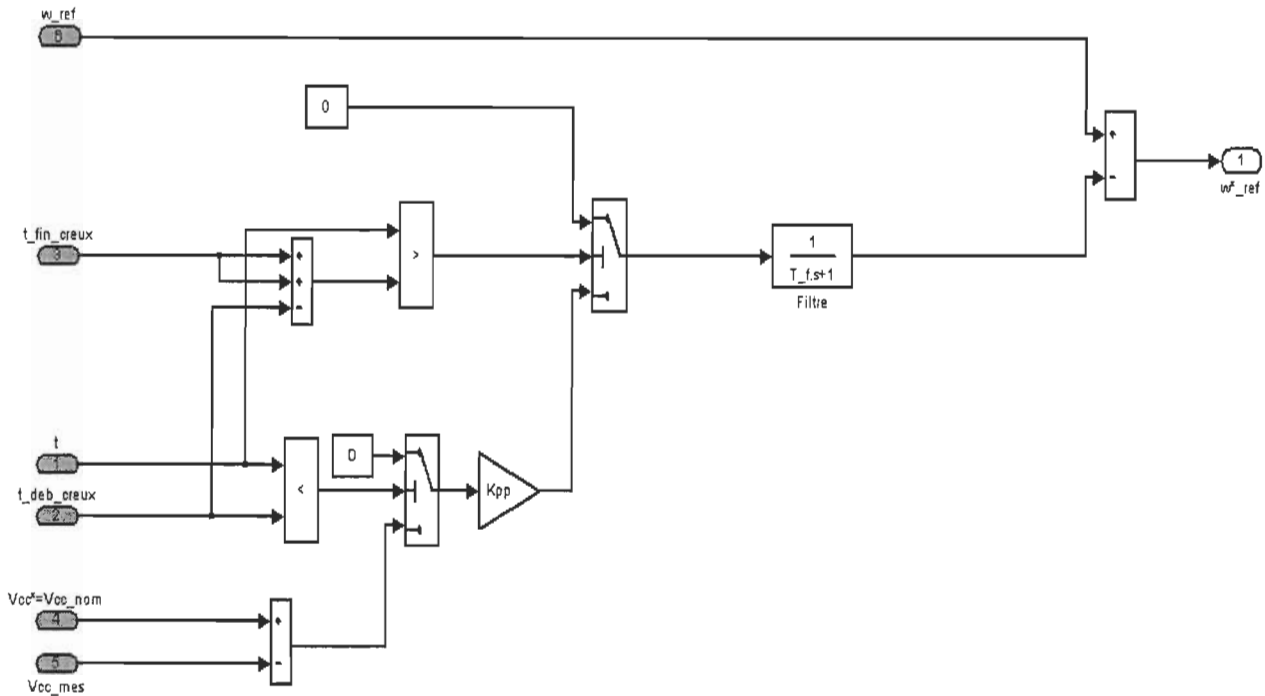


Figure 4.45 Modification de la consigne de vitesse du moteur 2.

En l'absence de creux de tension, la vitesse de consigne externe est employée. Nous supposons que le temps d'apparition (t_{deb_creux}) et de fin (t_{fin_creux}) sont mesurés et sont disponibles pour la commande. Ces données ne sont pas requises *a priori*, mais seraient obtenues, par exemple, par la mesure des tensions triphasées et l'estimation des phaseurs de tension. La diminution significative d'un phaseur de tension marque le début du creux de tension et le rétablissement des tensions à un niveau suffisamment près des tensions nominales marque la fin du creux de tension. Lorsqu'un creux de tension est détecté, le contrôleur proportionnel K_{pp} est activé et reçoit comme entrée la différence entre la tension nominale et la tension filtrée du lien cc. La sortie du gain K_{pp} est appliquée à l'entrée du filtre passe bas de constante du temps T_f pour générer le signal de biais de consigne de vitesse. Ainsi, pendant le creux de tension, la vitesse de consigne est modifiée de façon à asservir la tension du lien cc à sa valeur nominale. Après la fin du creux de tension, cette boucle de contrôle est maintenue pendant une période

correspondant à la durée du creux de tension avant de forcer la consigne de vitesse vers sa valeur de consigne externe. Le choix de la constante de temps T_f et du gain K_{pp} a été fait suite à une série d'essais pour un creux de tension de 90% d'une durée de 10 cycles. Les tableaux 4.3 à 4.4 présentent les résultats obtenus pour valeur RMS de la variation de la tension du lien cc et la variation relative de la tension mécanique, définie comme le ratio entre la tension mécanique maximale et la tension mécanique nominale, en variant les valeurs de K_{pp} et T_f , pour les cas 1 et 2 (tableau 4.2).

Ce mode de compensation est tout à fait heuristique et n'est employé que pour démontrer le potentiel de compensation des creux de tension par la modification de la consigne de vitesse. Une amélioration possible et souhaitable de la loi de compensation est de choisir un contrôleur dédié pour remplacer le filtre et le correcteur proportionnel, possiblement avec une approche comme la logique floue pour tenir compte des non-linéarités.

Tableau 4.3 : Valeur RMS de la variation de la tension du lien cc, cas 1.

$T_f (s) \backslash K_{pp}$	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
0.1	1.3030	1.5123	1.5023	1.5160	1.5229
1	2.9371	2.9814	2.5467	0.3893	0.7483
2	3.0113	2.5377	4.5747	0.8492	0.4181
5	3.0020	2.8102	2.5219	0.9974	0.4607

Tableau 4.4 : Variation relative de la tension mécanique T, cas 1.

$T_f (s) \backslash K_{pp}$	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
0.1	11.6541	11.9879	12.3625	12.4635	12.0139
1	187.3785	123.4077	91.6496	0.8275	5.9049
2	361.8991	169.4186	28.7019	24.1429	1.0493
5	359.4455	177.5973	135.5842	25.8351	6.0502

Tableau 4.5 : Valeur RMS de la variation de la tension du lien cc, cas 2.

$T_f (s) \backslash K_p$	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
0.1	1.3383	1.4980	1.5688	1.5707	1.5622
1	2.3067	3.6375	2.7246	0.4224	0.7305
2	2.3983	2.8773	4.2170	1.0606	0.4520
5	2.4479	2.3986	1.6850	1.3203	0.5699

Tableau 4.6 : Variation relative de la tension mécanique T, cas 2

$T_f (s) \backslash K_p$	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
0.1	4.8528	4.4369	5.4969	5.5581	5.5937
1	14.6946	13.5822	13.2239	0.3077	3.4793
2	11.5848	8.2399	8.2456	8.0951	1.5755
5	11.1217	18.9088	8.2340	6.7091	1.6022

À partir de ces tableaux, on conclut qu'avec $T_f=0.2$ et $K_p=1$ on obtient les meilleurs résultats parmi les valeurs évaluées, bien que ces valeurs ne sont pas nécessairement optimales. Ces valeurs seront donc employées pour le contrôleur dans la section suivante.

4.5.2 RÉSULTATS DE SIMULATION

Les résultats de simulations vont être présentés pour les cas 1 et 2. Nous allons appliquer 90% de creux de tension de type A à 1.5s lorsque le système a complété son régime de démarrage.

En plus des signaux présentés précédemment, les erreurs de vitesse du moteur 2 (différence entre la vitesse et la consigne modifiée) sont présentées à la figure 4.49 afin d'illustrer le maintien de la qualité de la commande malgré la variation de la tension du lien cc.

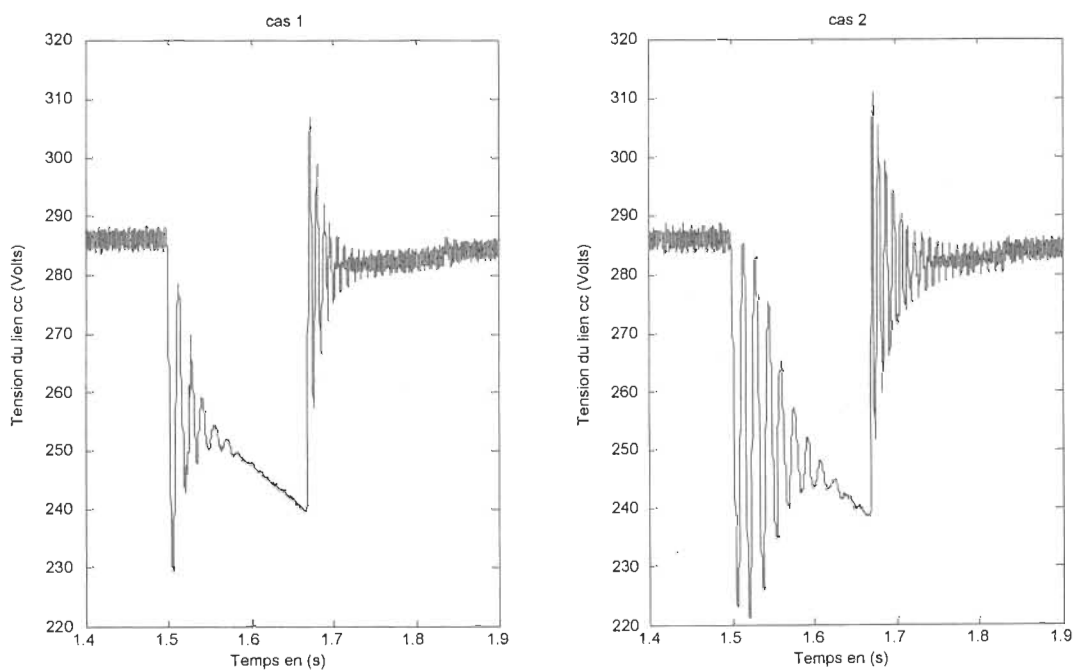


Figure 4.46 Tension du lien cc, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A

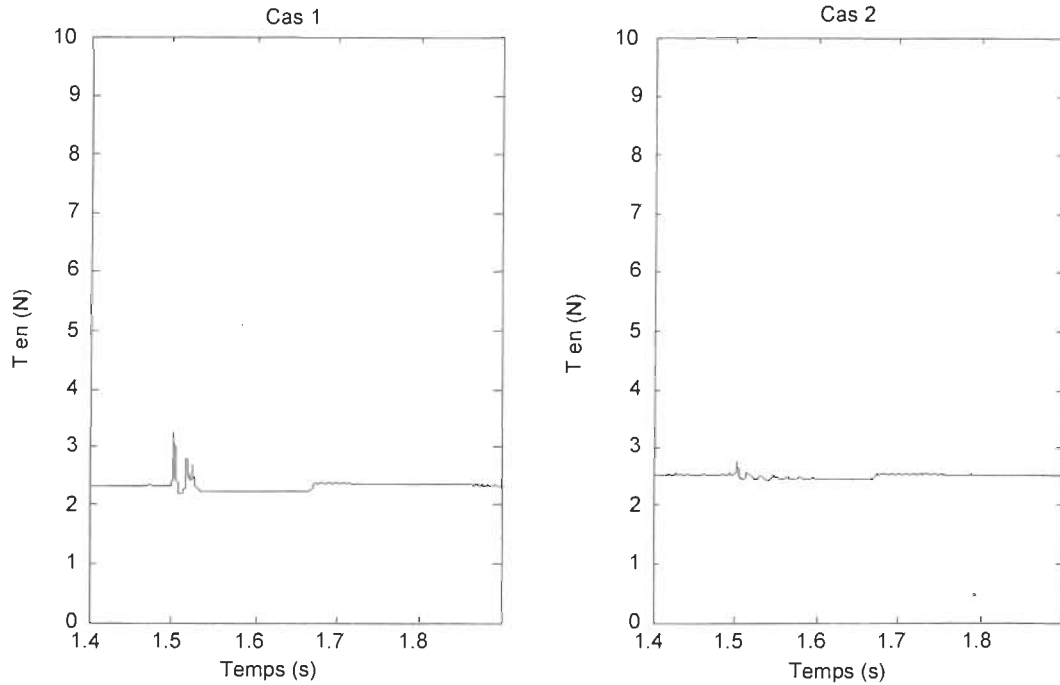


Figure 4.47 Tension mécanique T, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A.

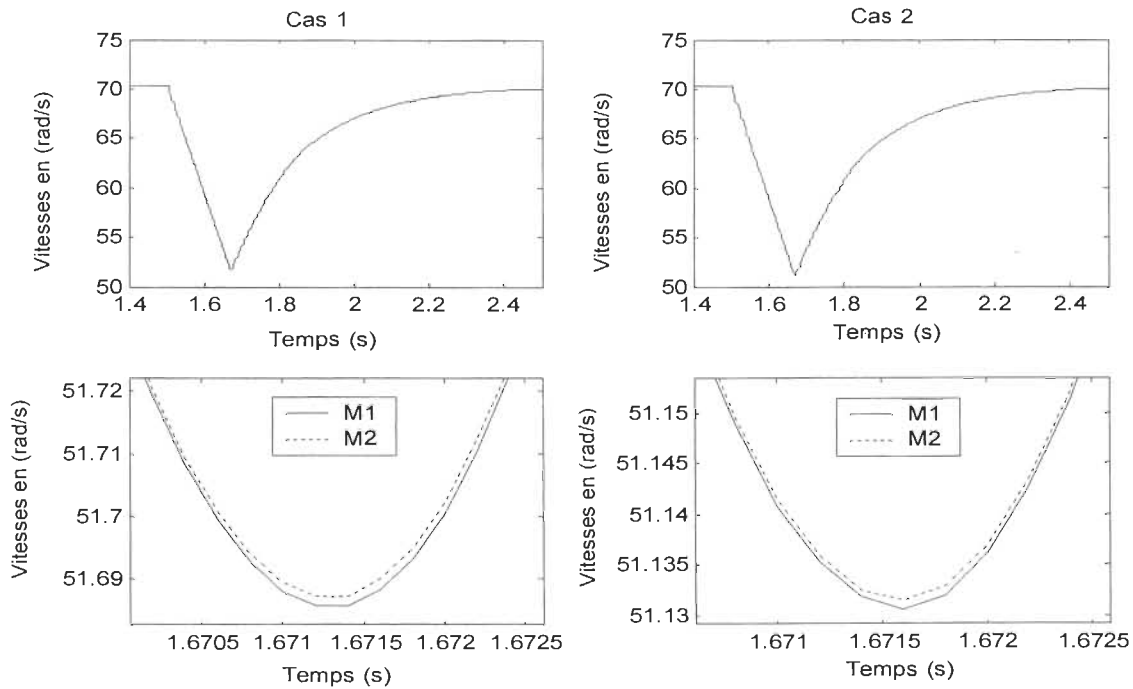


Figure 4.48 Vitesse des moteurs, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A.

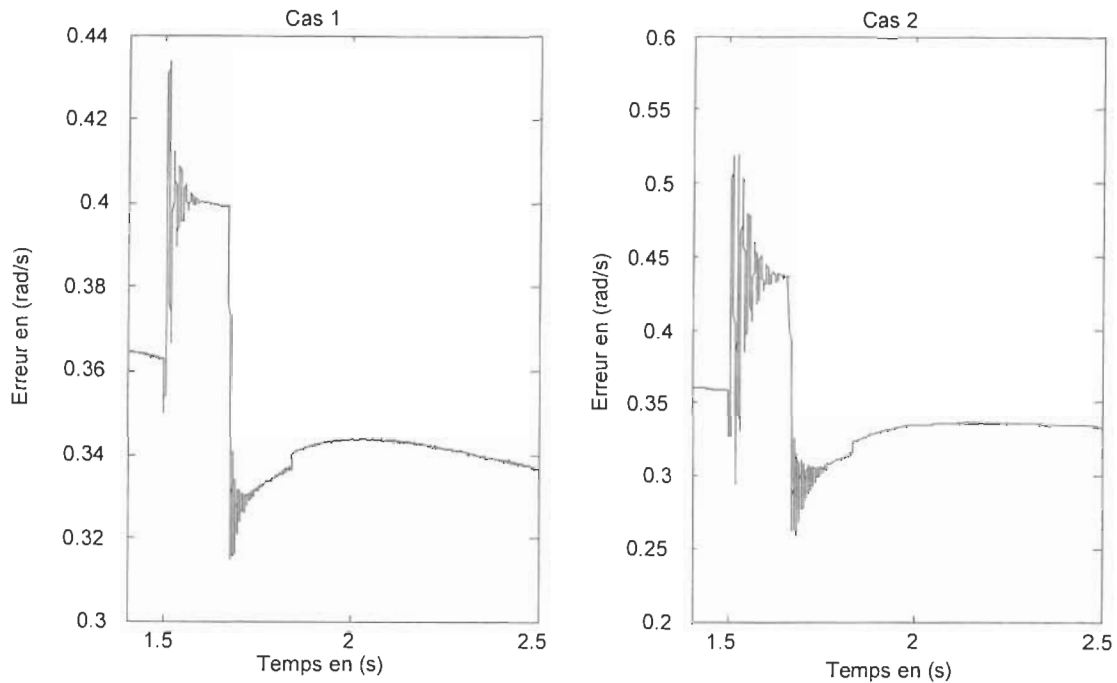


Figure 4.49 Erreur de vitesse du moteur 2, en utilisant la méthode de compensation de creux, en présence de creux de type A.

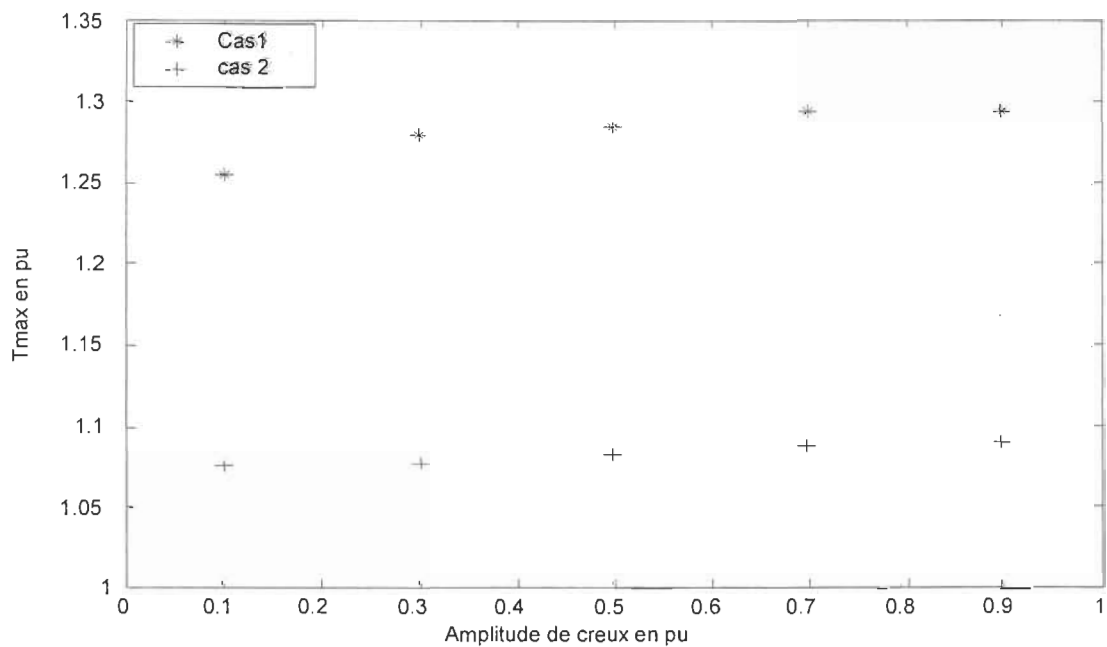


Figure 4.50 Ratio entre la valeur maximum de tension dans le matériau et la valeur nominale en fonction de creux de tension, type A en utilisant la méthode de compensation de creux.

4.5.3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Nous comparons les résultats obtenus avec la méthode de compensation de creux avec ceux de la figure A.10, obtenus sous les mêmes conditions, mais sans compensation du creux. Nous observons qu'il y a eu freinage des moteurs pour transformer de l'énergie cinétique en énergie électrique pour recharger le lien cc et en maintenir la tension. La tension du lien cc baisse de façon beaucoup moins importante mais le freinage cause somme toute qu'une faible variation dans la diminution de la vitesse des moteurs. Nous observons par contre un régime d'accélération plus long après le rétablissement de la tension, dû à la constante de temps de 0.2s du filtre de compensation ajoutée (figures 4.45 et 4.48). Cependant, une diminution très significative de la tension mécanique et l'absence de vibrations mécaniques (tension mécanique et vitesse des moteurs) sont obtenues. Le coût de la réduction de vitesse d'opération pour réduire le stress dans le matériau est donc faible. La tension du lien cc ne revient pas à sa valeur nominale pendant le creux, ce qui indique que le taux de décroissance de vitesse obtenu par le contrôleur de compensation de creux n'est pas suffisant. La modification des gains pour réduire ces écarts a mené à une instabilité, donc le contrôleur devra être modifié pour corriger cet écart.

Les variations faibles de l'erreur sur la vitesse du moteur n'ont pu être obtenues que grâce à l'adaptation de la commande à orientation de flux (figure 4.49). Nous notons que la variation de l'erreur de vitesse est plus grande dans le cas 2, ce qui est conforme avec la réponse attendue puisque dans le cas 2, le moteur commandé en vitesse possède l'inertie la plus élevée. La performance de la boucle de vitesse est donc moins bonne, relativement à la boucle de contrôle de tension, considérant que le correcteur n'a pas été adapté pour tenir compte de la variation de l'inertie de la charge.

Bien que le contrôleur a été conçu pour un creux de tension d'une amplitude de 90%, la diminution du stress mécanique est observée pour des creux d'amplitudes variant de 10% à 90% (figure 4.50). Ainsi, dans les mêmes conditions de test, et en utilisant la méthode de compensation de creux on obtient 3.2 N comme valeur maximale de la tension du matériau dans le cas 1 au lieu de 12 N, et 2.7 N au lieu de 9 N dans le cas 2. La figure 4.50 montre bien ces améliorations en comparant ces résultats avec ceux de la figure 4.28.

Donc on conclut que avec la méthode de compensation de creux, nous avons réussi à réduire significativement les variations de la tension maximale dans le matériau, et ce à un coût très faible en terme de complexité et de diminution de la vitesse d'opération.

4.6 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques résultats de simulation d'un système d'entraînement à vitesse variable simple, et d'un système d'entraînements à vitesse variable couplés. La sensibilité et la caractérisation des EVV couplés ont été traitées dans ce chapitre avec et sans la méthode de compensation de creux.

Dans les systèmes d'EVV simple, les variations sont plus importantes dans le type A par rapport aux types B et C, parce que dans le type A, le creux de tension affecte les trois tensions de ligne, cela bloque le pont redresseur, et baisse la tension du lien cc, d'où des variations importantes au niveau de la tension du lien cc et de la vitesse du moteur.

Dans les systèmes d'EVV couplés, les variations maximums de tension dans le matériau et de courant cc d'entrée, en fonction de l'amplitude et de la durée du creux de tension de type B, sont plus importantes que dans les types A et C. De plus, dans le type A, nous avons un courant d'appel important à cause d'une variation plus grande de l'écart entre la tension moyenne du lien cc et la tension redressée disponible (surtout au rétablissement de la tension).

Du côté qualitatif, nous avons plus d'oscillations de vitesse avec les types B et C qu'avec le type A, à cause du saut de phase et du couple pulsé résultant.

En utilisant la loi de compensation des creux, nous avons réussi à réduire significativement les variations de la tension maximale dans le matériau d'où l'efficacité de la méthode de compensation des creux.

Les points essentiels qui restent à améliorer sont de minimiser encore plus l'erreur de vitesses et d'annuler les petites oscillations au niveau de la tension mécanique du matériau.

CHAPITRE 5:

CONCLUSION

Les creux de tension sont la cause principale d'arrêt d'un moteur dans un système multi-moteur ou la perte momentanée de synchronisme entre les moteurs peut causer un arrêt complet du système.

Dans ce travail, nous avons développé un modèle d'un système d'entraînement constitué de deux entraînements ca avec bus cc commun et qui sont couplés mécaniquement par une courroie dont la tension est réglable. Nos deux principales contributions portent sur :

- l'évaluation de la sensibilité et la caractérisation des entraînements à vitesse variable en présence des creux de tension;

- le développement d'une nouvelle loi de commande pour synchroniser les deux moteurs et maintenir une tension mécanique constante entre les deux rouleaux en présence de creux de tension.

Nous avons ainsi développé les équations du modèle de couplage mécanique. Ce modèle a été développé avec les hypothèses suivantes :

- 1- L'enchaînement est pincé dans les rouleaux et il n'y a aucun glissement;
- 2- Nous supposons que la section de l'enchaînement est uniforme entre les deux rouleaux, en particulier, nous négligeons la déformation de l'enchaînement aux points de contact avec les rouleaux.

Une validation expérimentale du modèle est requise.

Nous avons mis en évidence les effets nocifs engendrés par les creux de tension sur les entraînements à vitesse variable et la nécessité, pour maintenir la qualité du produit, de minimiser ces perturbations ou leurs effets. La sensibilité et la caractérisation des entraînements à vitesse variable en présence de creux de tension du modèle couplé ont été analysées. Le comportement du modèle simulé correspond bien aux phénomènes physiques en jeu : en présence de creux de tension, la tension du lien cc baisse et les deux moteurs décelèrent chacun à leur taux, ce qui cause l'apparition de contraintes et d'oscillations dans le matériau.

Les résultats de simulations démontrent bien les problèmes créés dans les entraînements à vitesse variable couplés en présence des creux de tension. Ces problèmes varient d'un type à l'autre de creux de tension, de la durée et de l'amplitude des creux de tension. Le modèle développé avec la

compensation des creux de tension montre une amélioration au niveau des effets des creux de tension sur les entraînements à vitesse variable.

La loi de compensation de creux pour le type A démontre une capacité d'améliorer le comportement des systèmes couplés en présence de creux. D'autre part, les creux de type B présentent des fluctuations importantes et des oscillations de vitesses.

Les points essentiels qui restent à faire sont :

1. Optimiser le contrôleur pour le type A de creux de tension;
2. Développer des contrôleurs pour les types B et C qui réduisent entre autre les oscillations de couple.

Ce travail s'est limité à la simulation du modèle développé sous *Power System Blockset*. Le modèle développé peut être employé pour étudier le comportement de systèmes couplés plus complexes pour :

- 1- Étudier leur stabilité et pour développer des mesures correctives,
- 2- Valider des lois de commande développées pour maintenir le synchronisme dans les systèmes multi-moteurs en présence de creux de tension.

L'expérimentation sera essentielle pour valider pleinement les modèles et les résultats présentés dans ce mémoire.

RÉFÉRENCES

- [Artemis01] *ARTEMIS User's Guide*, OPAL-RT Technologies Inc., Montréal, PQ, Canada, 2001.
- [Ba-Razzouk97] A. Ba-Razzouk, "Étude et mise au point d'un module de simulation des systèmes d'entraînements à courant alternatif", Université du Québec à Trois-Rivières, Automne 1997.
- [Ba-razzouk02] A. Ba-Razzouk, P. Sicard et N. Léchevin, "Méthode de simulation découplée basée sur la séparation de modèles par éléments de stockage pour la simulation parallèle à multitaux," Conférence Internationale sur les Mathématiques Appliquées et les Sciences de l'Ingénieur, *CIMASI'2002*.
- [Bollen97] M.H.J. Bollen, Characterization of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4), Octobre 1997, 1666-1671.
- [Bollen99] 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", in *Proceedings IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1999, 1225-1230.

- [Bollen00] M. H. J. Bollen, "Mitigation of Voltage Sags", *IEEE Tutorial on Voltage Sag Analysis, 2000*.
- [Bollen00a] M.H.J. Bollen, et L.D. Zhang, "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(3), 2000, 904-910.
- [Bose86] B. K. Bose, "Power Electronics and AC drives", New Jersey: Prentice Hall, ch 7, pp 264-291, 1986.
- [Duran99] J.Duran-Gomez, P.N. Enjeti, et 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*, 35(6), pages 904-910, Novembre/Décembre 1999.
- [Duvaut90] G. Duvaut, "Mécanique des milieux continus" Masson, Paris, Barcelone, Mexico, 1990.
- [Ho88] E.Y.Y. Ho, et P.C. SEN, "Decoupling Control of Induction Motor Drives", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, VOL-35, No.2, Mai 1988, pp.515-525.
- [Ho89] E.Y.Y. Ho, "Robust Control of High Performance AC Drives", Thesis for Degree of Doctor of Philosophy, Departement of Electrical Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1989.

- [Holtz94] J. Holtz, W. Lotzkat, et S. Stadtfeld, "Controlled AC drives with Ride-Through Capability at Power Interruption", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 30, pages 1275-1283, Septembre/Octobre 1994.
- [Hui97] S.Y.R. Hui, et K.K. Fung, "Fast Decoupled Simulation of Large Power Electronic Systems Using New Two-Port Companion Link Models", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, No. 3, Mai 1997, pp. 462-473.
- [IEEE95] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, IEEE Std. 1159-1995, 1995.
- [Jouanne99] V. Jouanne, P. N. Enjeti, et B. Banerjee, "Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(4), Juillet/Août 1999, pages 908-916.
- [Koç02] Hakan Koç, Dominique Knittel, Michel de Mathelin, et Gabriel Abba "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs" *IEEE Transaction on Control System Technology*, 10(2), 2002, 197-208.
- [Lamoree94] Jeff Lamoree, Dave Mueller, Paul Vinett, William Jones, et Marek Samotyj, "Voltage Sag Analysis Case Studies", *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 30, No. 4, Juillet / Août 1994.

[Lesenne81] J. Lesenne, Notelet et G. Séguier, "Introduction à l'électronique approfondie",
Technique et documentation, Paris 1981.

[Mathworks00] The Mathwoks Inc., "Power System Blockset for Use with SIMULINK, User's
Guide Version 2.1", Natick, USA, Septembre 2000.

[Opal] www.opal-rt.com.

[Rajagopalan87] V. Rajagopalan, "Compluter Aided Analysis of Power Electronics Systems",
Marcel Dekker inc., N.Y, 1987.

[Rtlab01] *RT-LAB User's Guide*, OPAL-RT Technologies Inc., Montréal, PQ, Canada, 2001

[Sicard01] P. Sicard, "Creux de tension : caractérisation, effets et correction", Montréal,
Présentation Groupe Info-Énergie, 2001.

[Sicard02] P. Sicard, N. Elouariachi, et S. Lahaie, "Characterization of Sensitivity to Voltage
Sags of Mechanically Coupled Induction Motors", ELECTRIMACS 2002 Montréal,
Québec. Canada, 2002.

[Sicard02a] P. Sicard, N. Elouariachi, N.Léchevin, et A.Ba-Razzouk, "Towards Real-Time
Simulation on a PC-Cluster of Mechanically Coupled Induction Motors in a Material
Transfer Process", ELECTRIMACS 2002, Montréal, Québec. Canada, 2002.

[Strangas96] E. G. Strangas, V. E. Wagner, et T. D. Unruh, "Variable Speed Drives Evaluation Test", *IEEE IAS 1996 Annual Meeting*, San Diego, pages 2239-2243, Octobre 6-10, 1996.

[Zyl98] A. V. Zyl, R. Spée, A. Faveluke, et S. Bhowmik, "Voltage Sag Ride-Through for Adjustable-Speed Drives with Active Rectifiers", *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 34(6), Novembre/Décembre 1998, pages 1270-1277.

ANNEXES

ANNEXE A

Résultats de simulation d'un système d'EVV couplés en présence de creux de tension de type A.

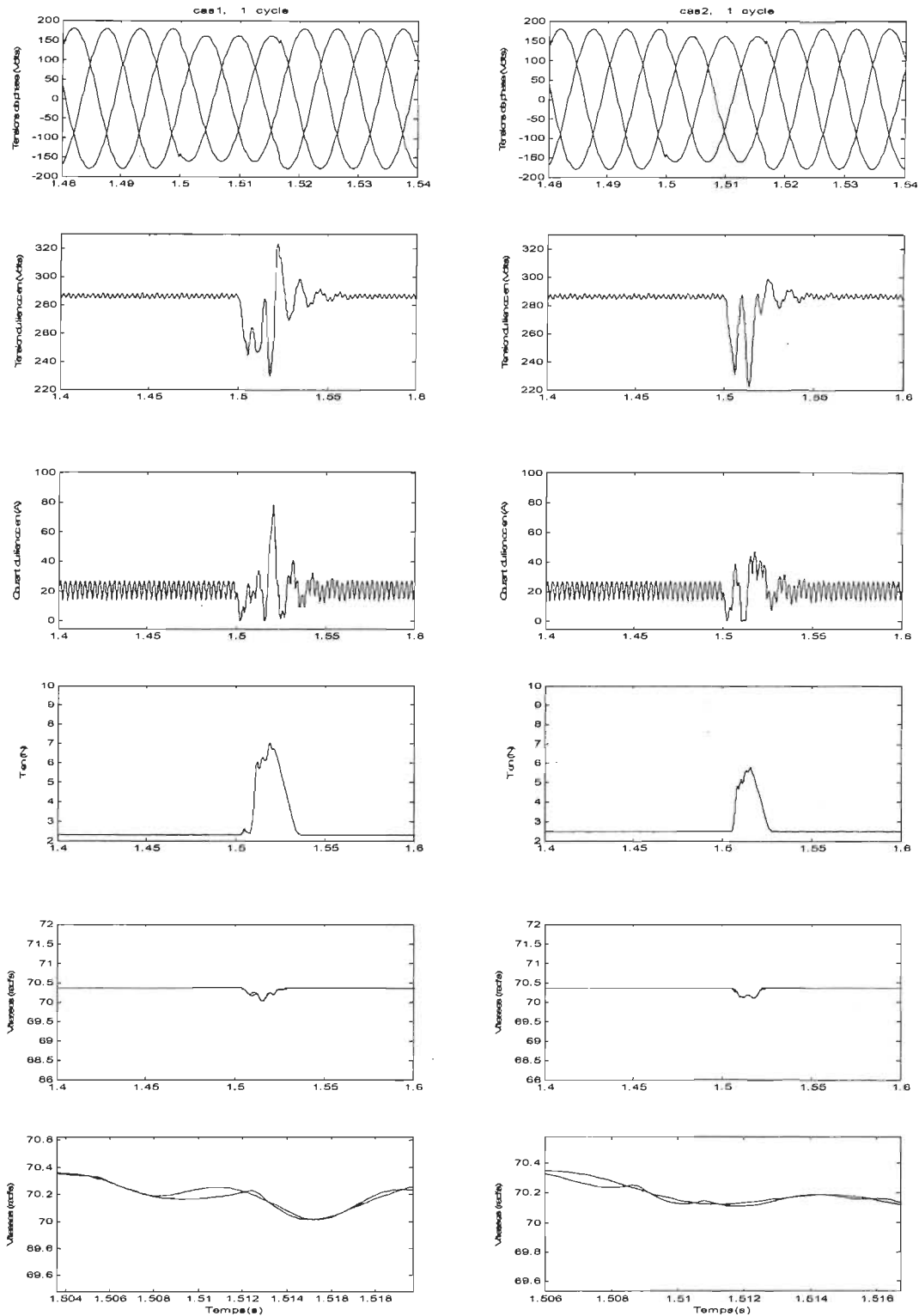


Figure A.1 Résultats de simulation pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 1 cycle.

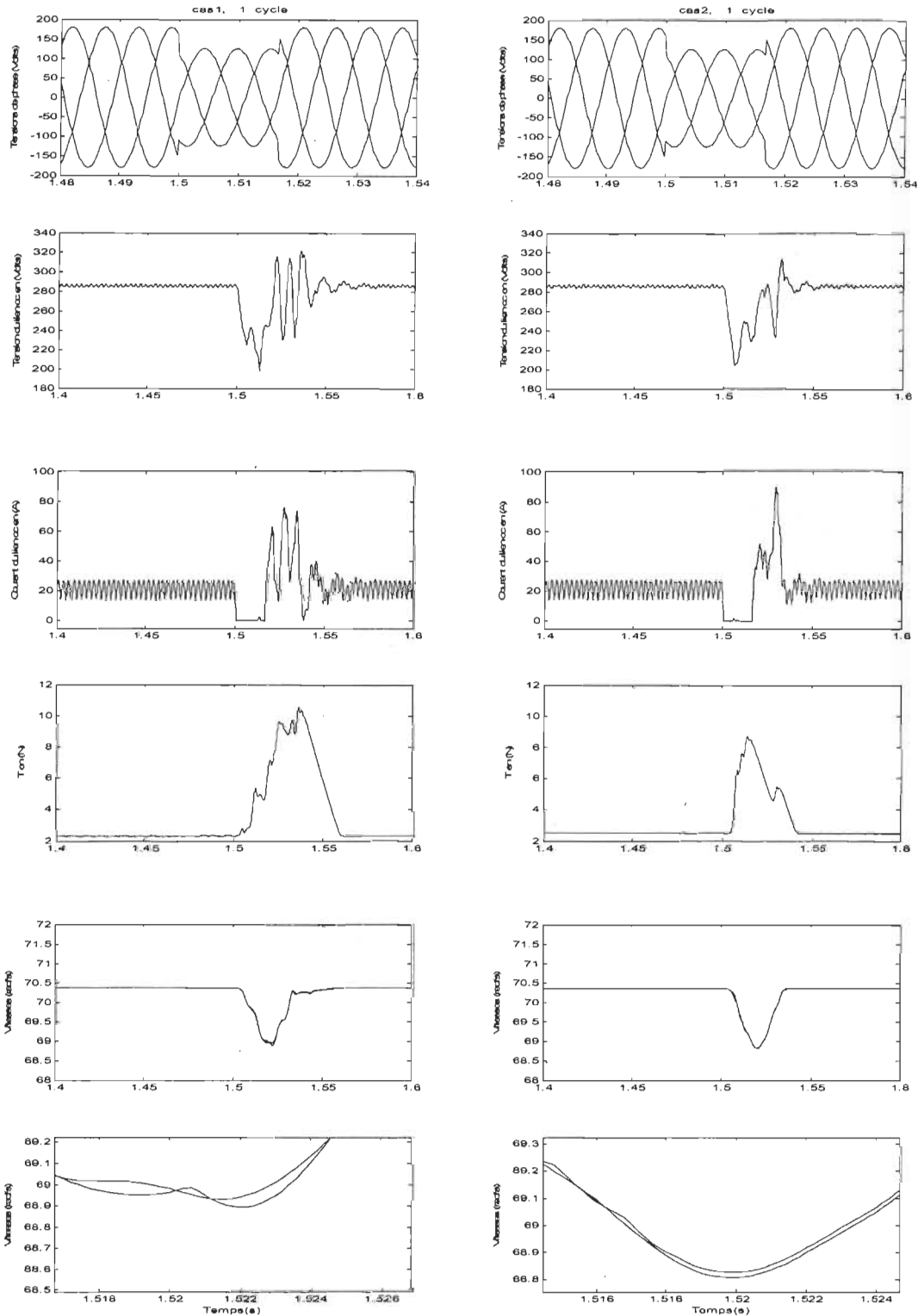


Figure A.2 Résultats de simulation pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 1 cycle.

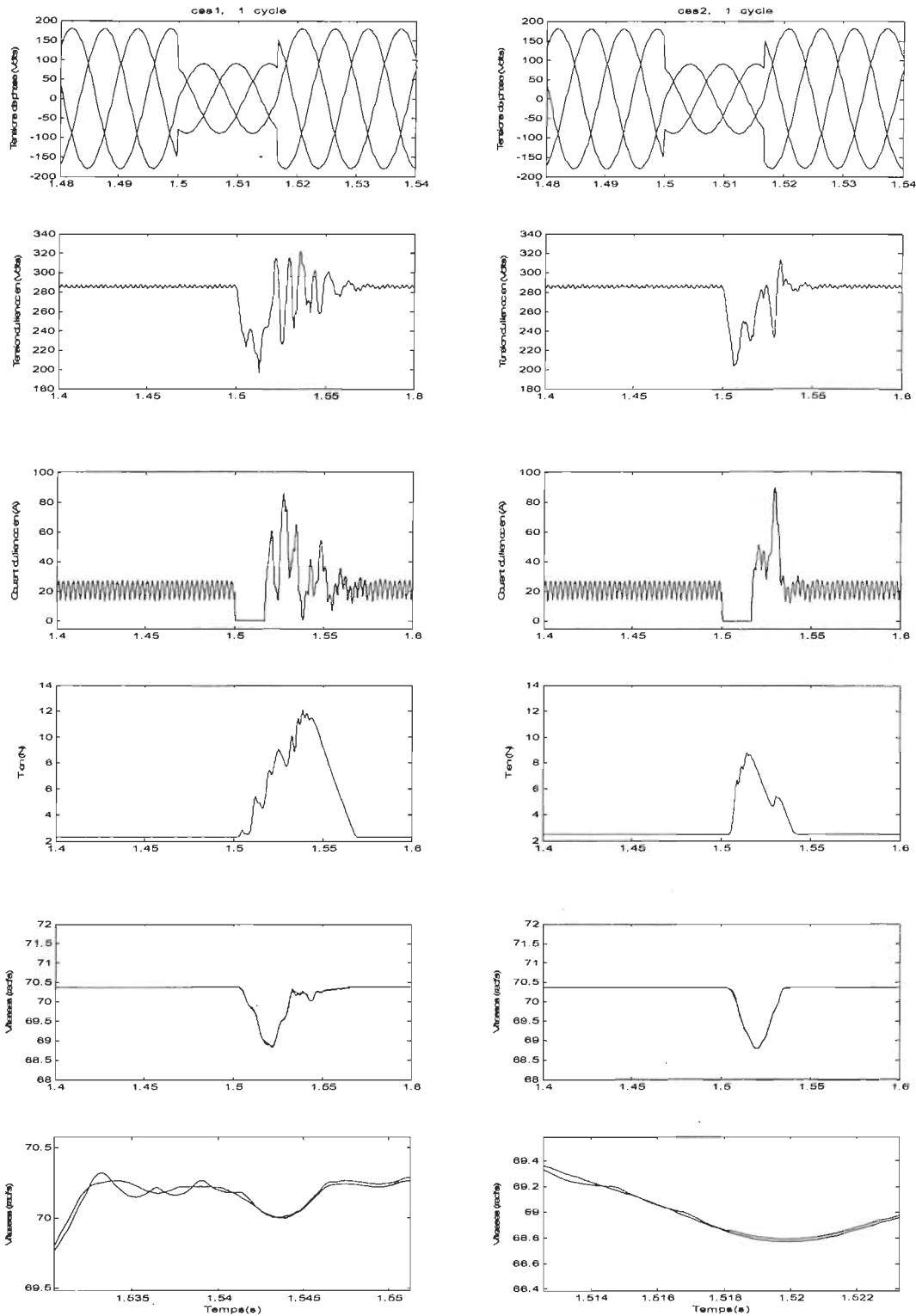


Figure A.3 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 1 cycle.

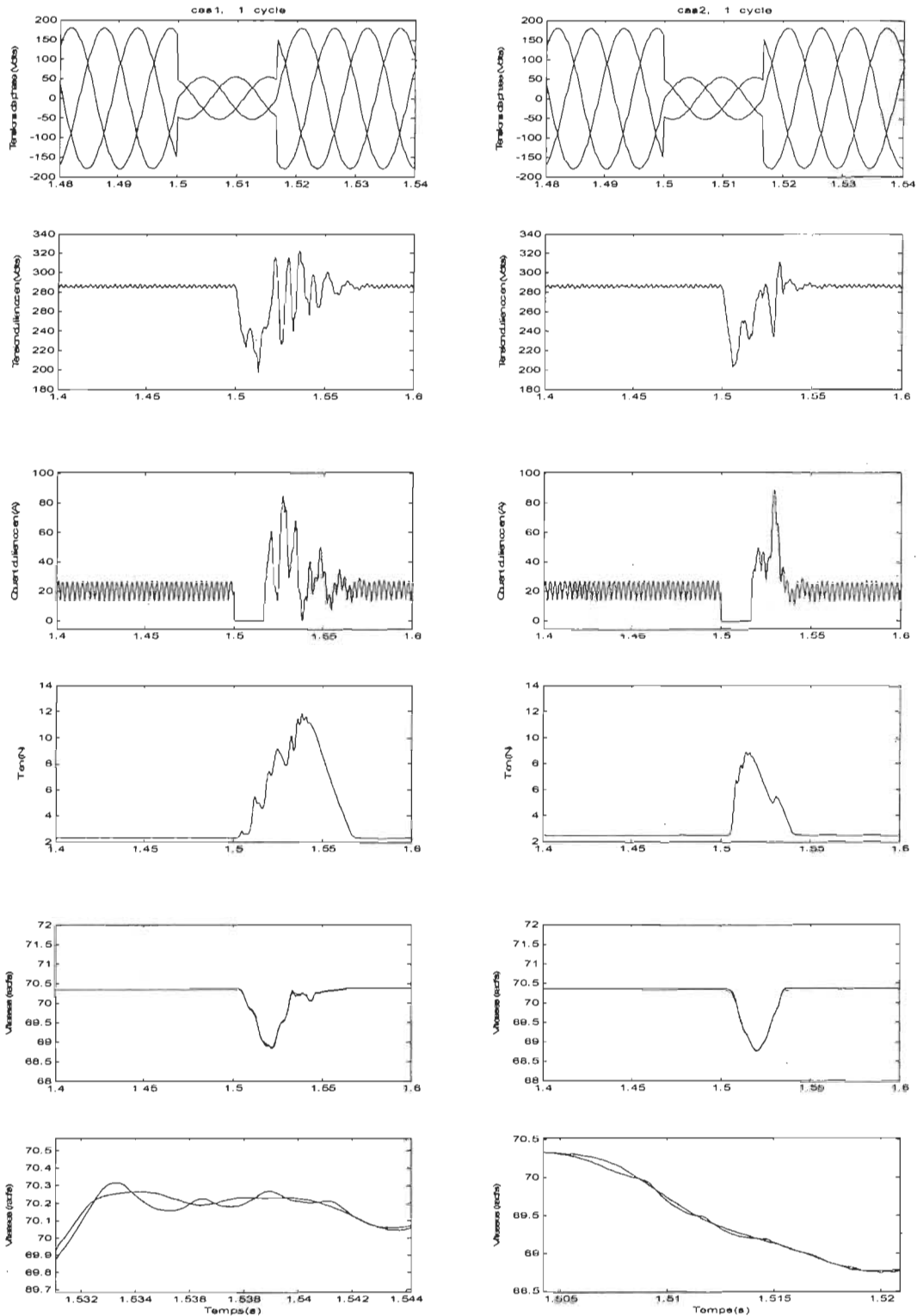


Figure A.4 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 1cycle.

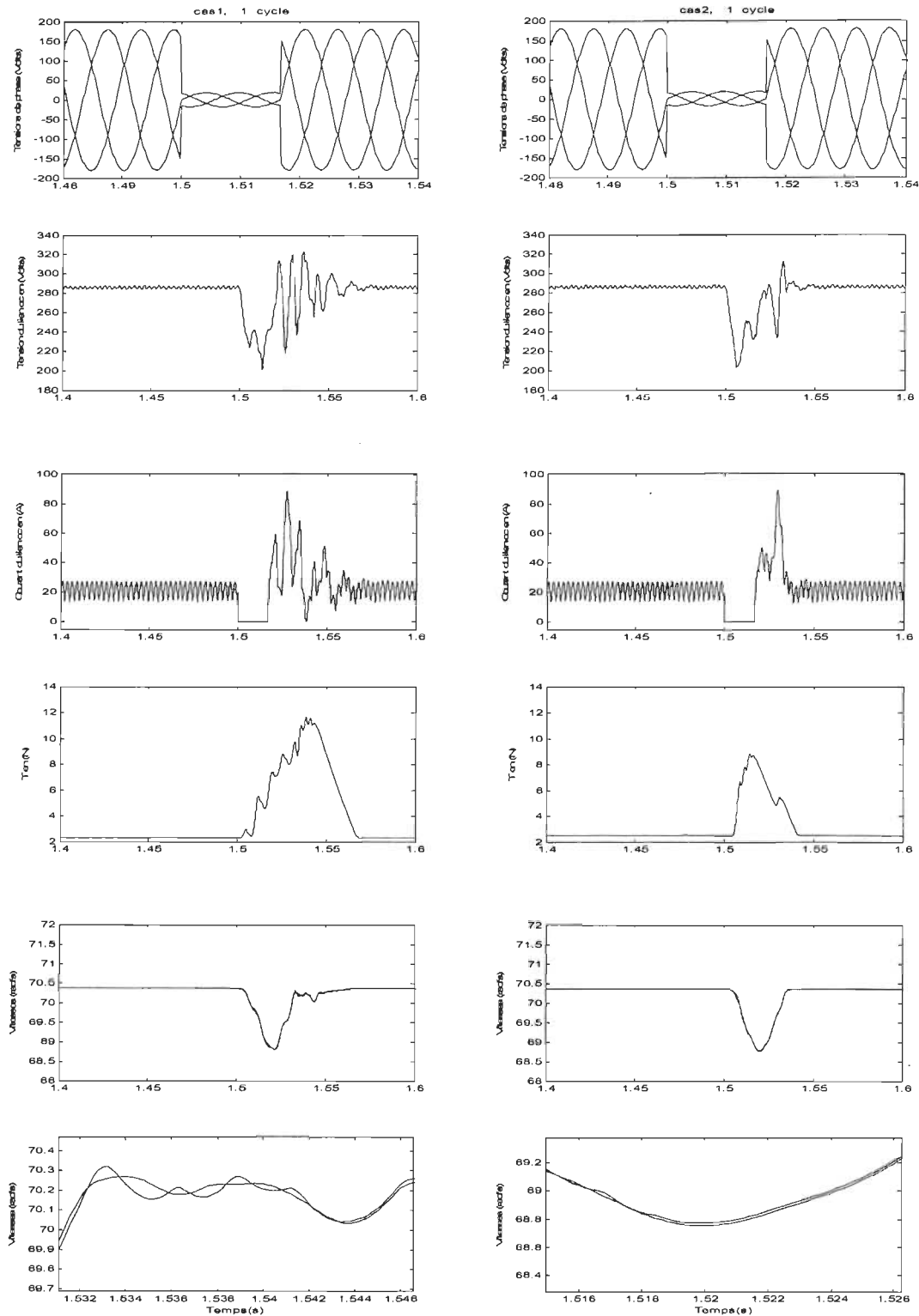


Figure A.5 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 1 cycle.

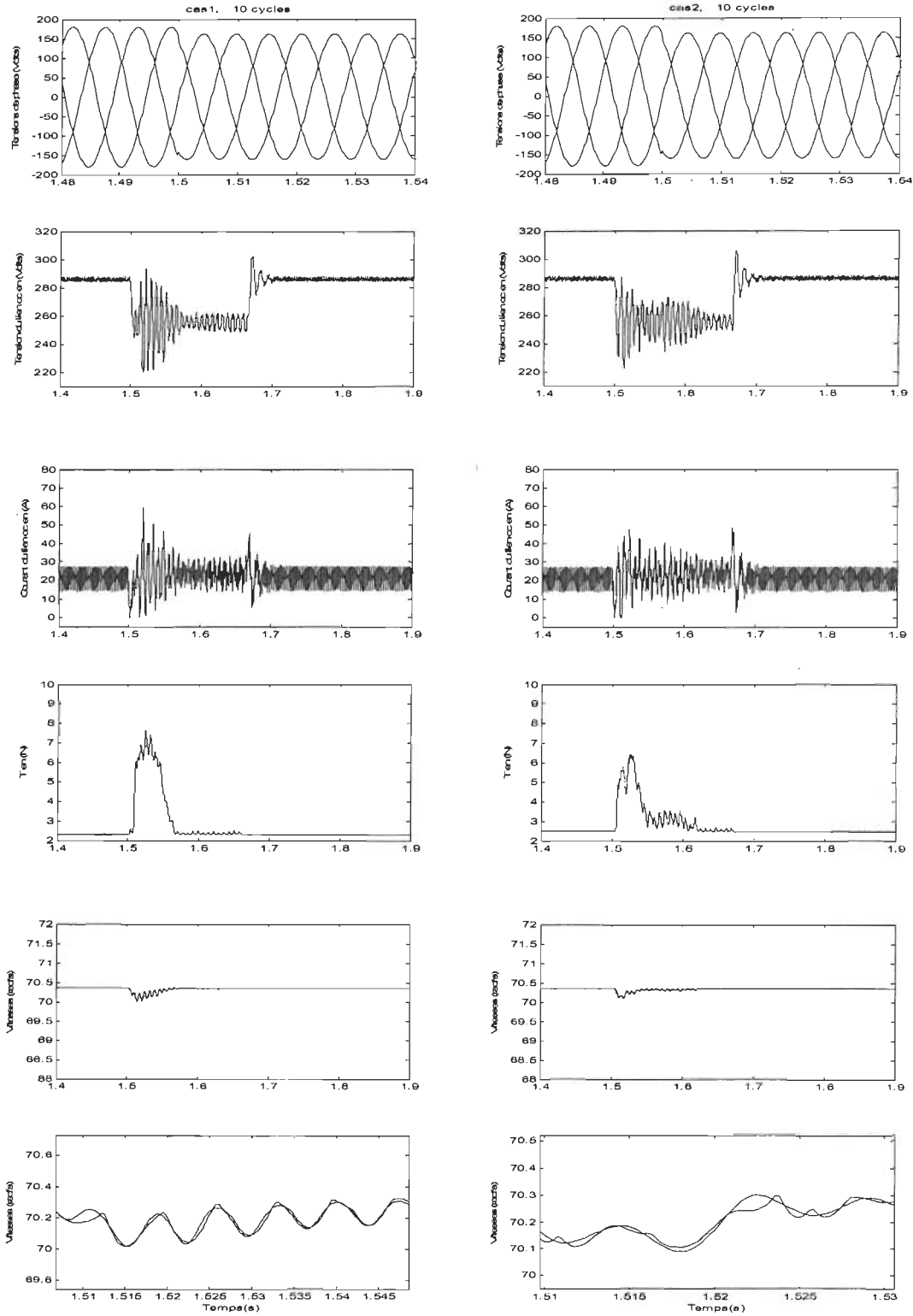


Figure A.6 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 10 cycles.

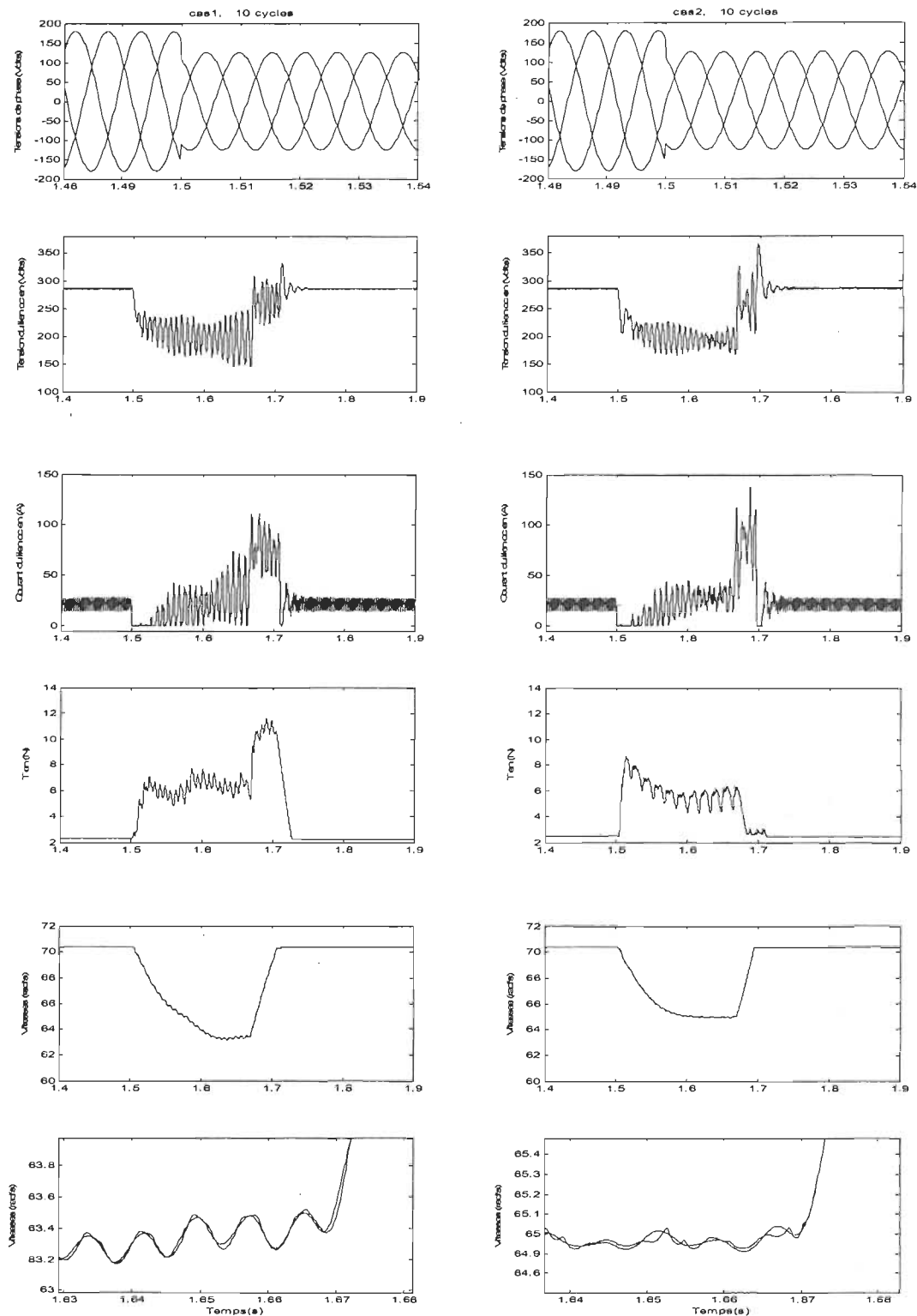


Figure A.7 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 10 cycles.

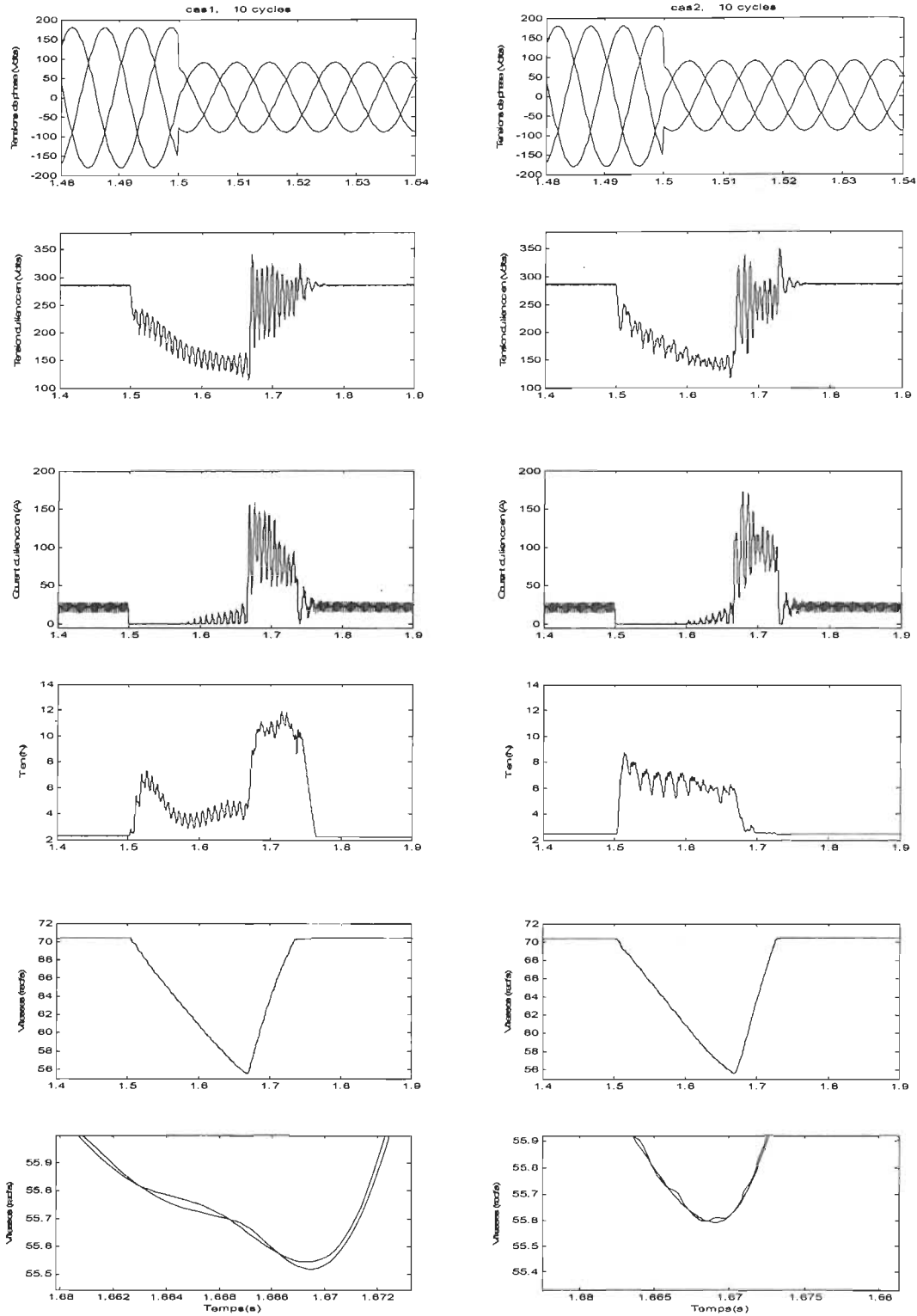


Figure A.8 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 10 cycles.

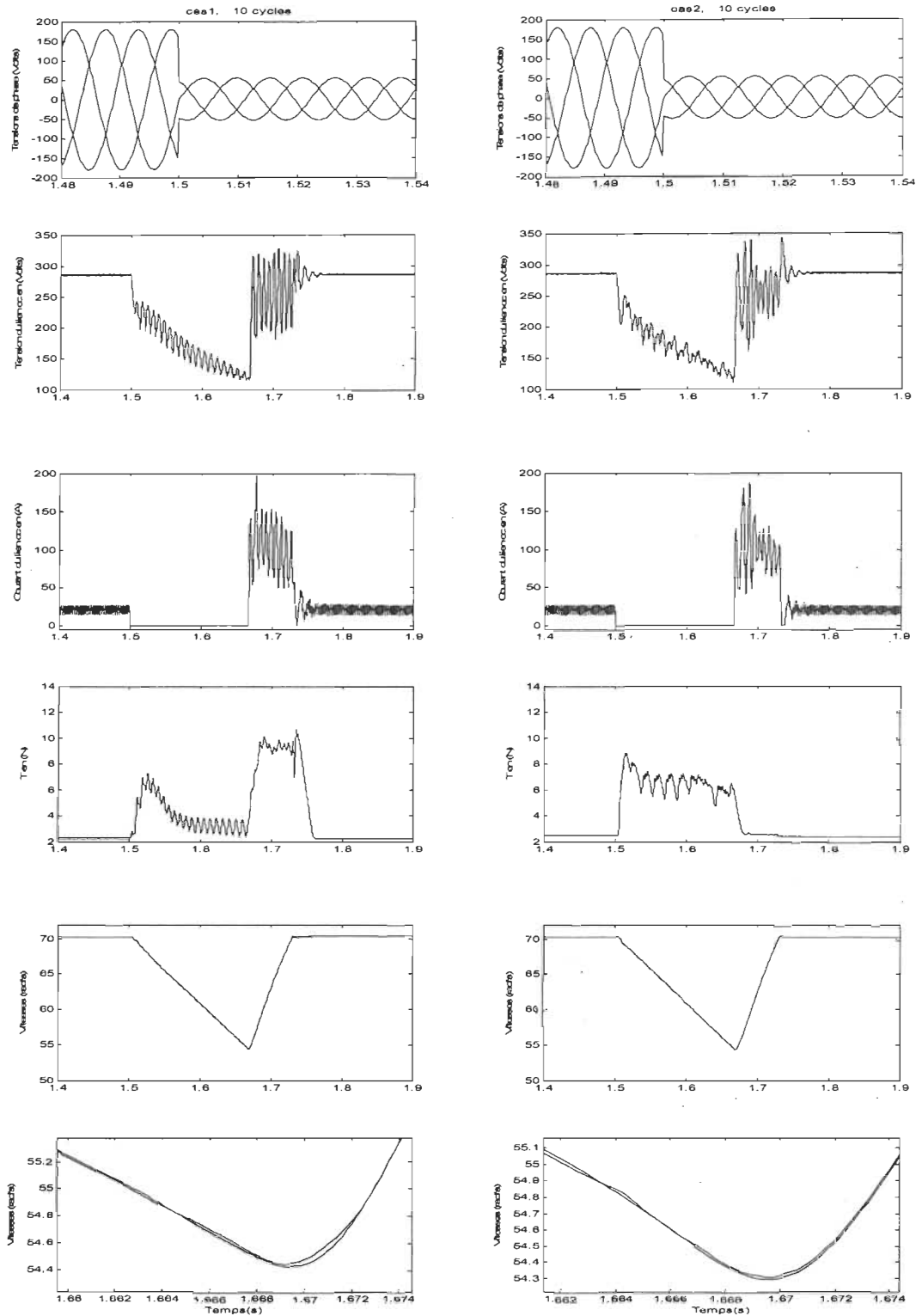


Figure A.9 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 10 cycles.

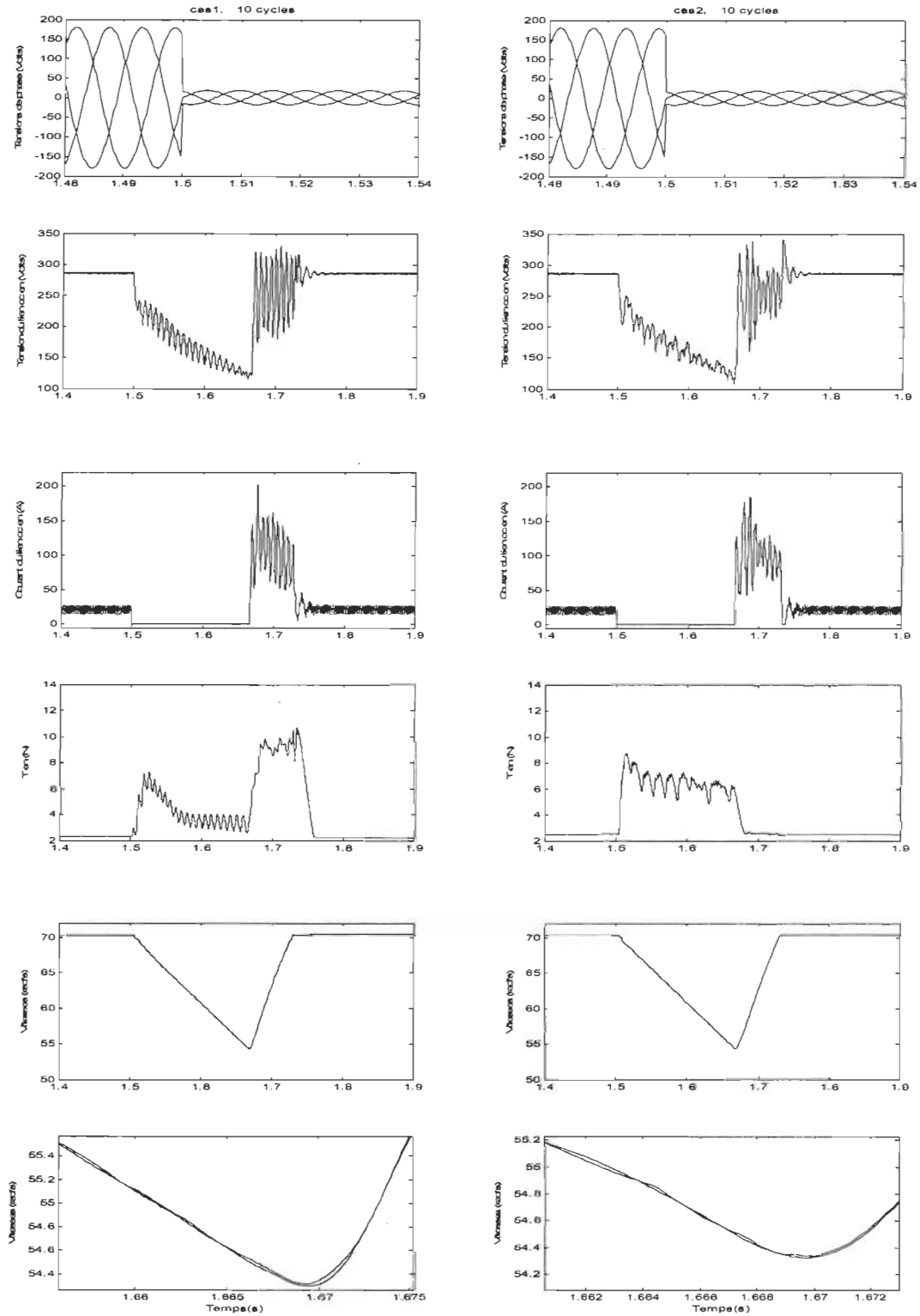


Figure A.10 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 10 cycles.

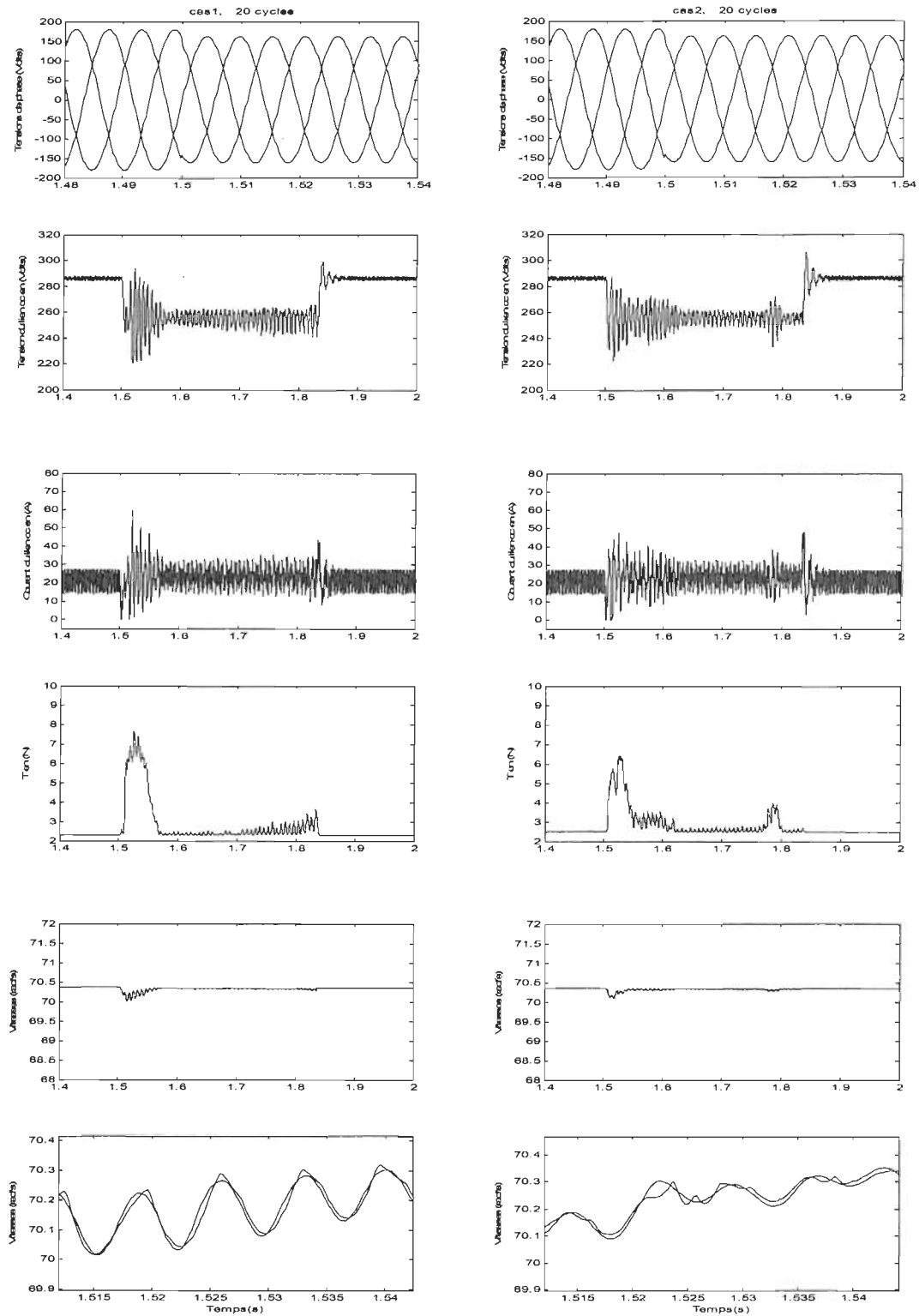


Figure A.11 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 20 cycles.

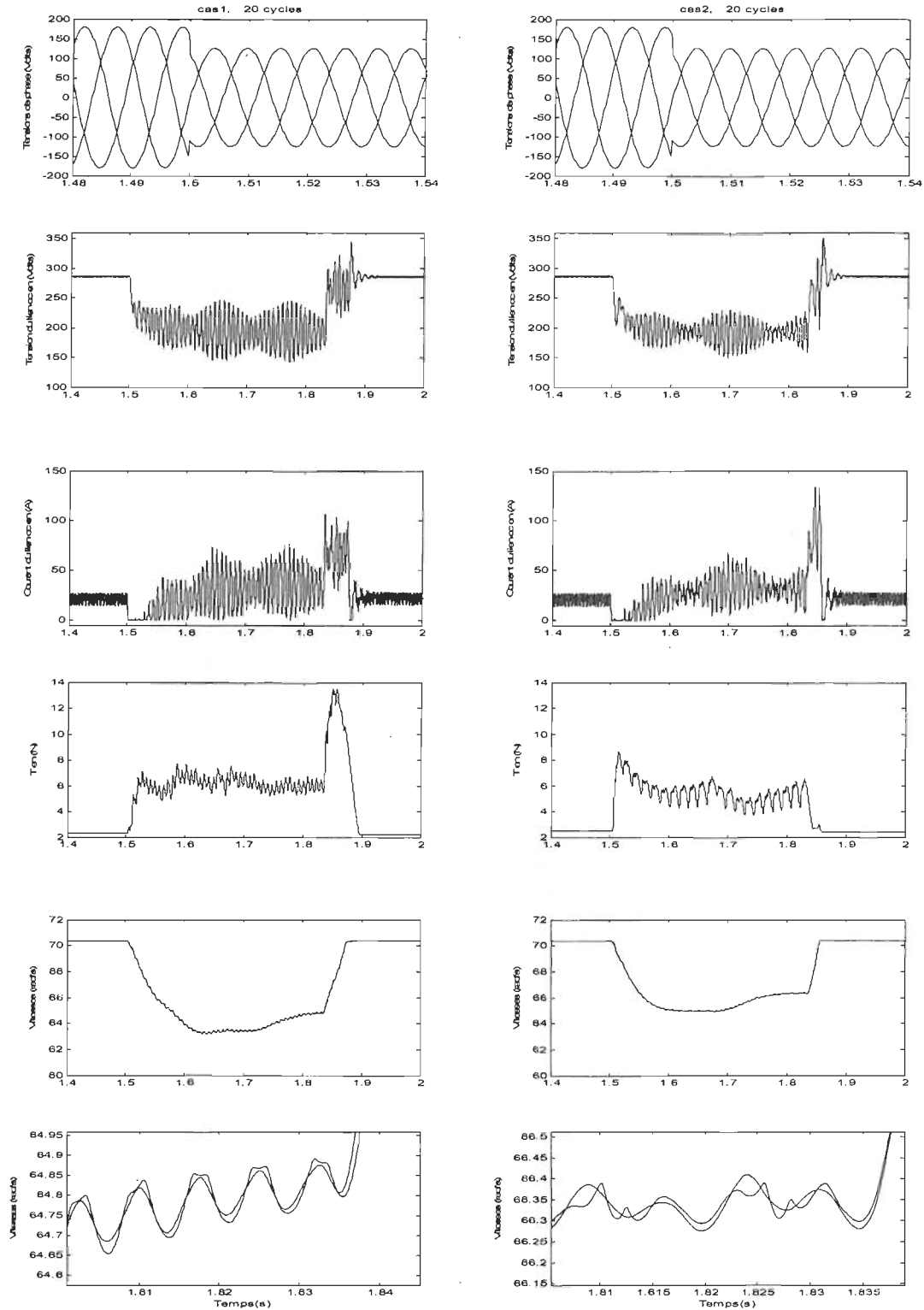


Figure A.12 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 20 cycles.

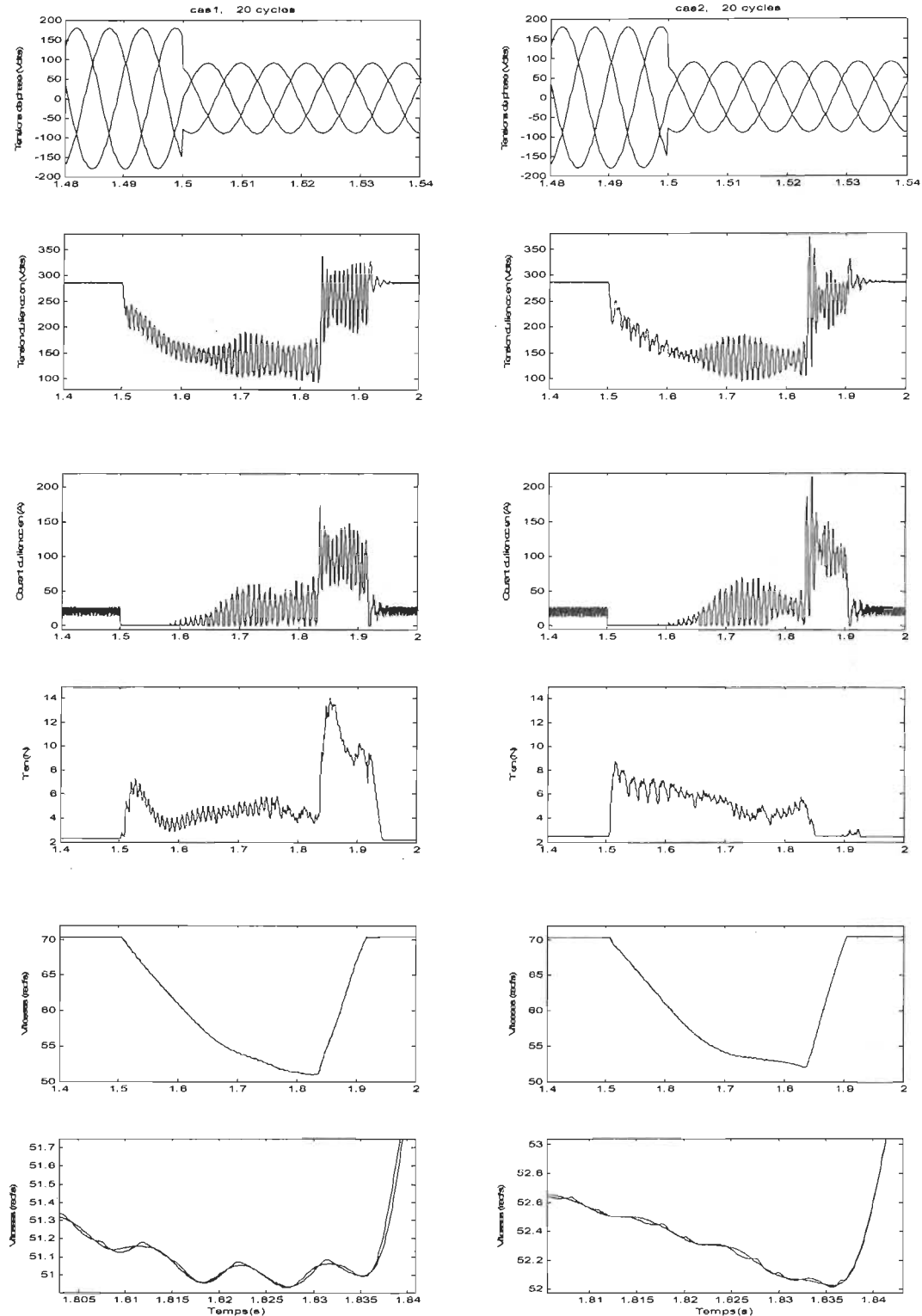


Figure A.13 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 20 cycles.

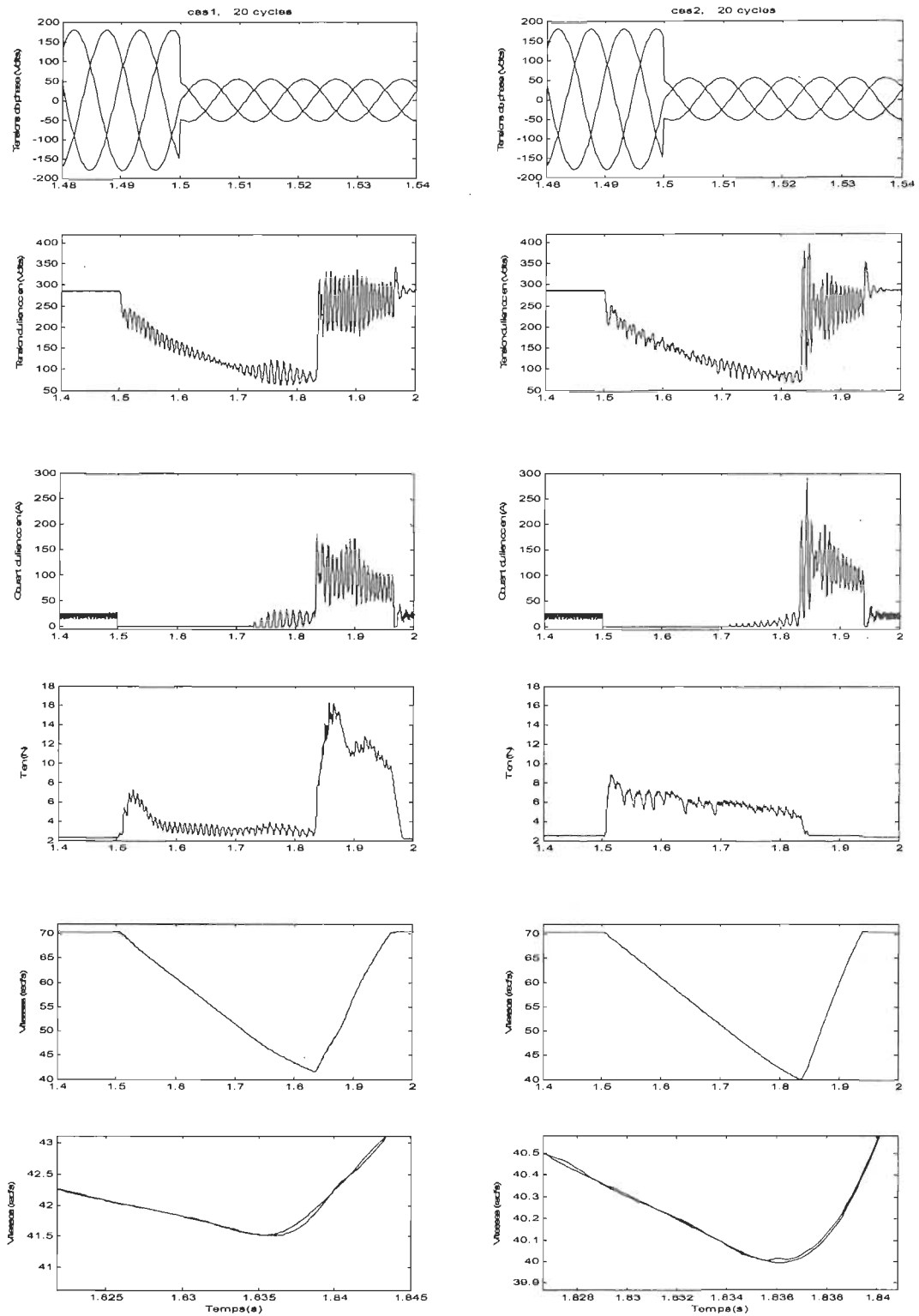


Figure A.14 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 20 cycles.

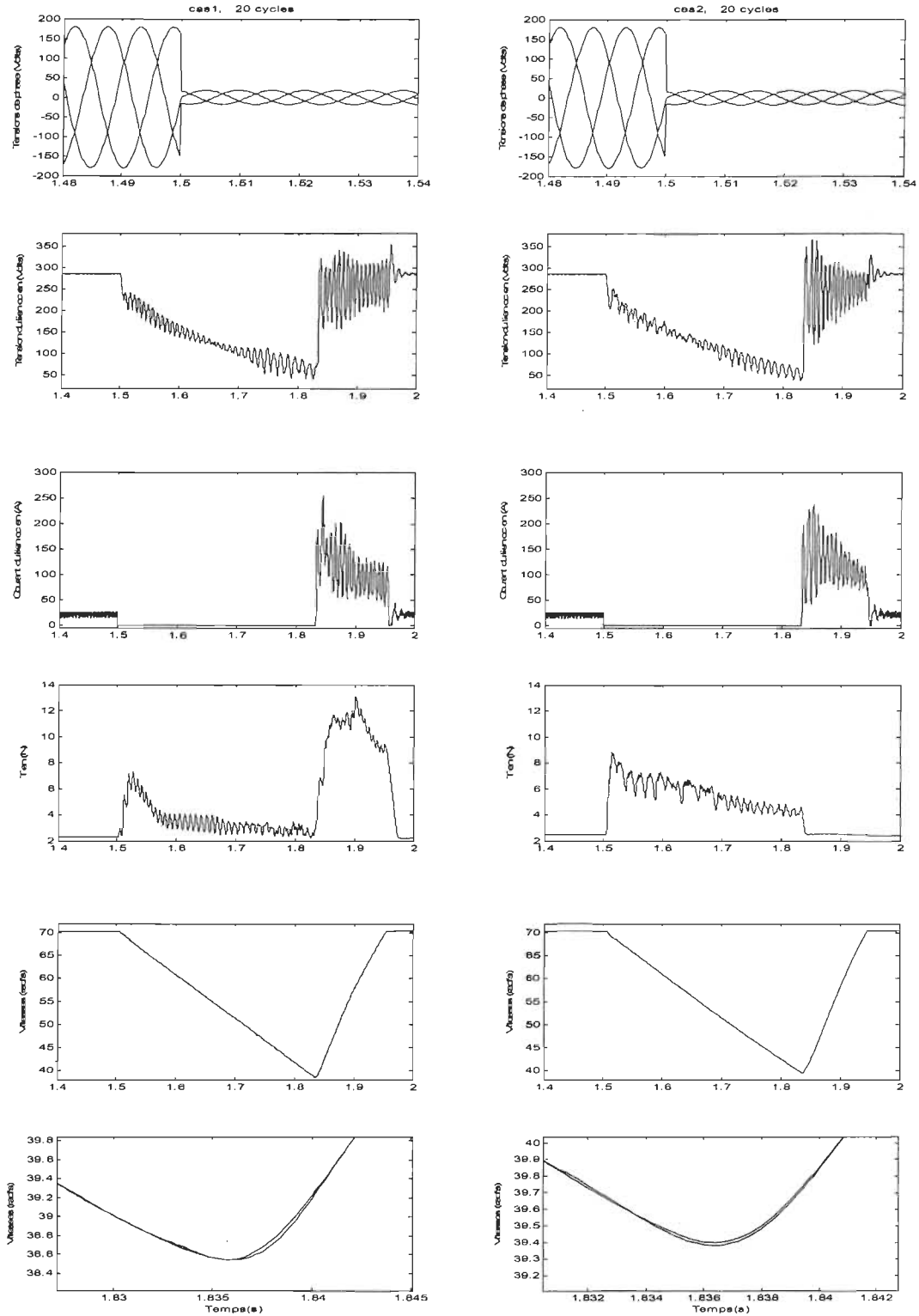


Figure A.15 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 20 cycles.

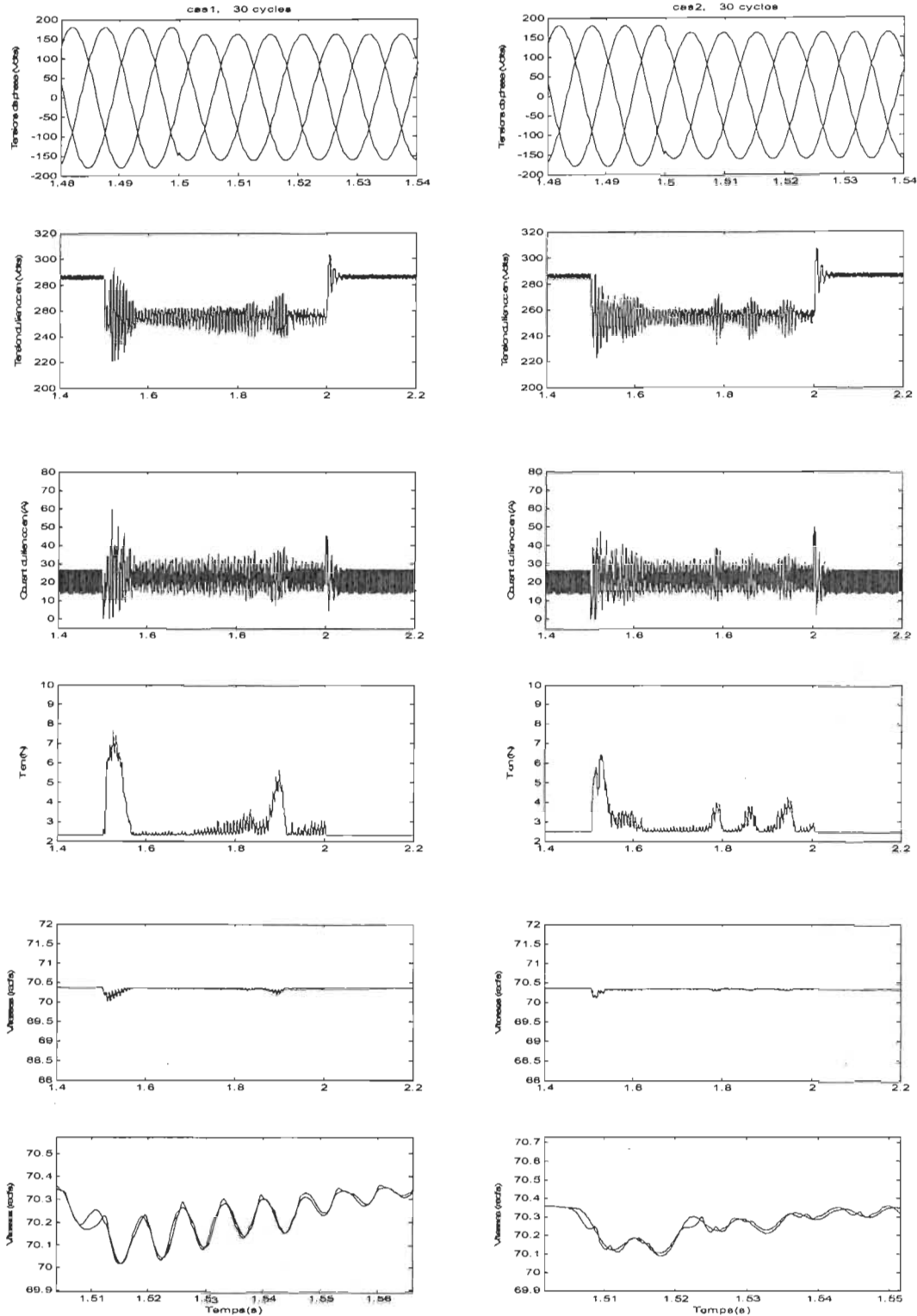


Figure A.16 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type A durant 30 cycles.

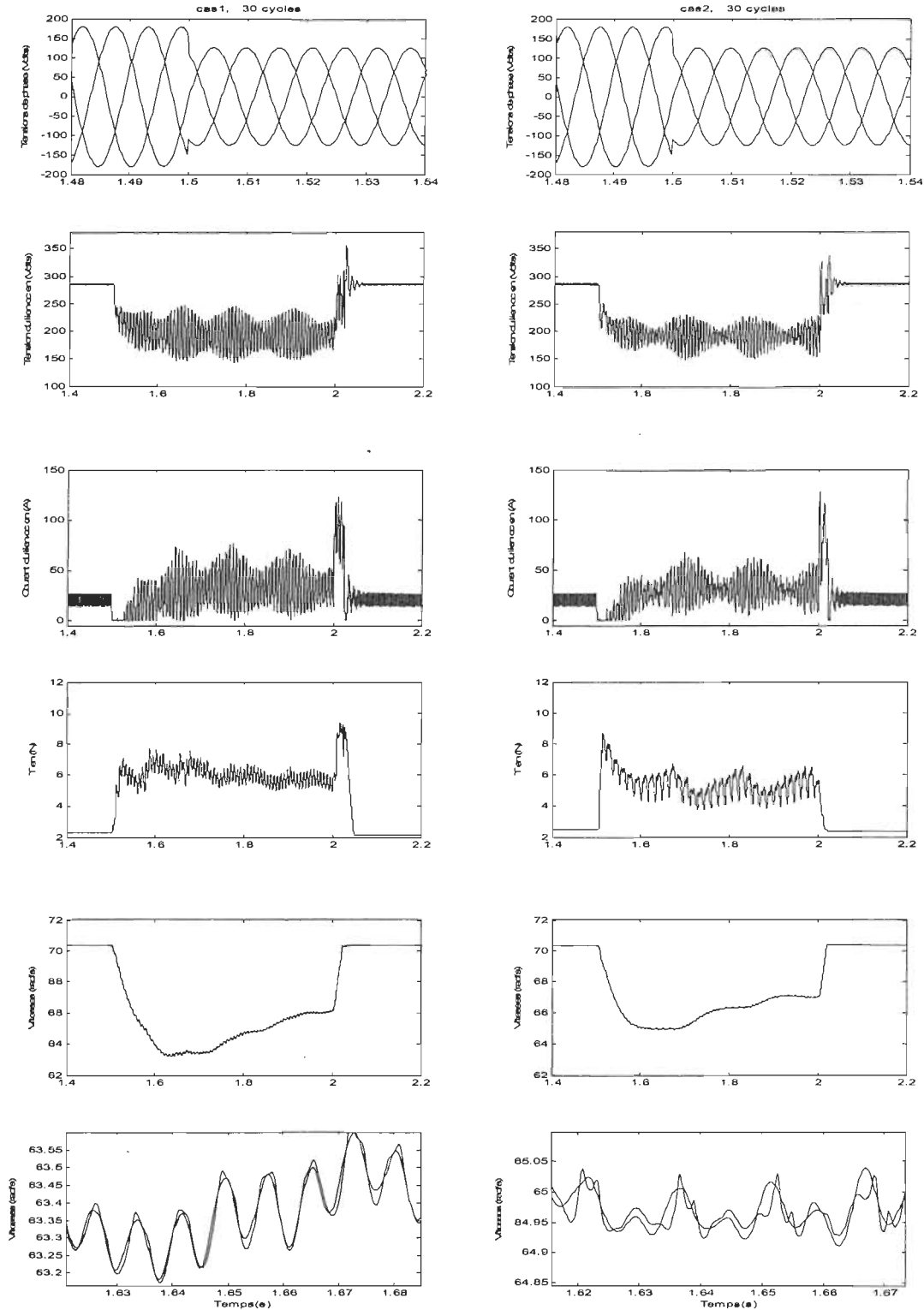


Figure A.17 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type A durant 30 cycles.

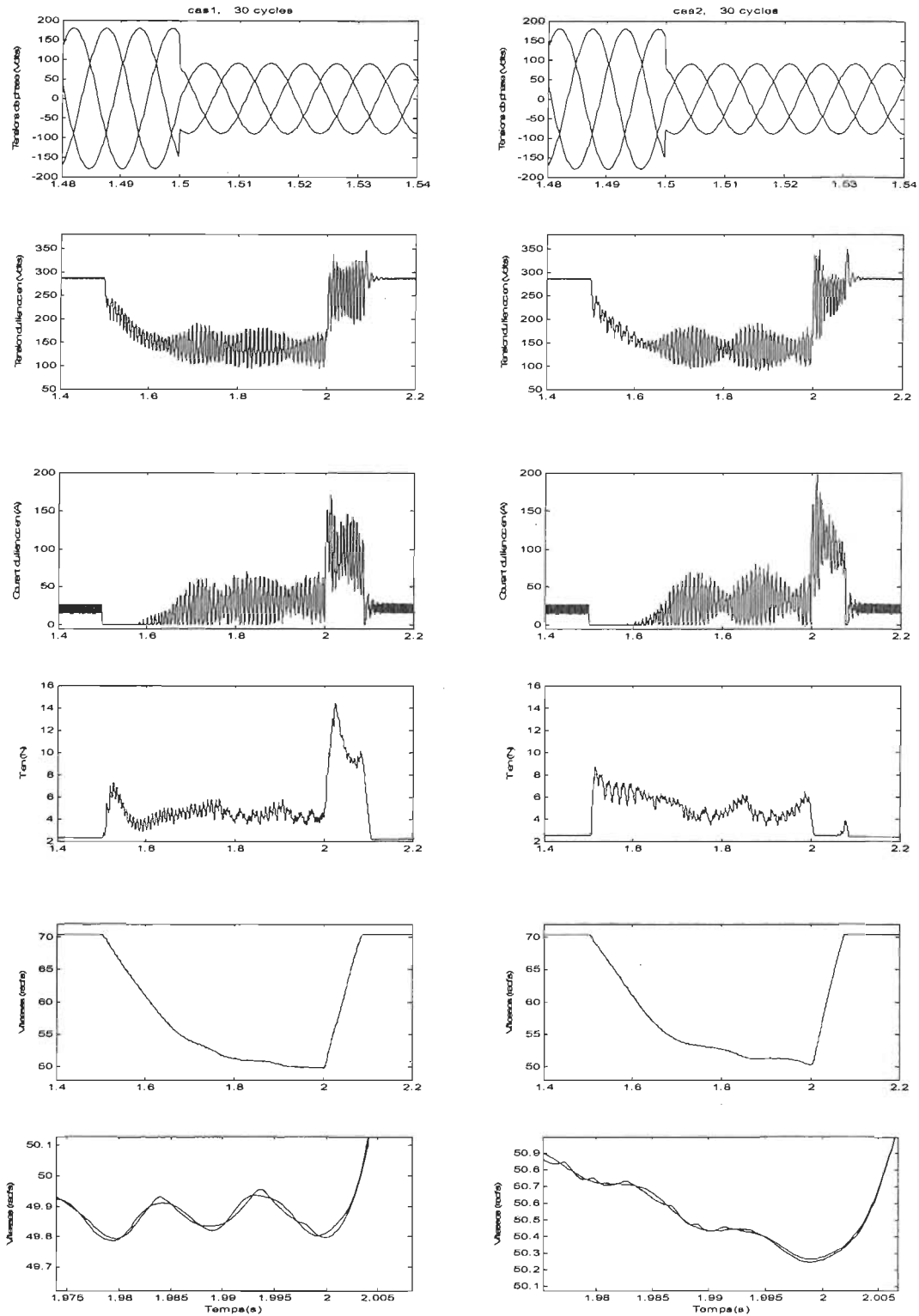


Figure A.18 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type A durant 30 cycles.

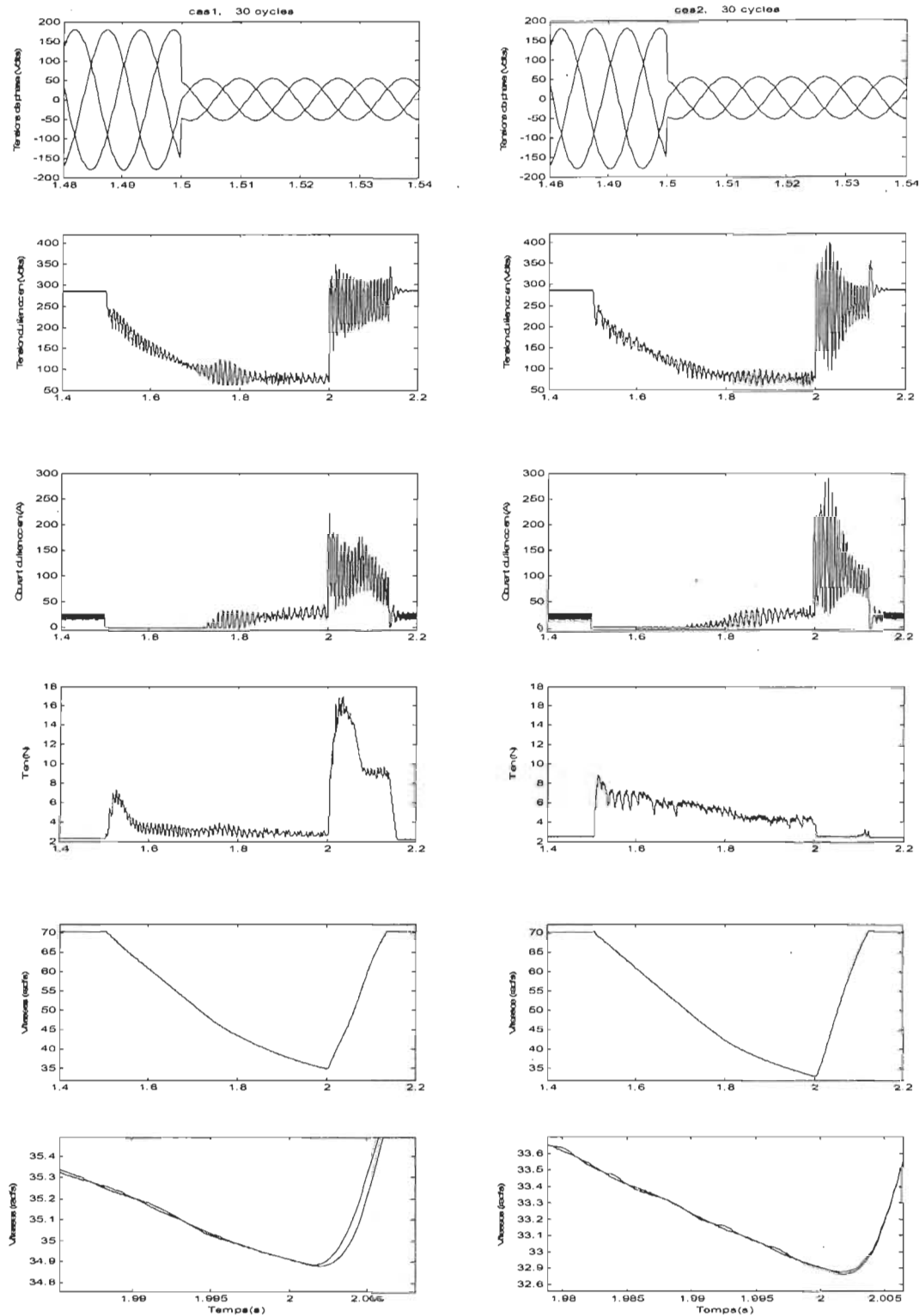


Figure A.19 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type A durant 30 cycles.

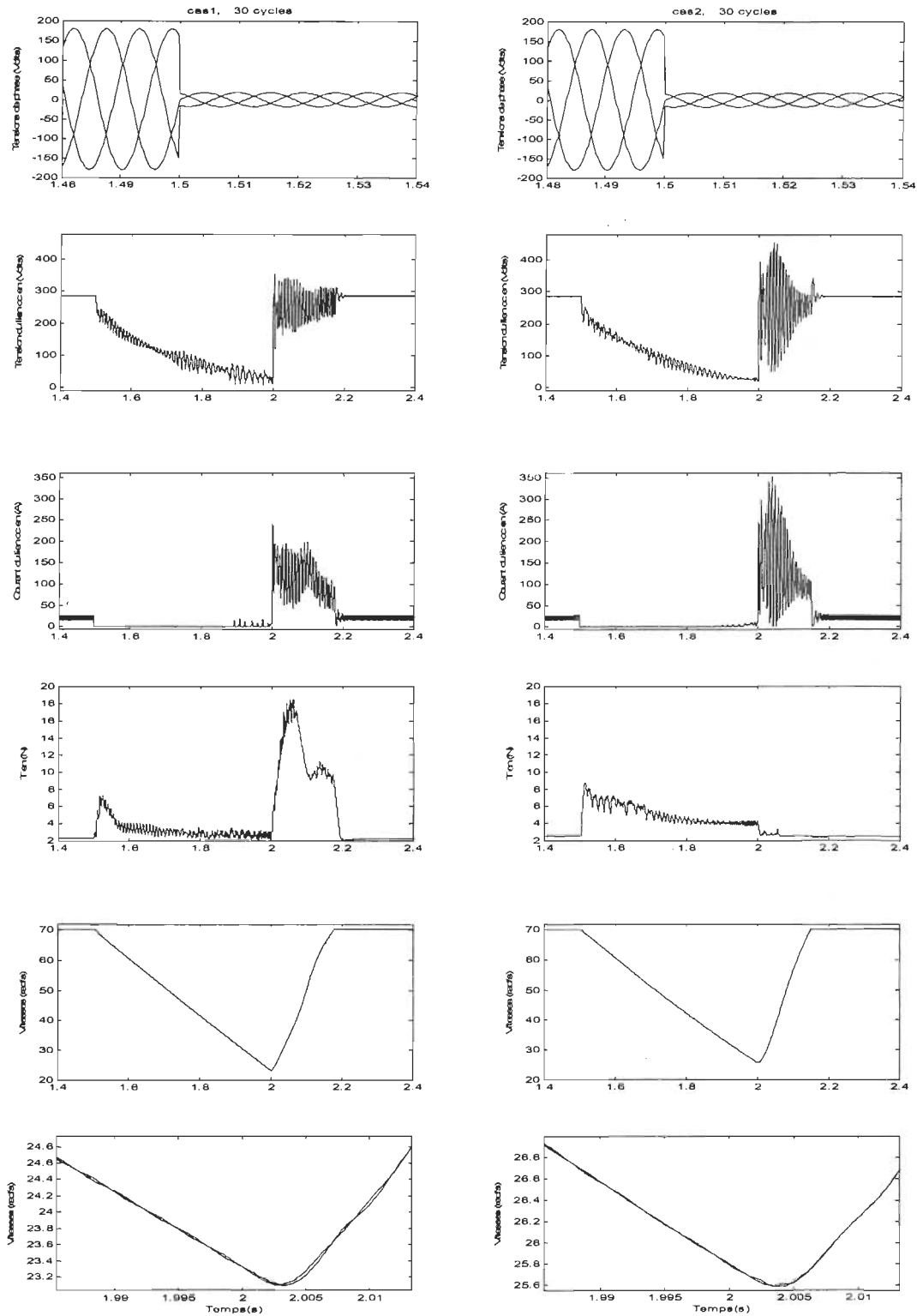


Figure A.20 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type A durant 30 cycles.

ANNEXE B

Résultats de simulation d'un système d'EVV couplés en présence de creux de tension de type B.

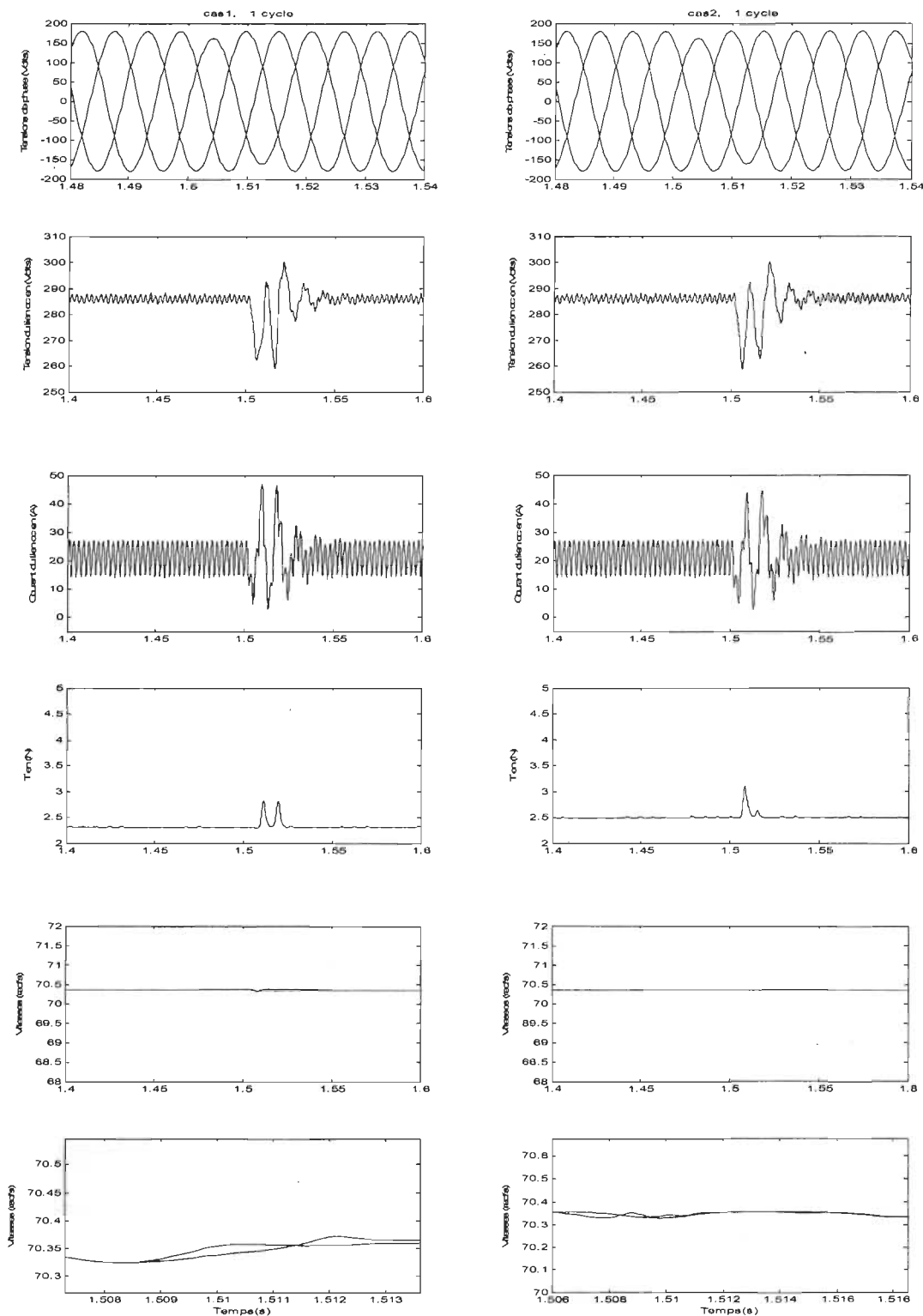


Figure B.1 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 1 cycle.

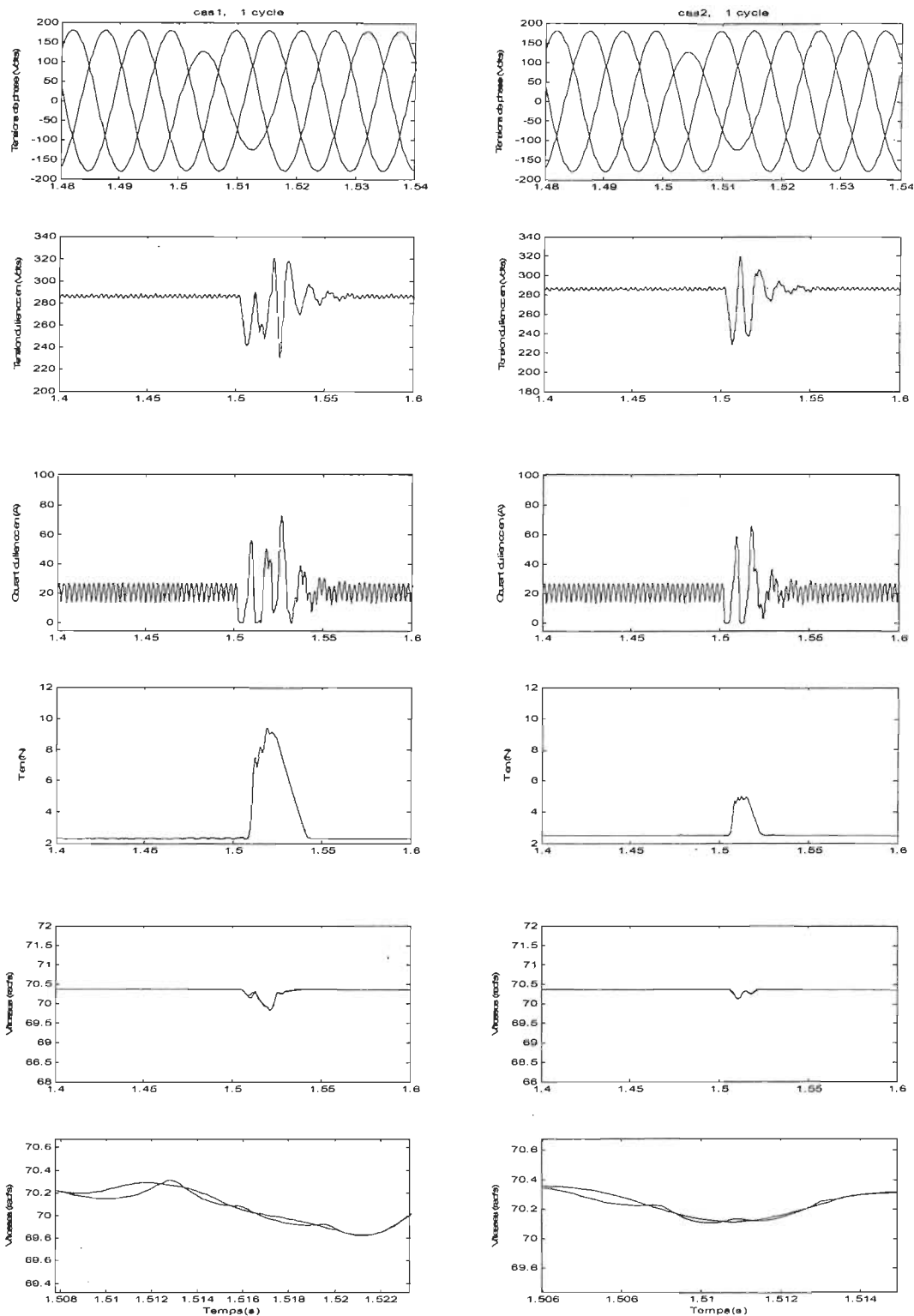


Figure B.2 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 1 cycle.

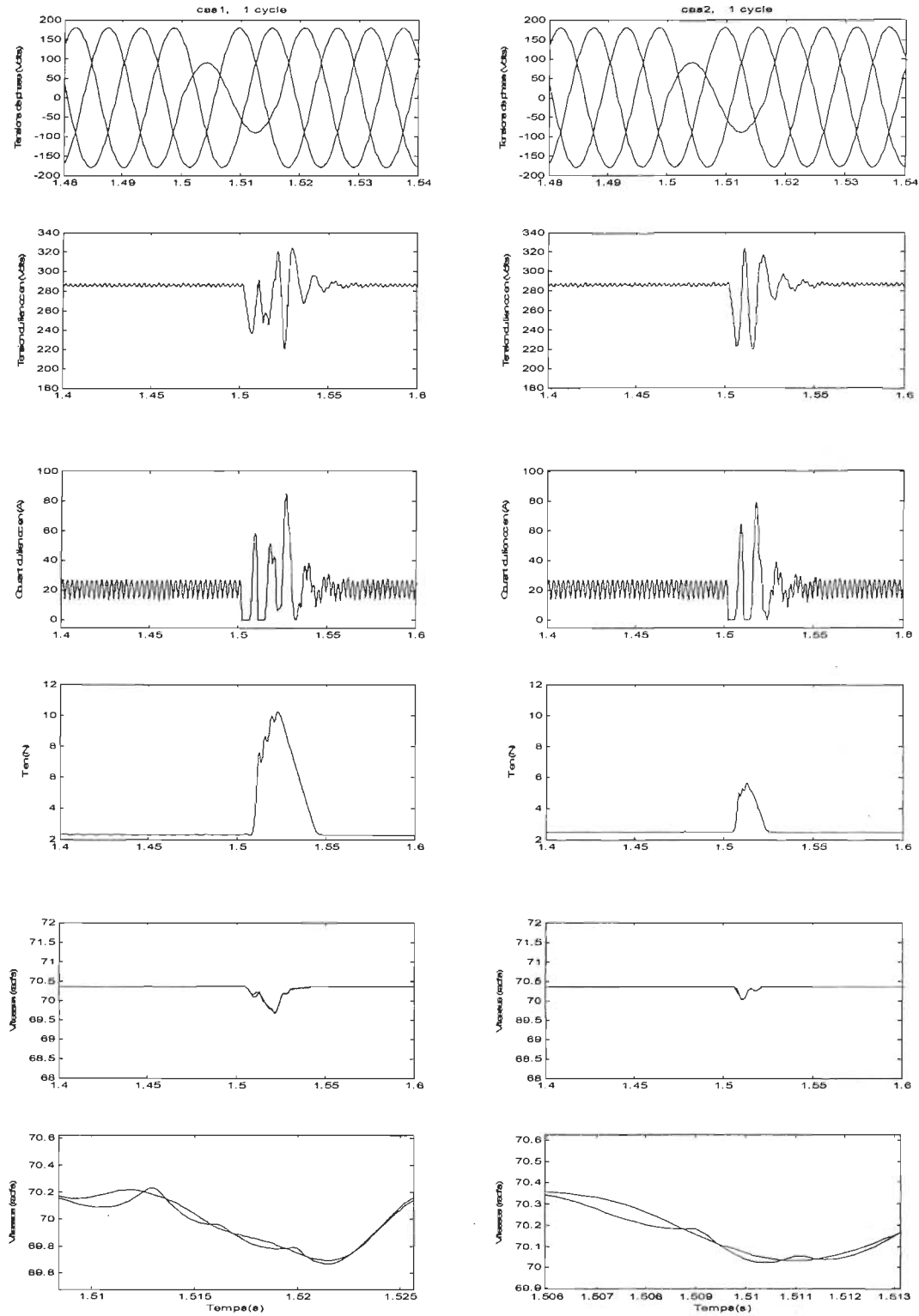


Figure B.3 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 1 cycle.

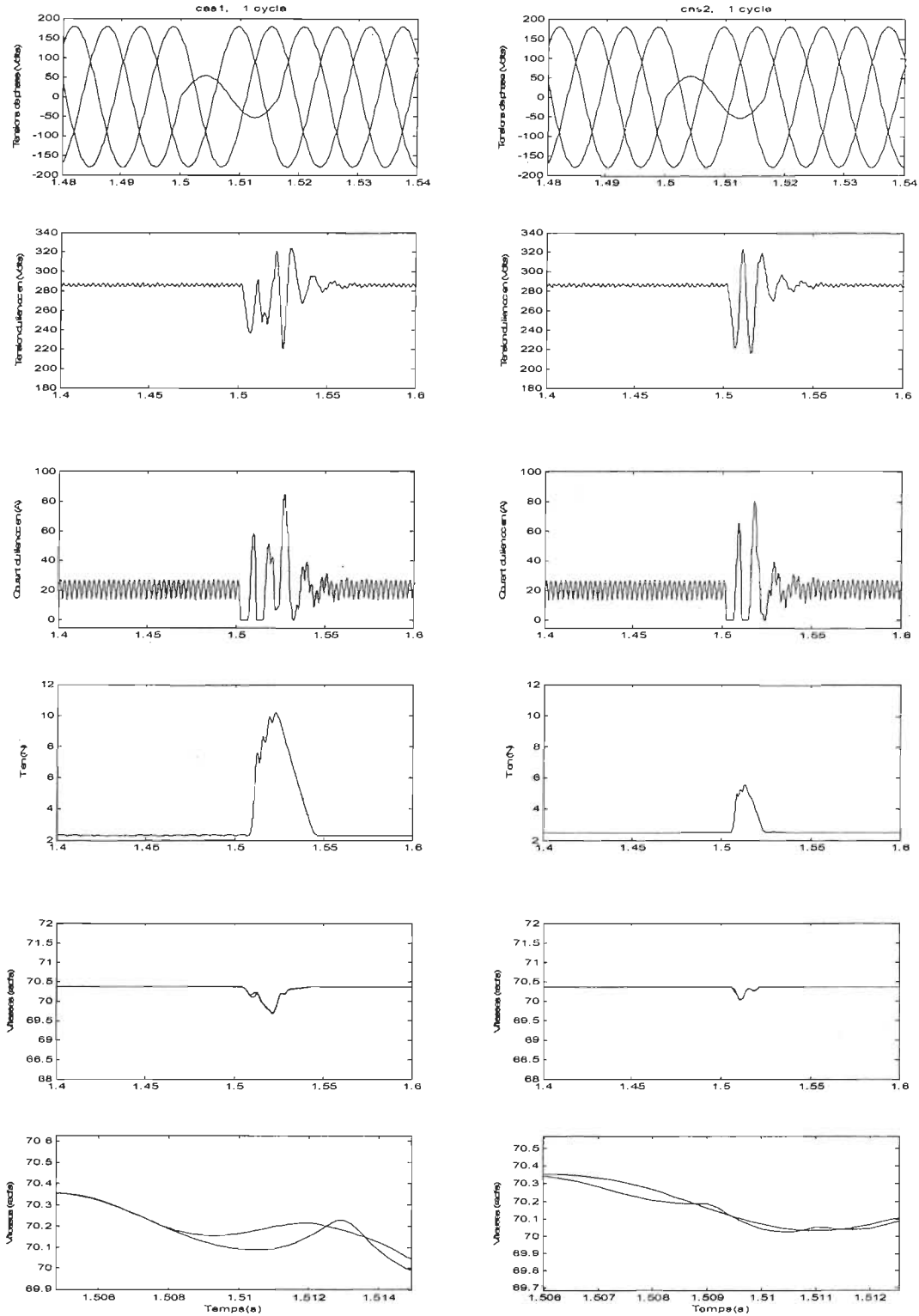


Figure B.4 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 1 cycle.

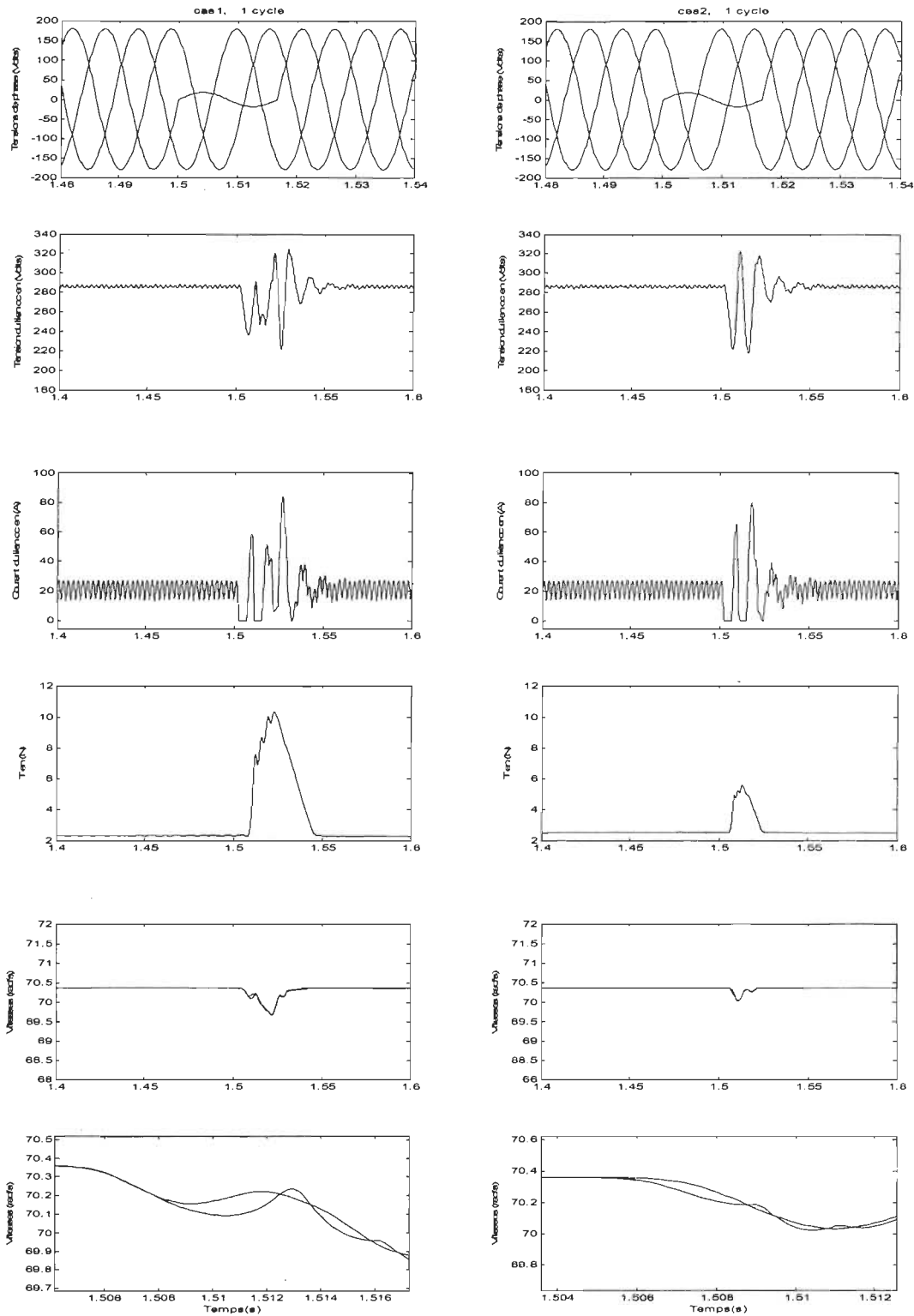


Figure B.5 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 1 cycle.

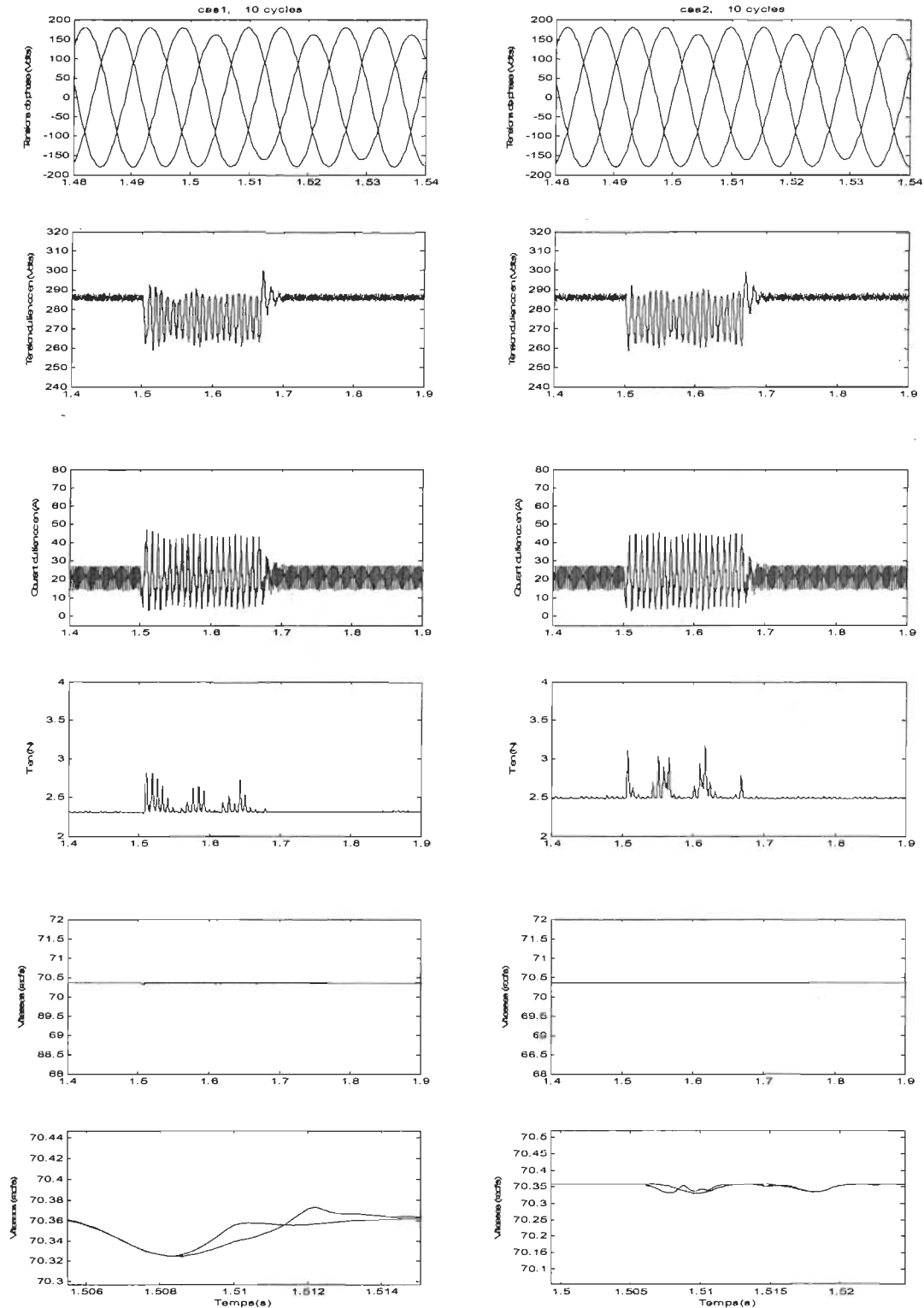


Figure B.6 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 10 cycles.

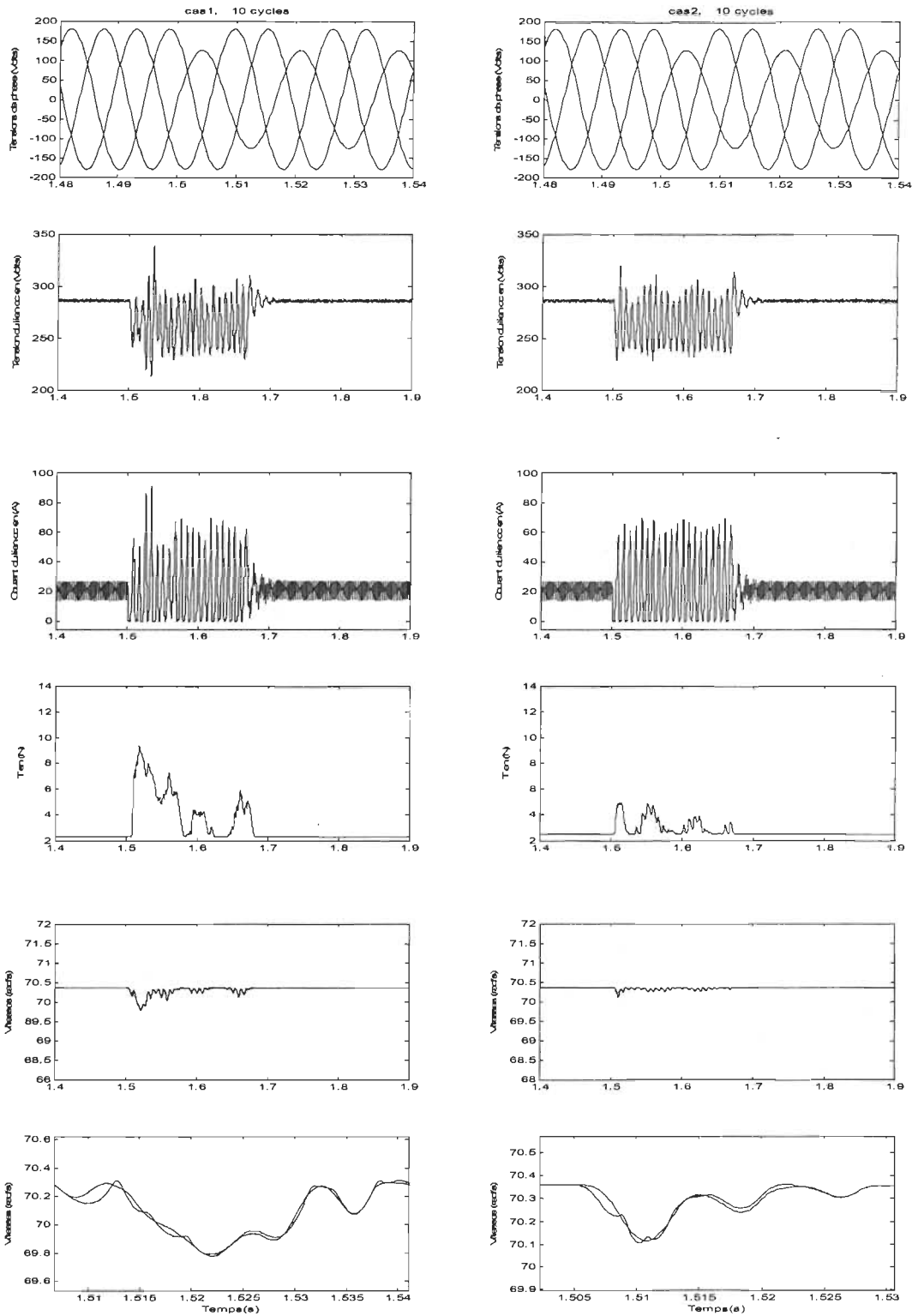


Figure B.7 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 10 cycles.

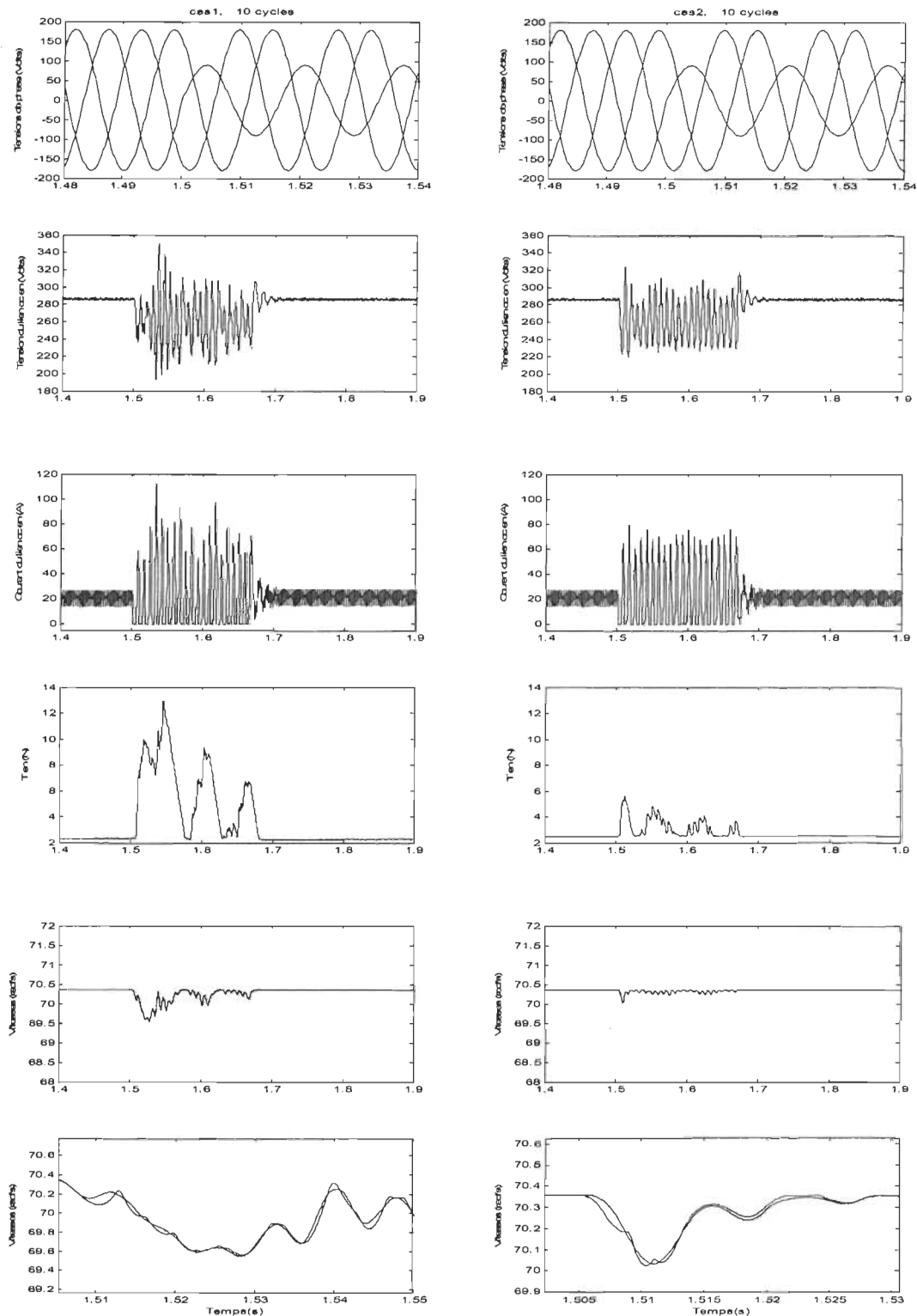


Figure B.8 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 10 cycles.

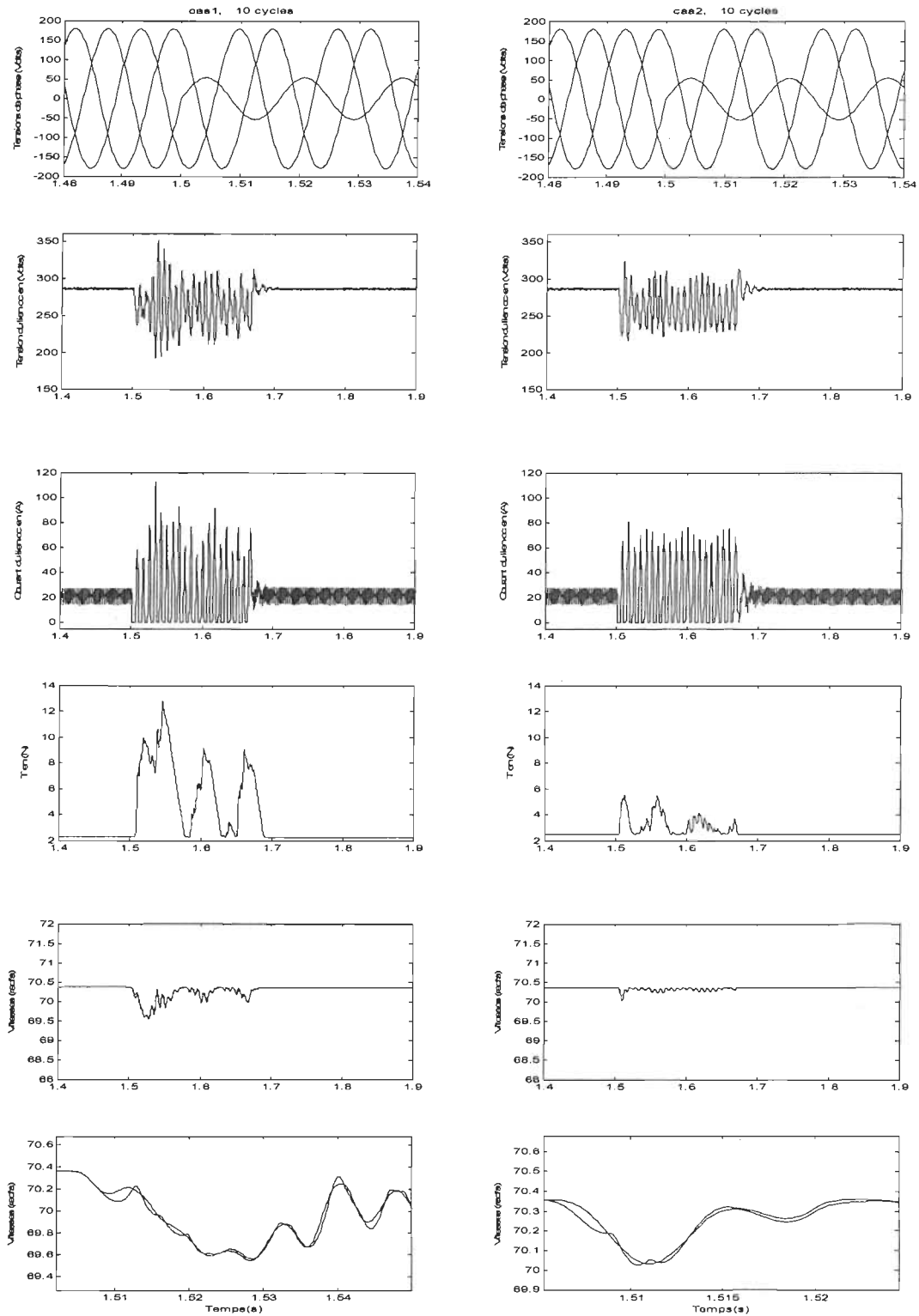


Figure B.9 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 10 cycles.

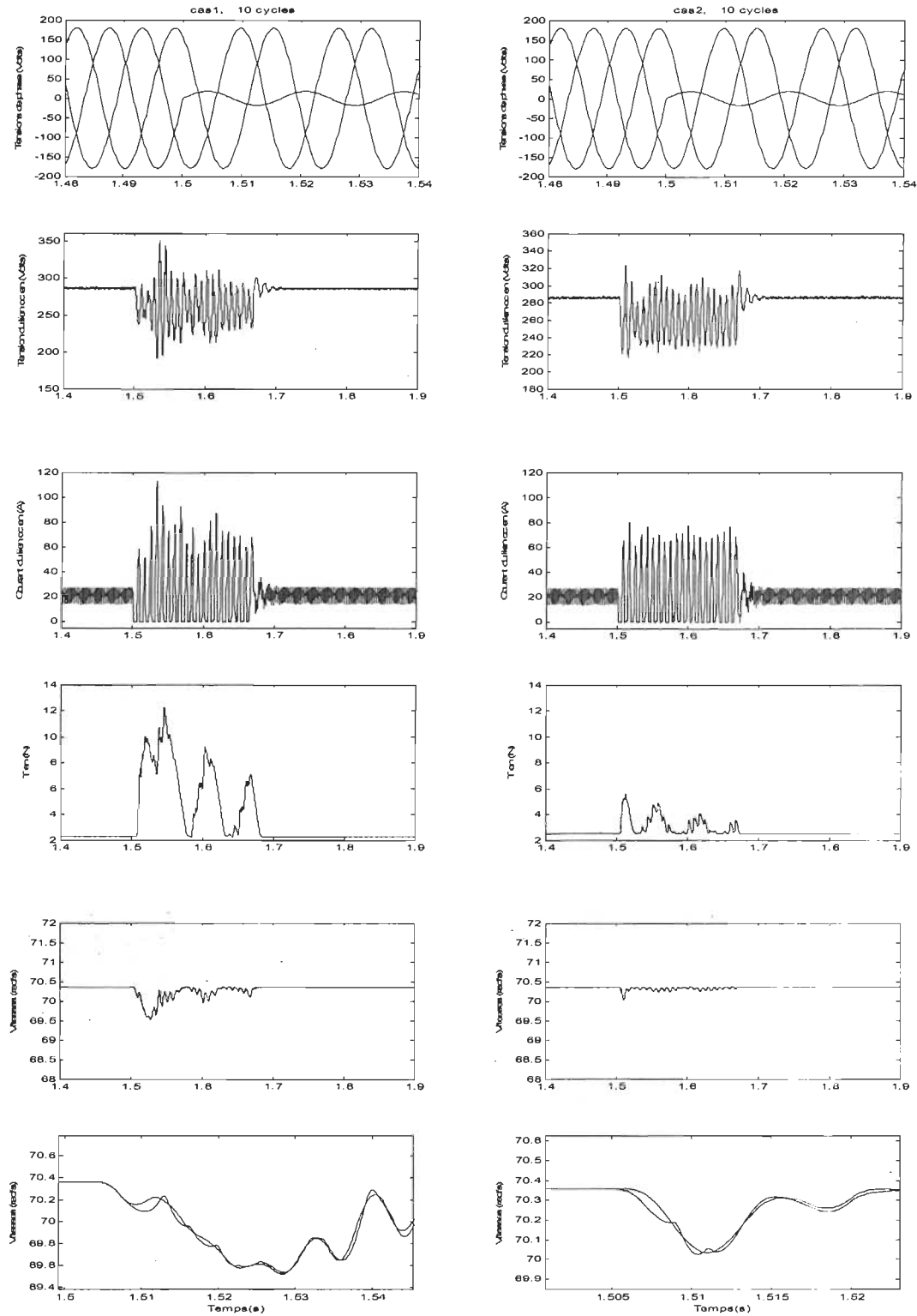


Figure B.10 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 10 cycles.

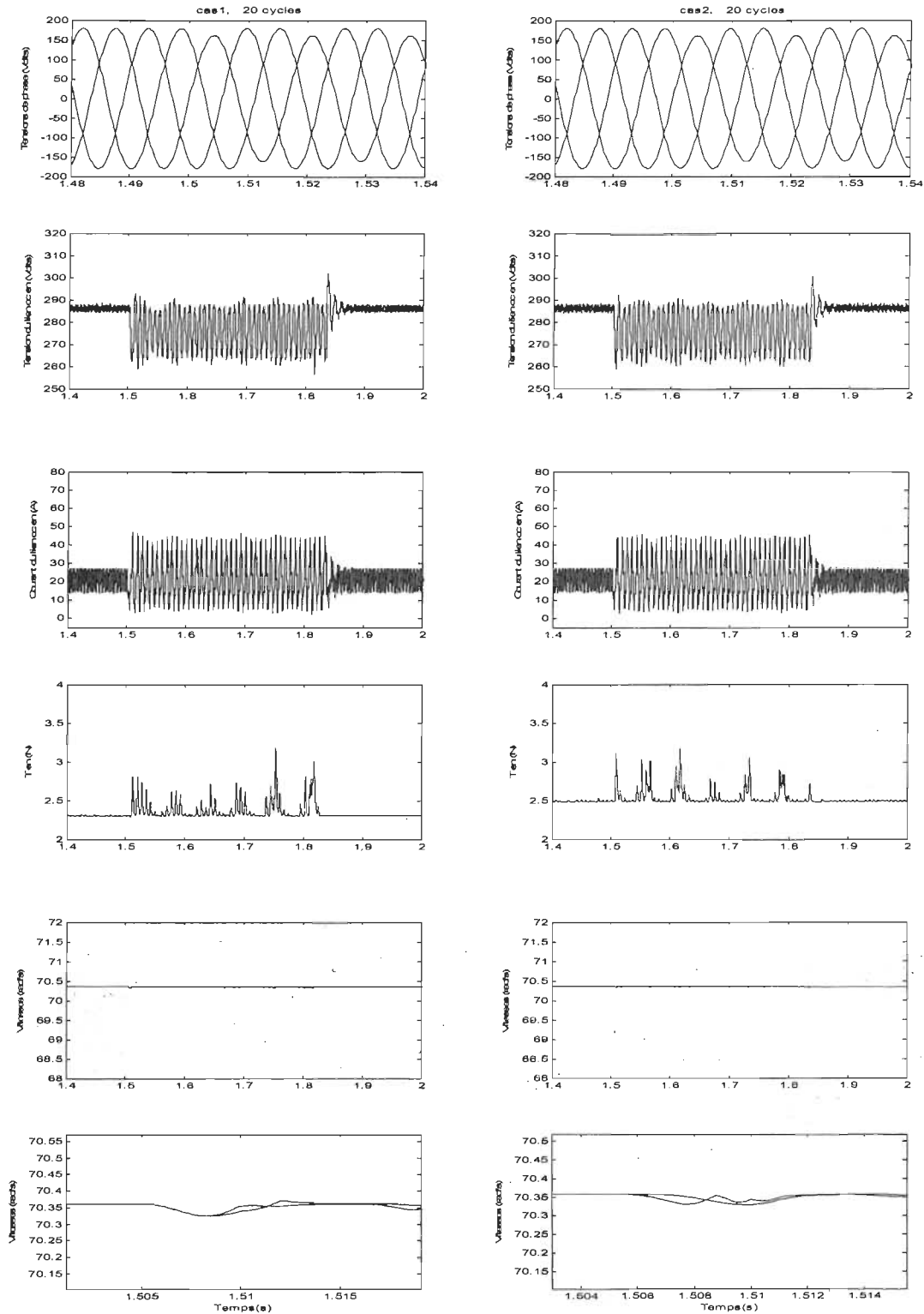


Figure B.11 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 20 cycles.

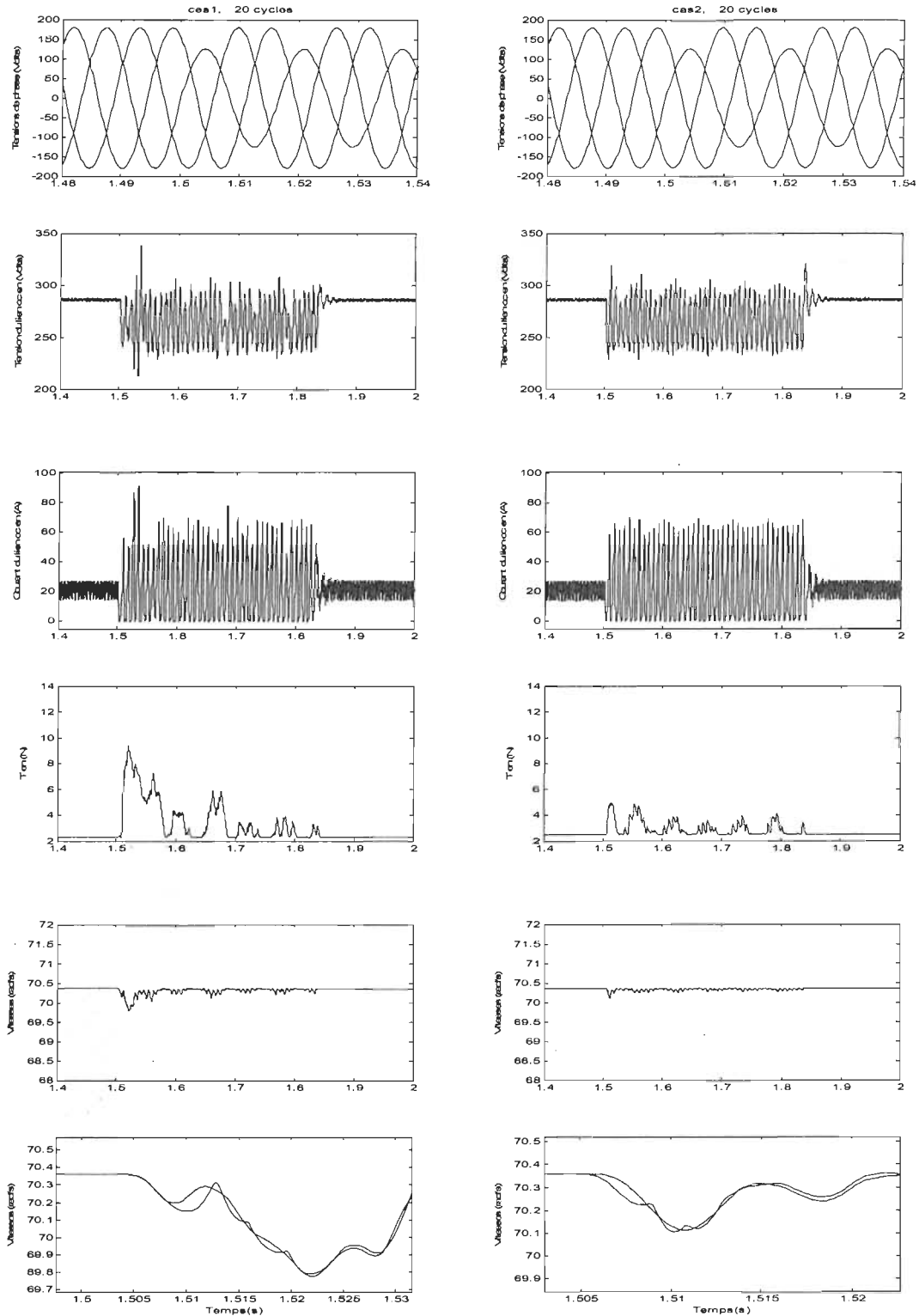


Figure B.12 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 20 cycles.

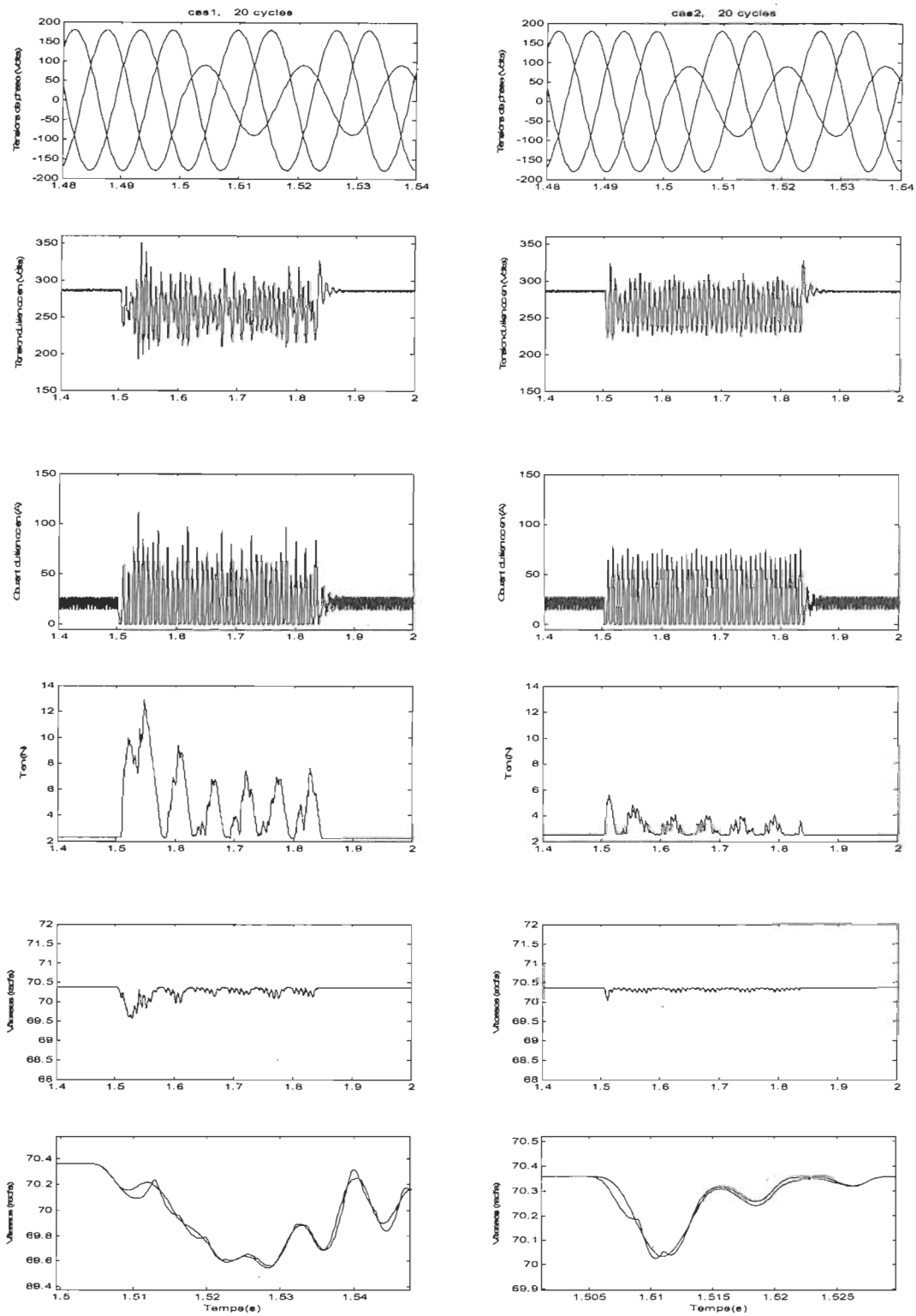


Figure B.13 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 20 cycles.

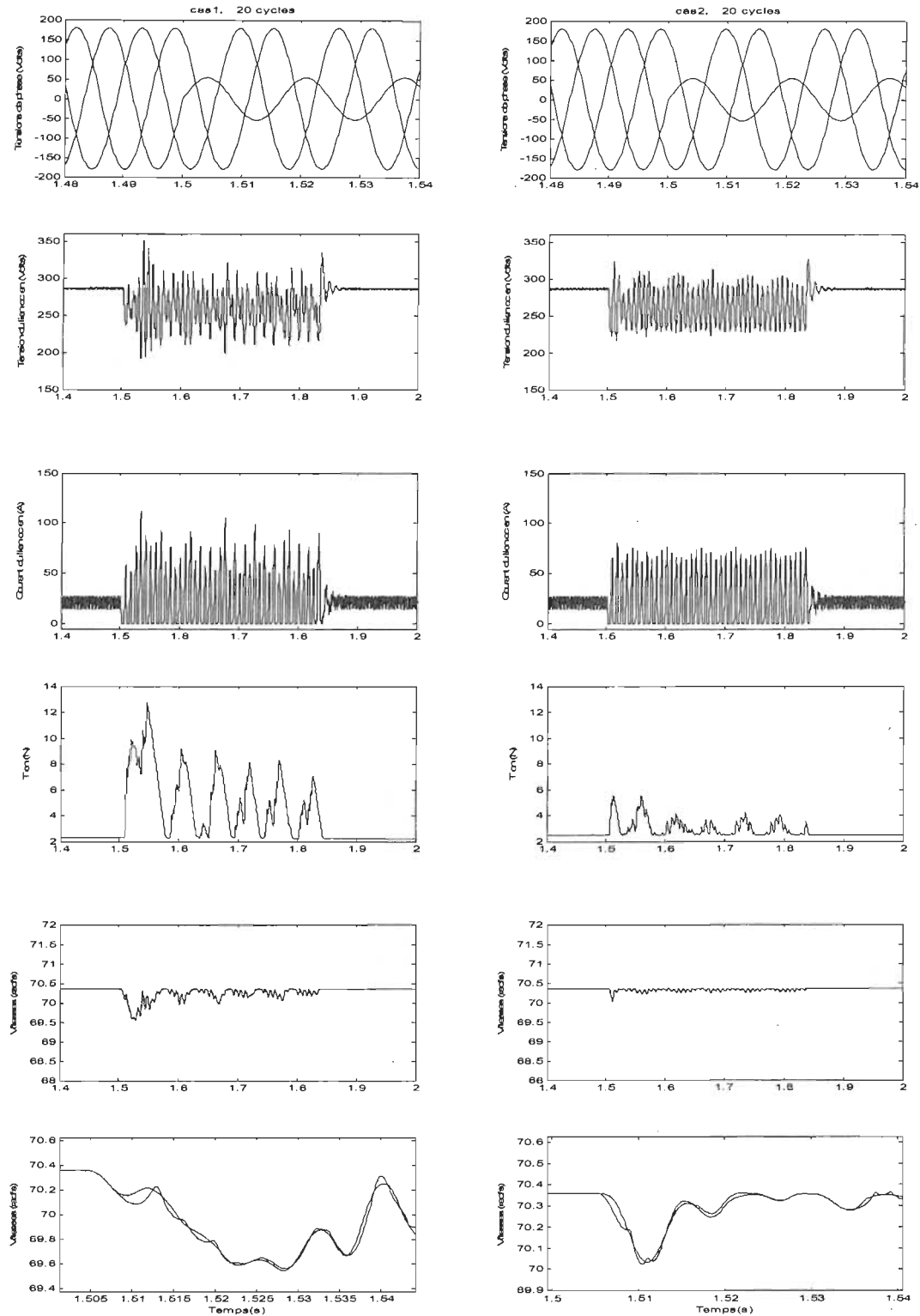


Figure B.14 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 20 cycles.

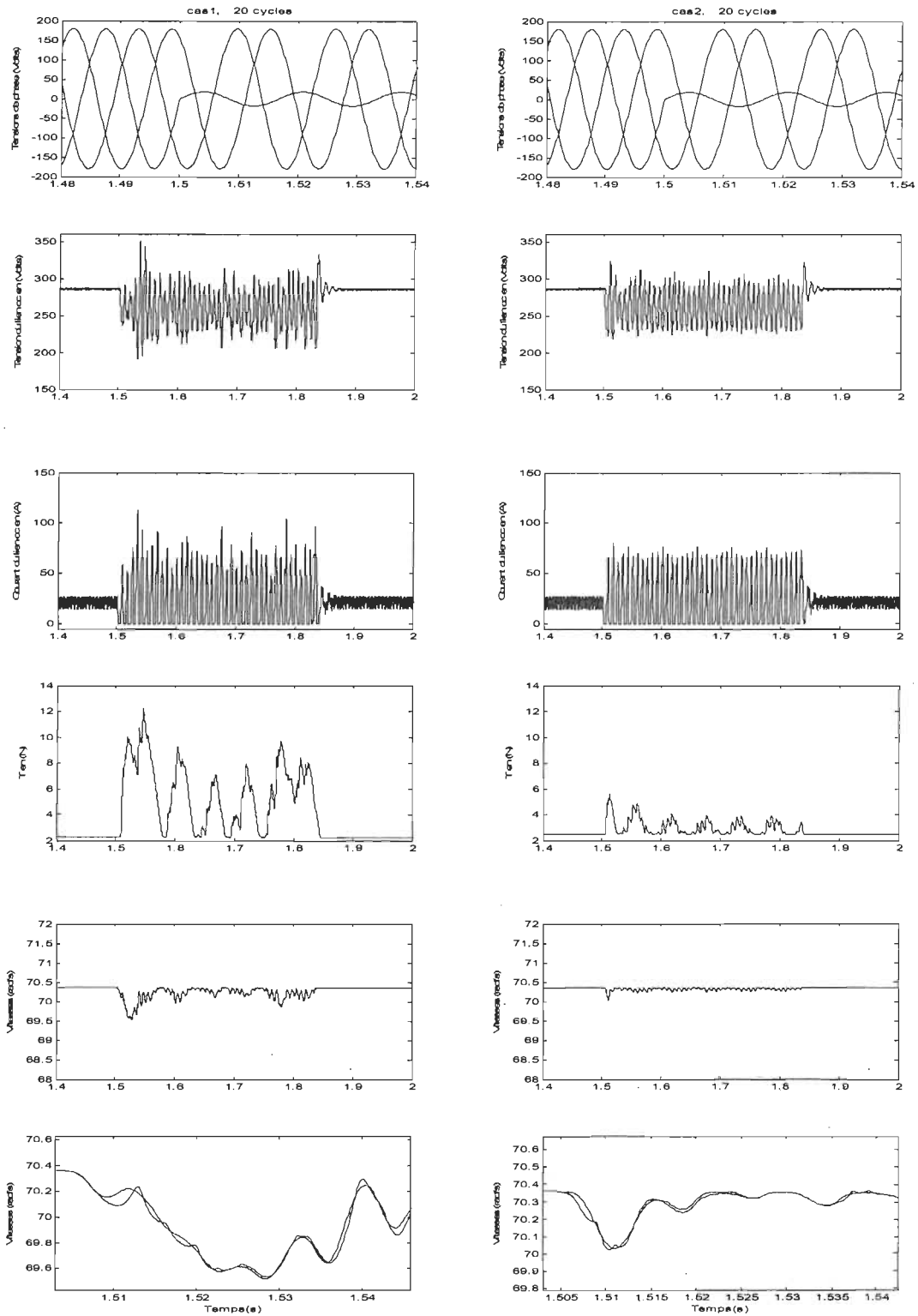


Figure B.15 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 20 cycles.

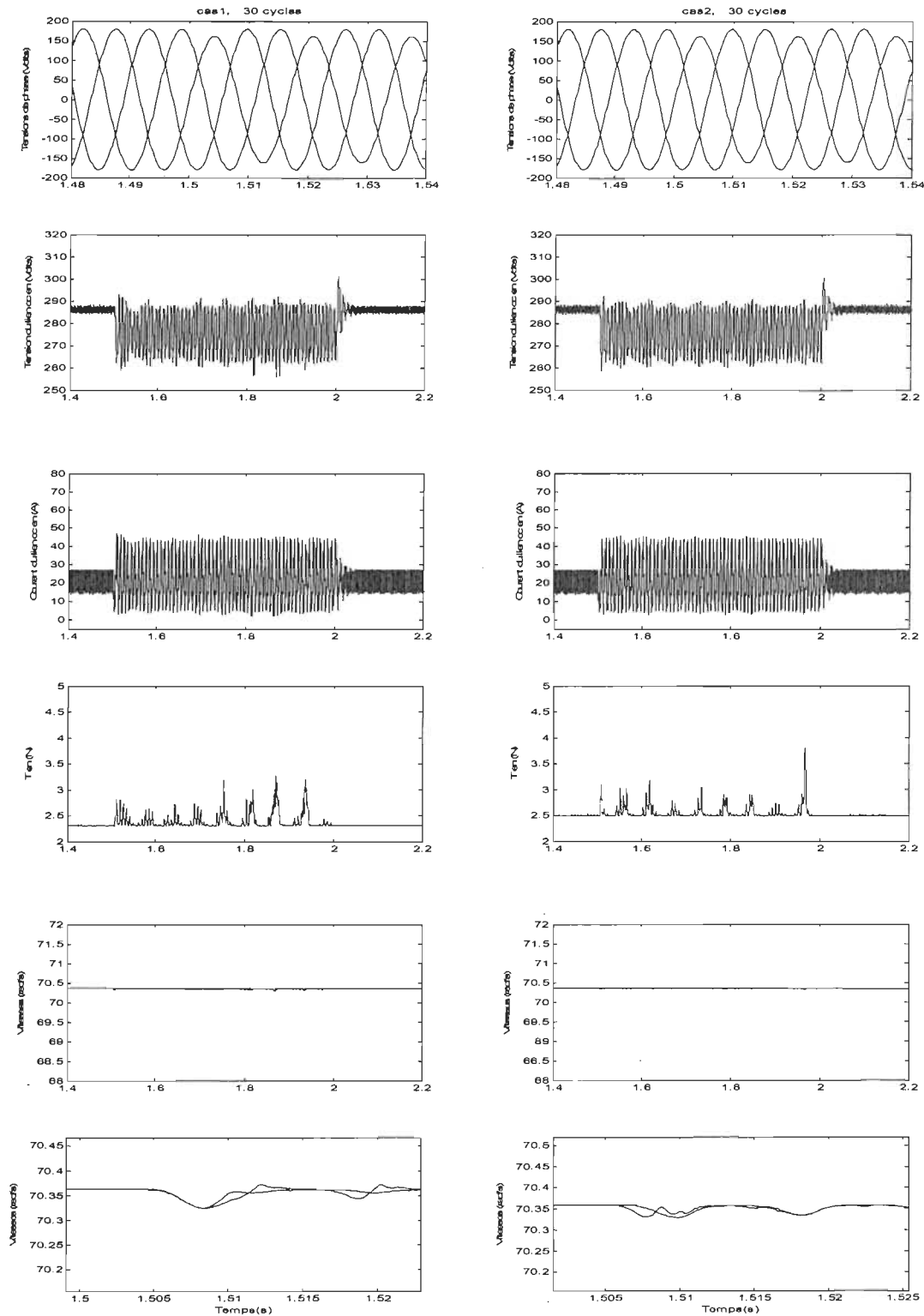


Figure B.16 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 10% de creux de tension de type B durant 30 cycles.

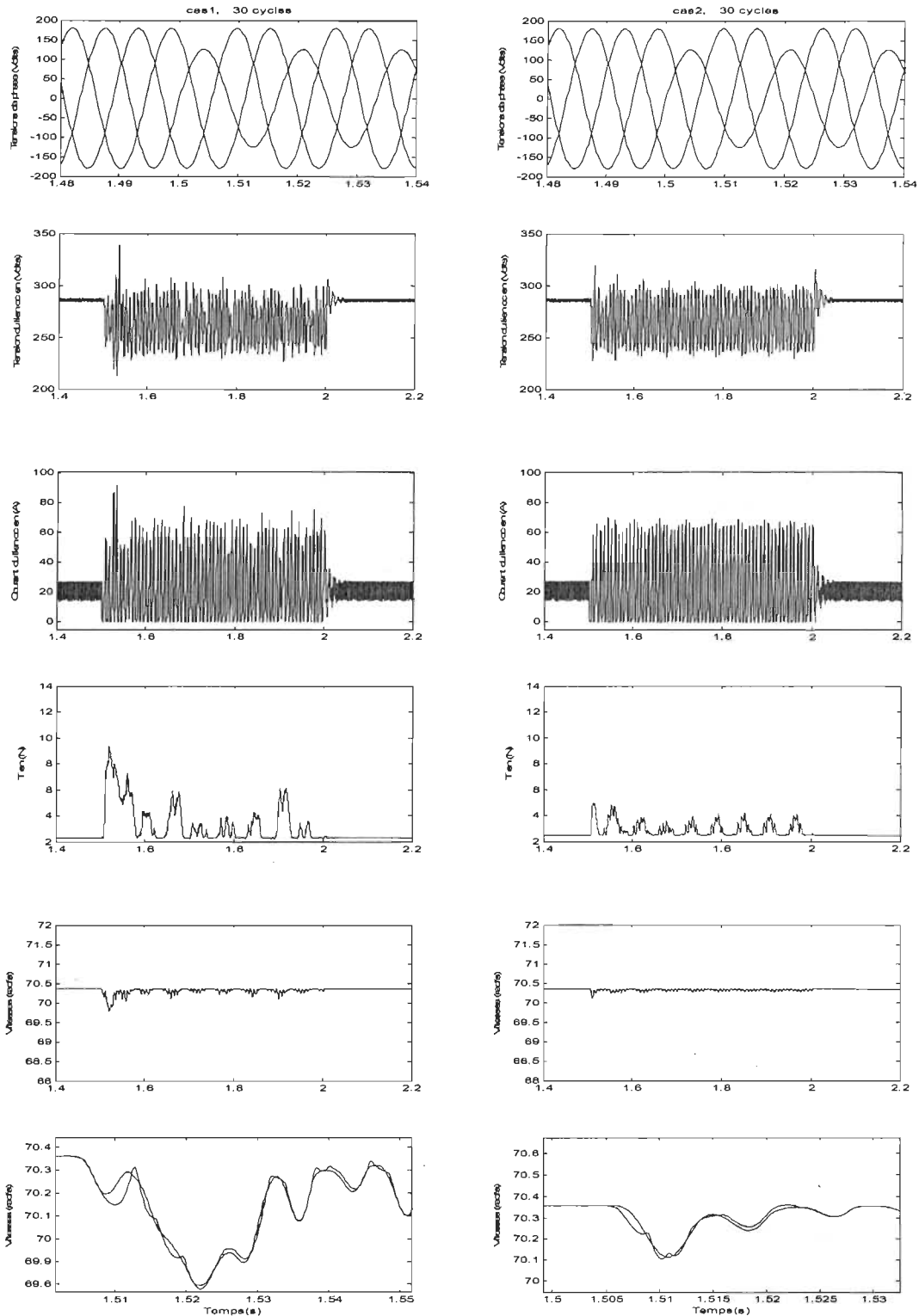


Figure B.17 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 30% de creux de tension de type B durant 30 cycles.

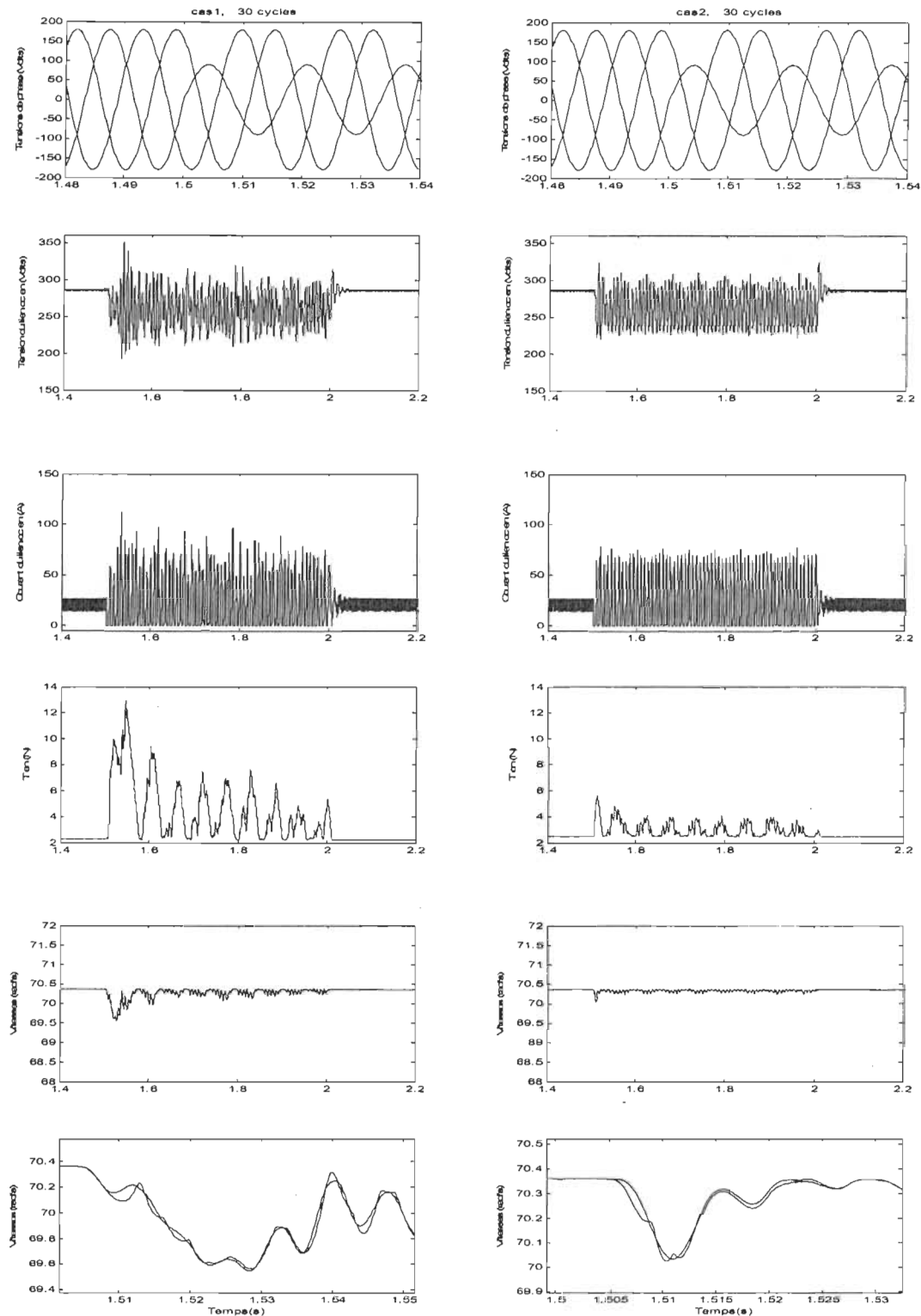


Figure B.18 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 50% de creux de tension de type B durant 30 cycles.

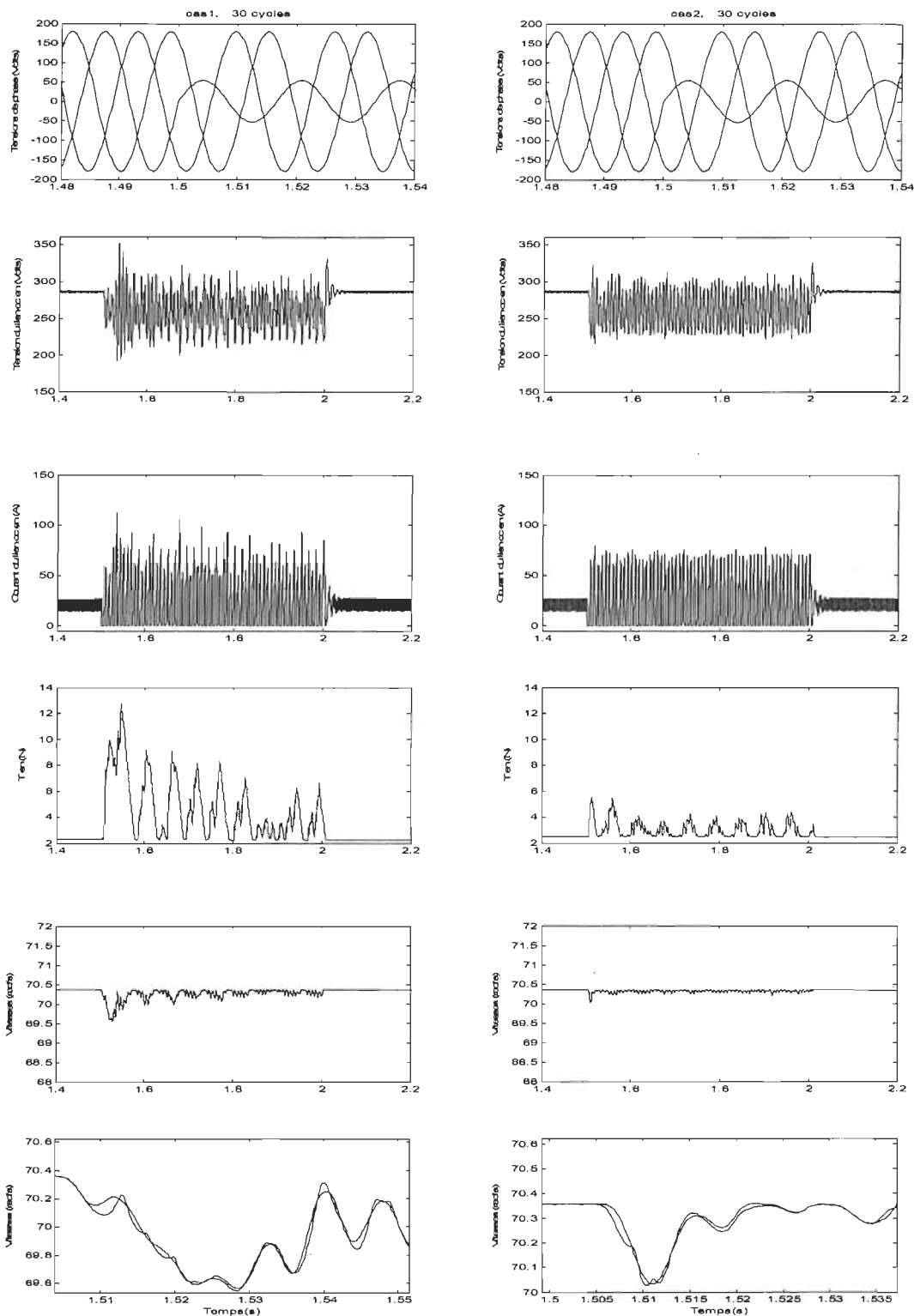


Figure B.19 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 70% de creux de tension de type B durant 30 cycles.

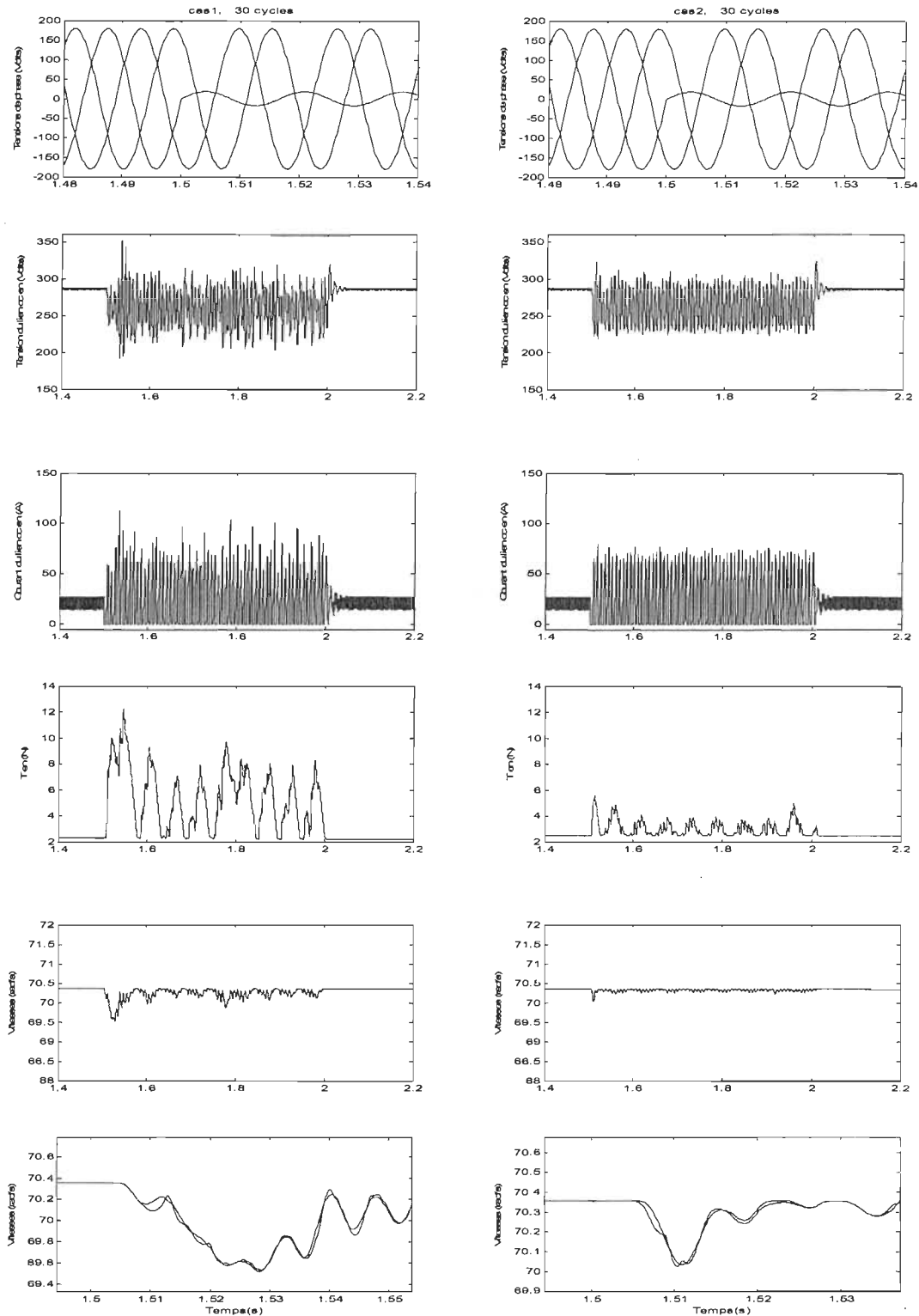


Figure B.20 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence de 90% de creux de tension de type B durant 30 cycles.

ANNEXE C

Résultats de simulation d'un système d'EVV couplés en présence de creux de tension de type C.

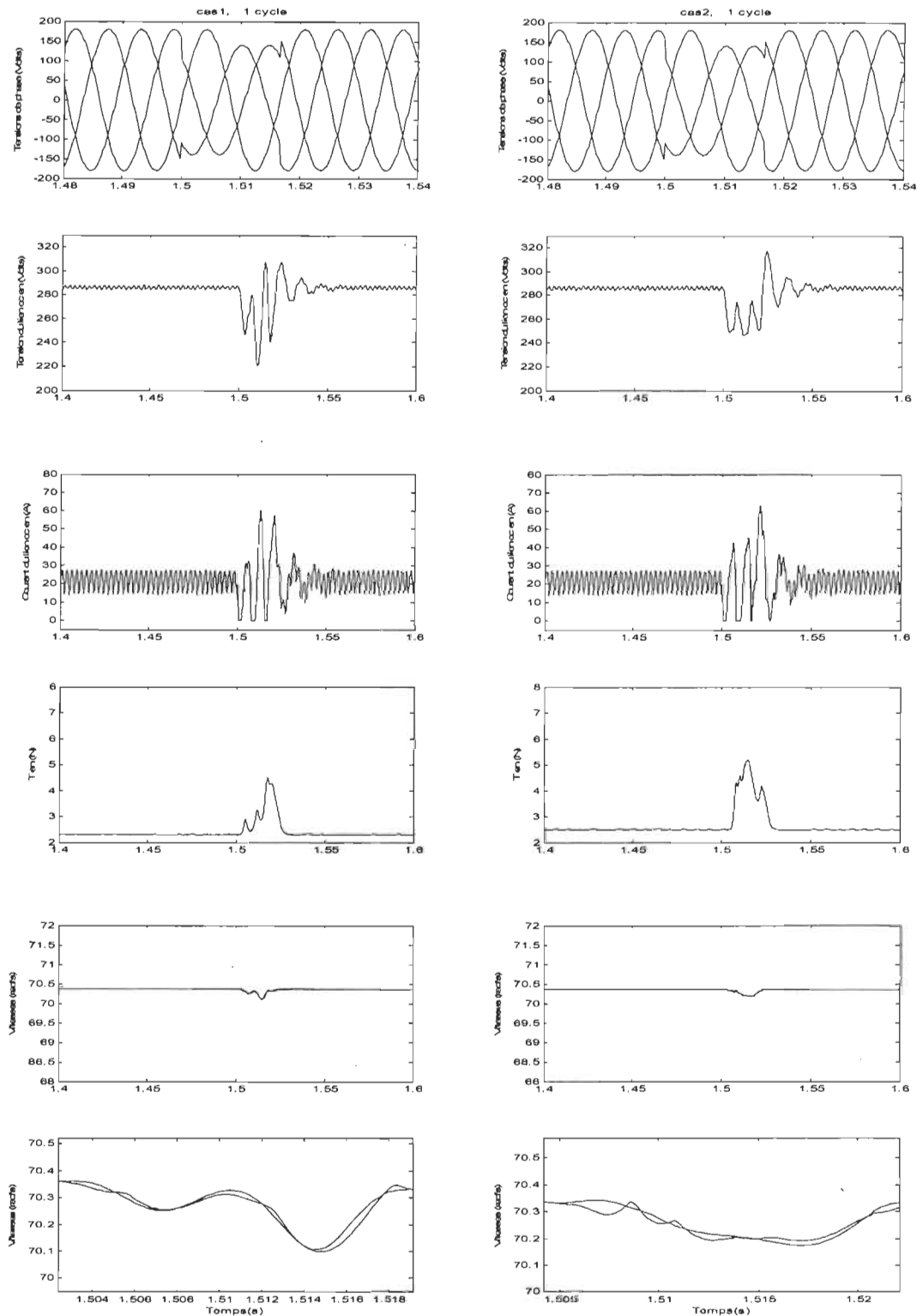


Figure C.1 Résultats de simulation pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase de 10° de creux de tension de type C durant 1cycle.

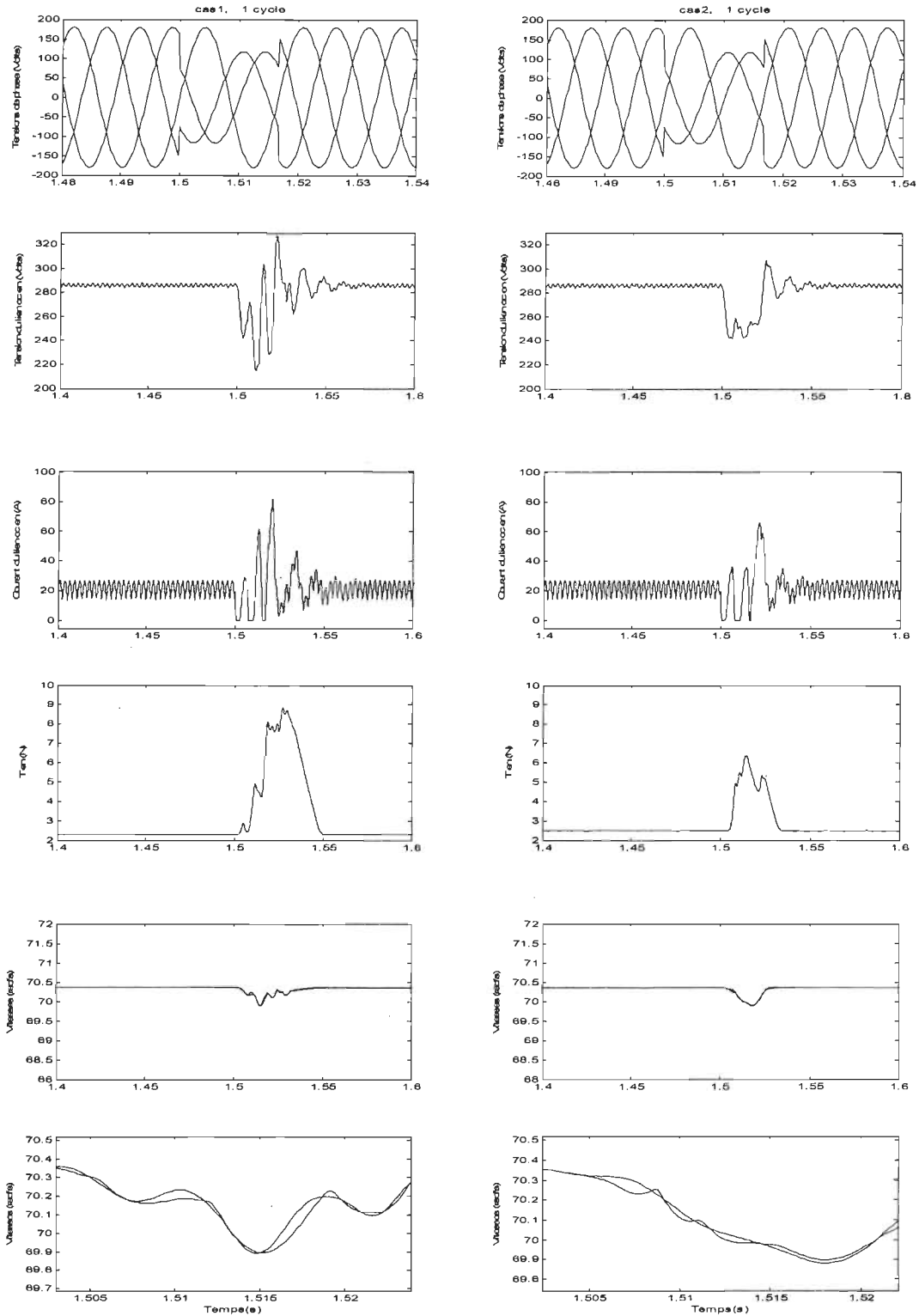


Figure C.2 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase de 20° de creux de tension de type C durant 1cycle.

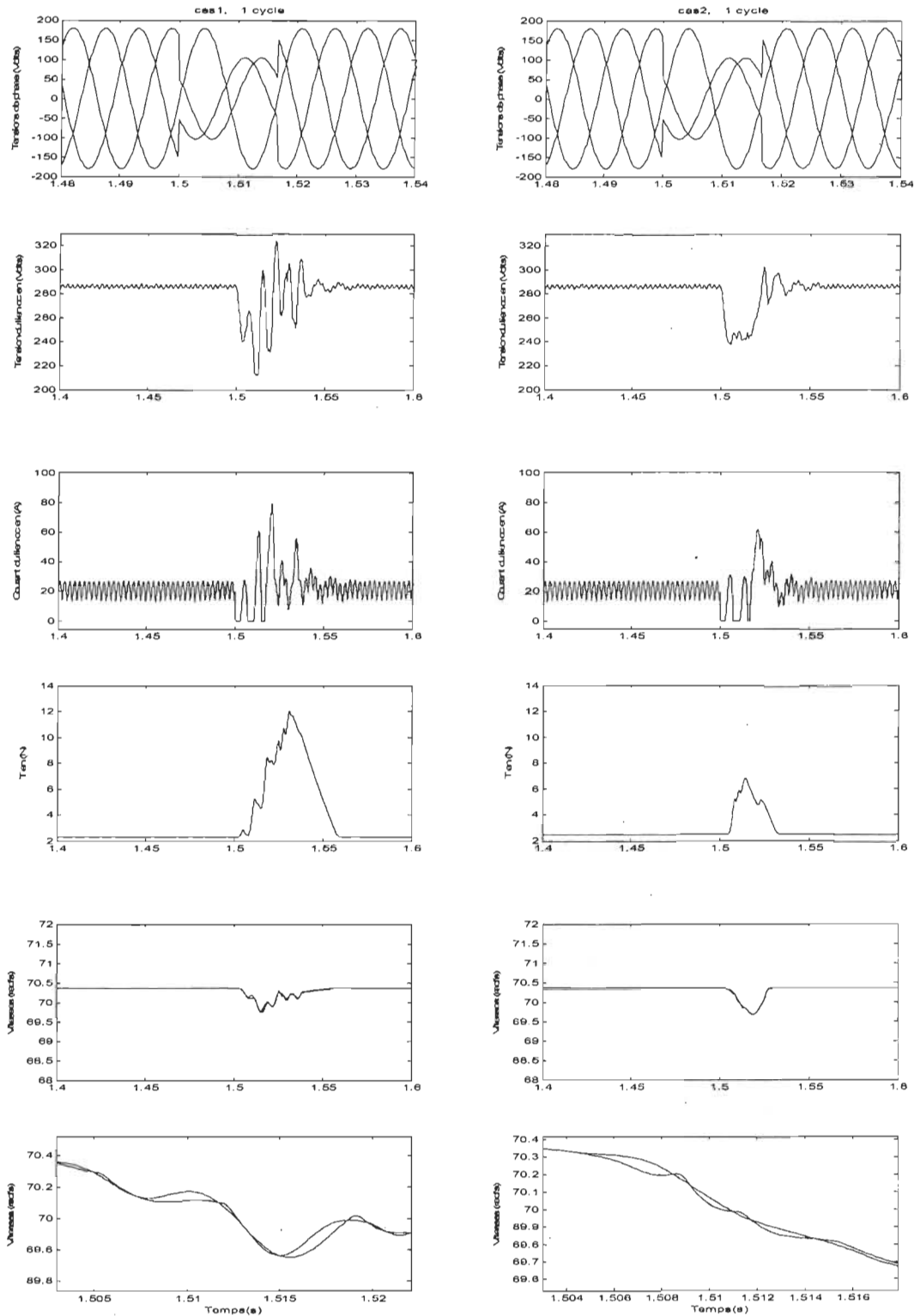


Figure C.3 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 1 cycle.

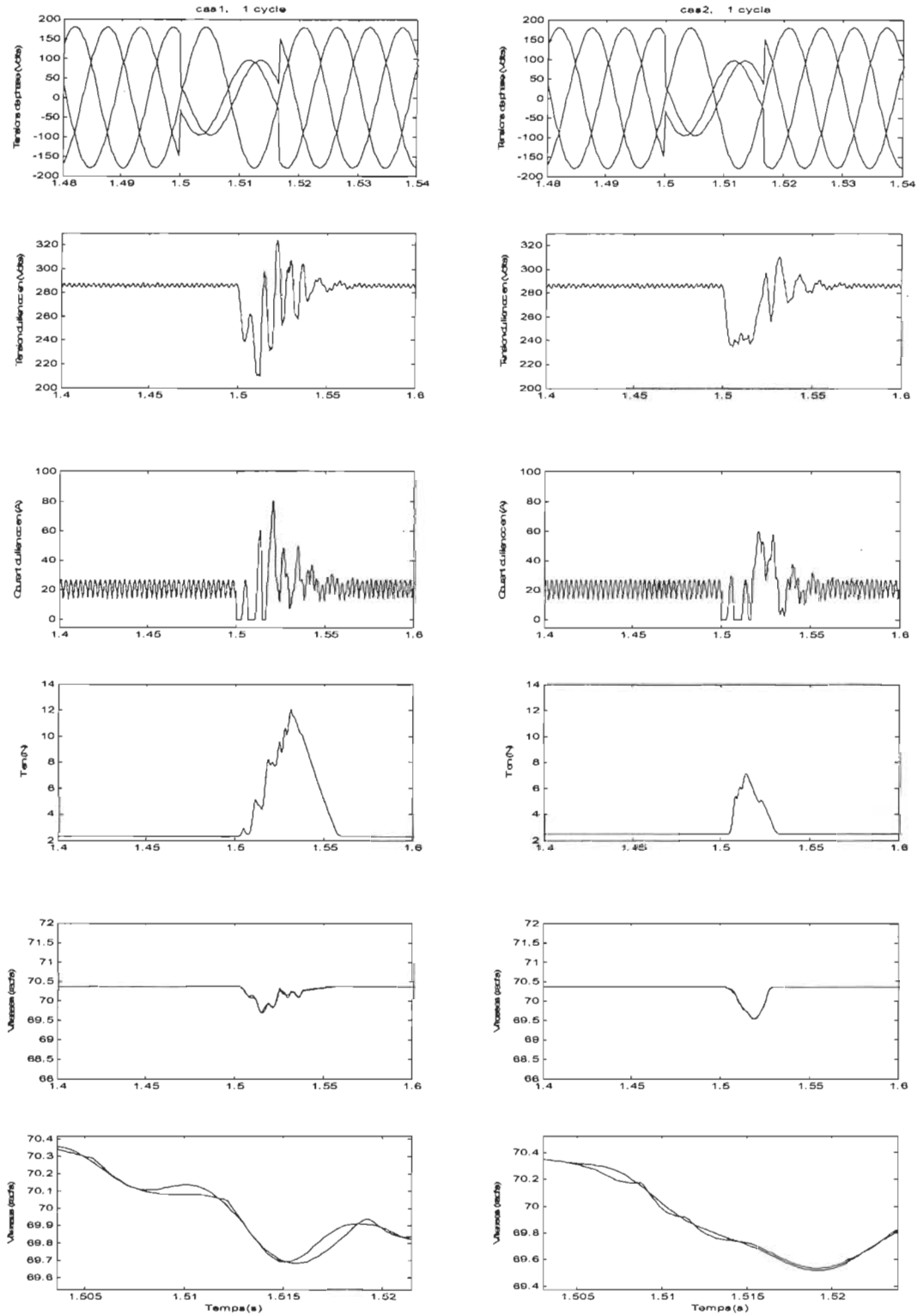


Figure C.4 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 1 cycle.

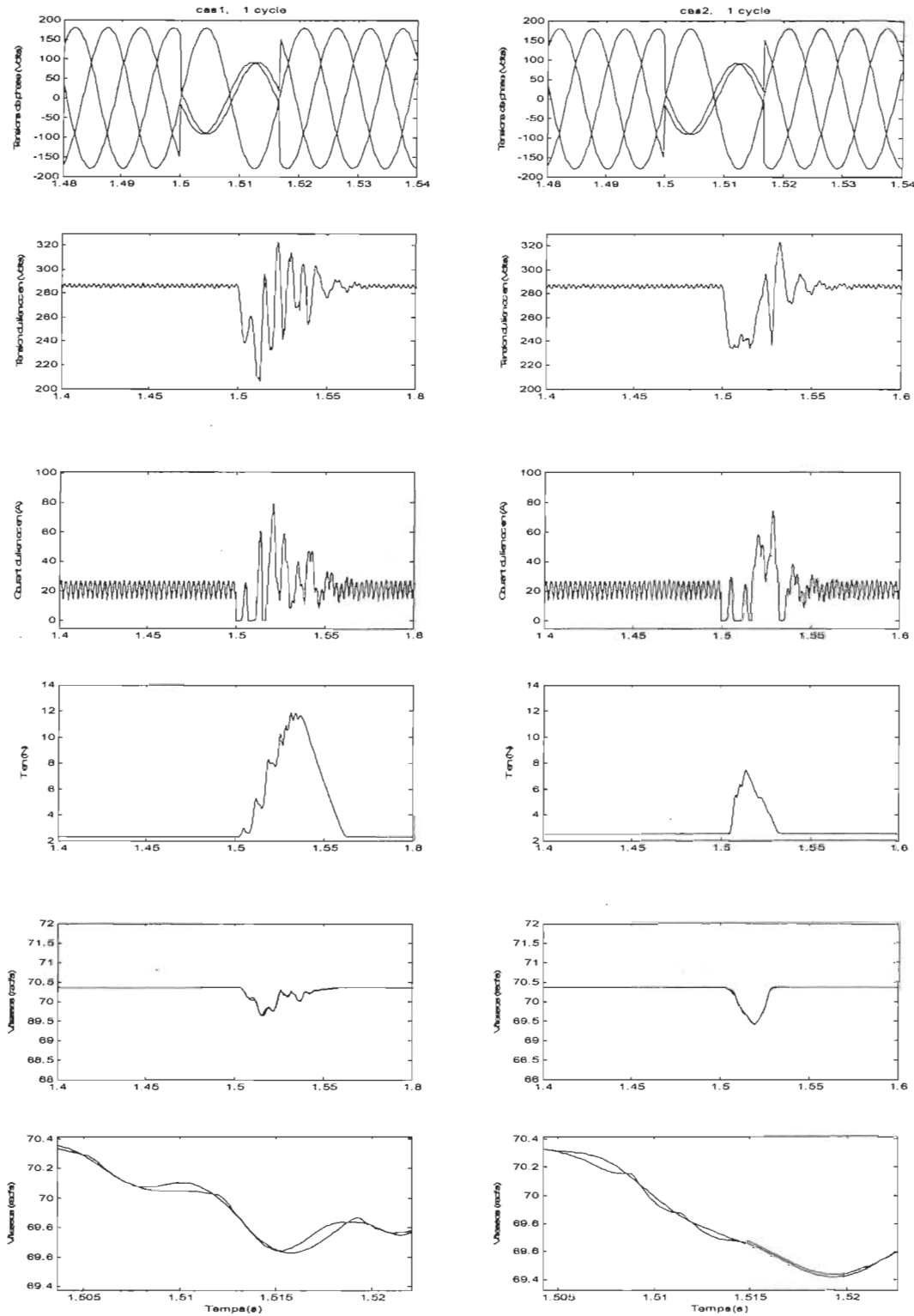


Figure C.5 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 1 cycle.

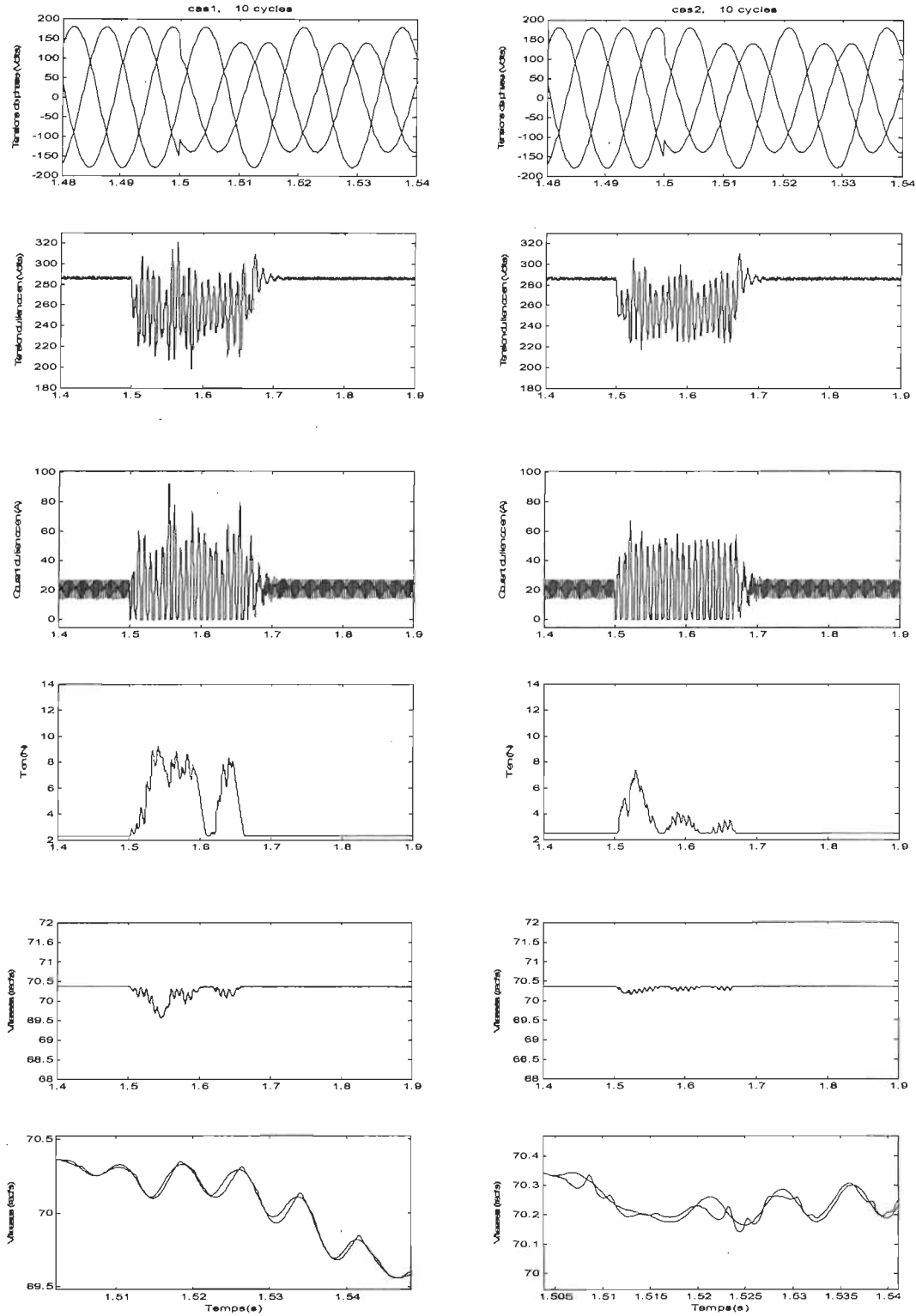


Figure C.6 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 10° de creux de tension de type C durant 10 cycles.

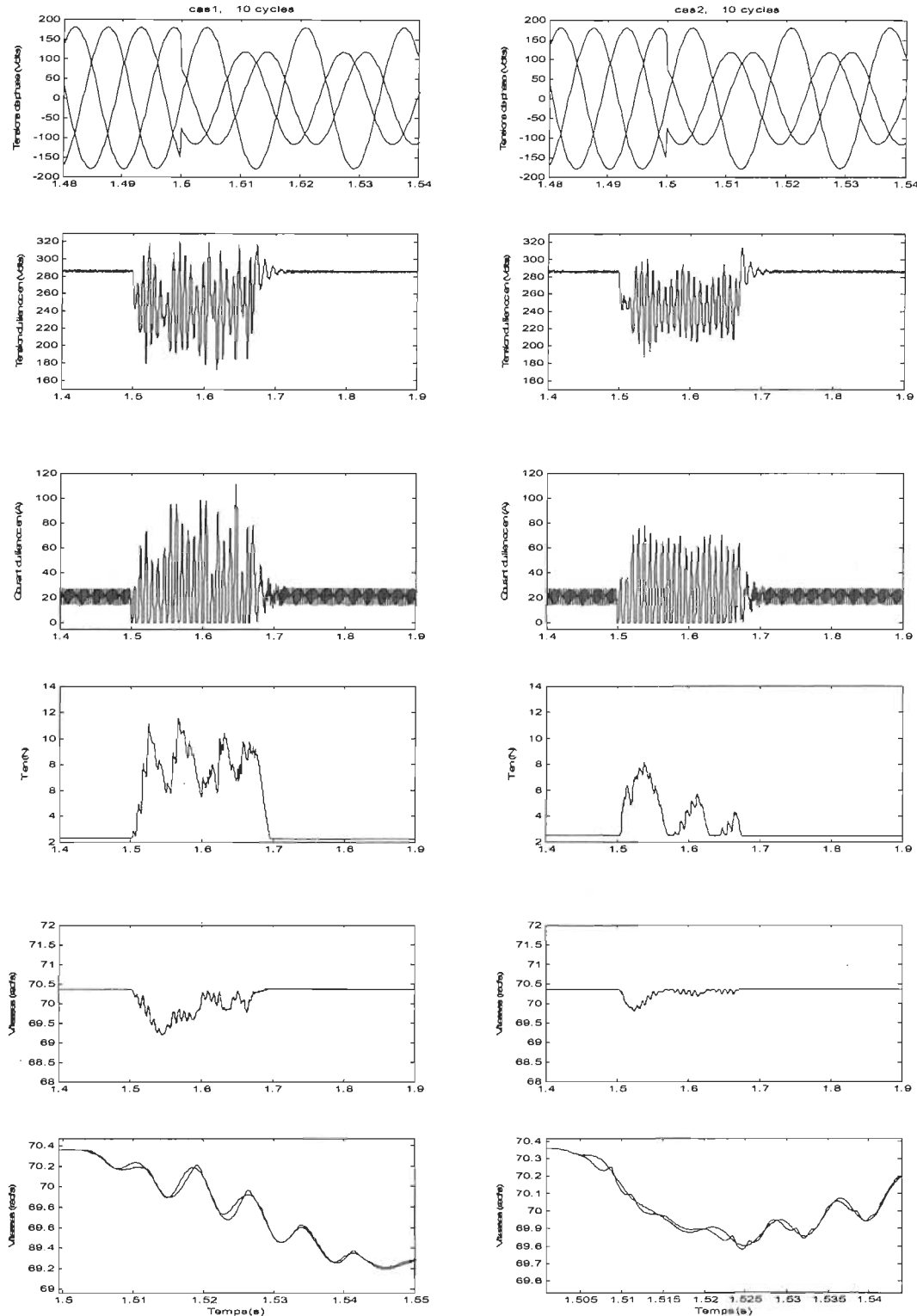


Figure C.7 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 20° de creux de tension de type C durant 10 cycles.

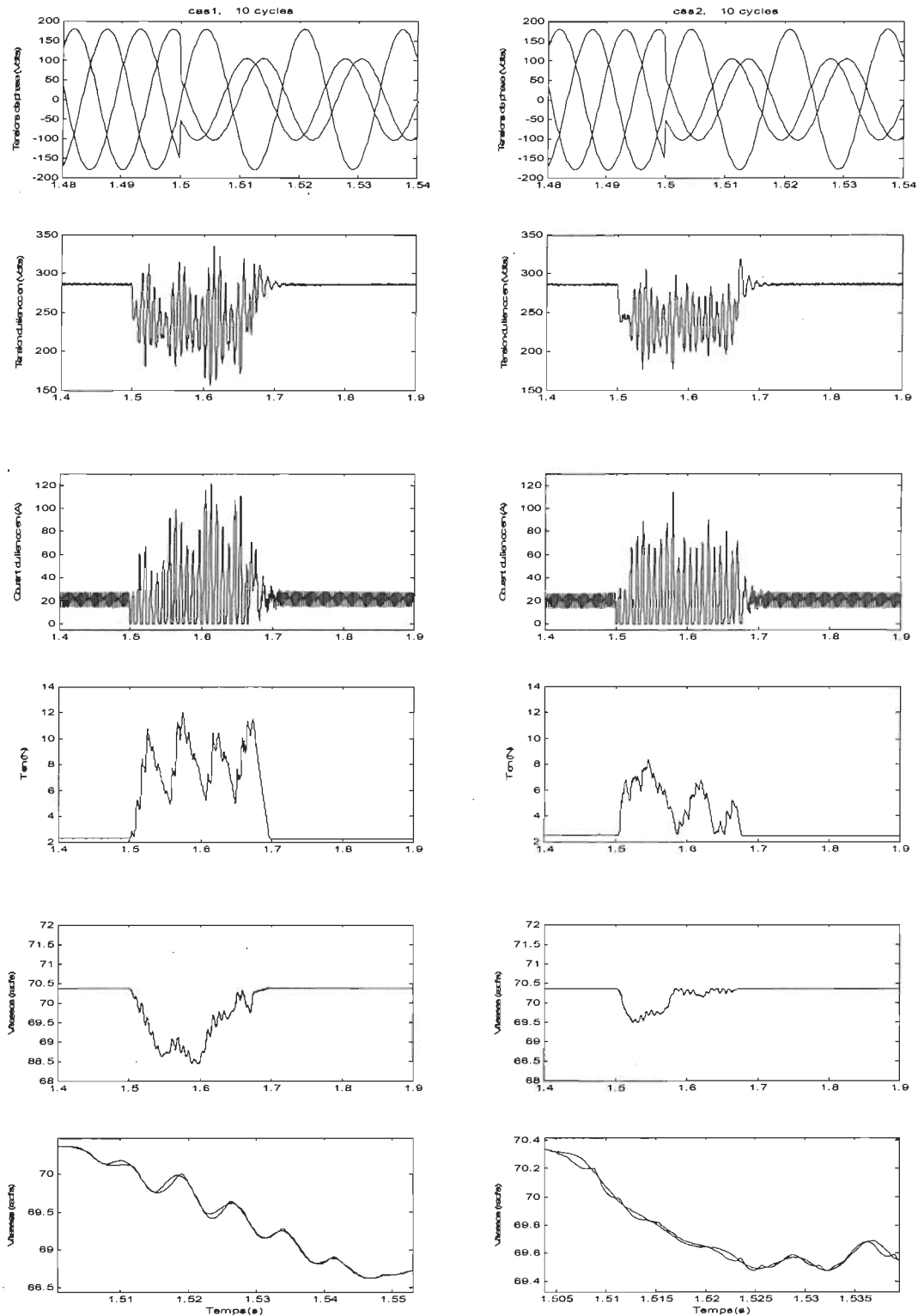


Figure C.8 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 10 cycles.

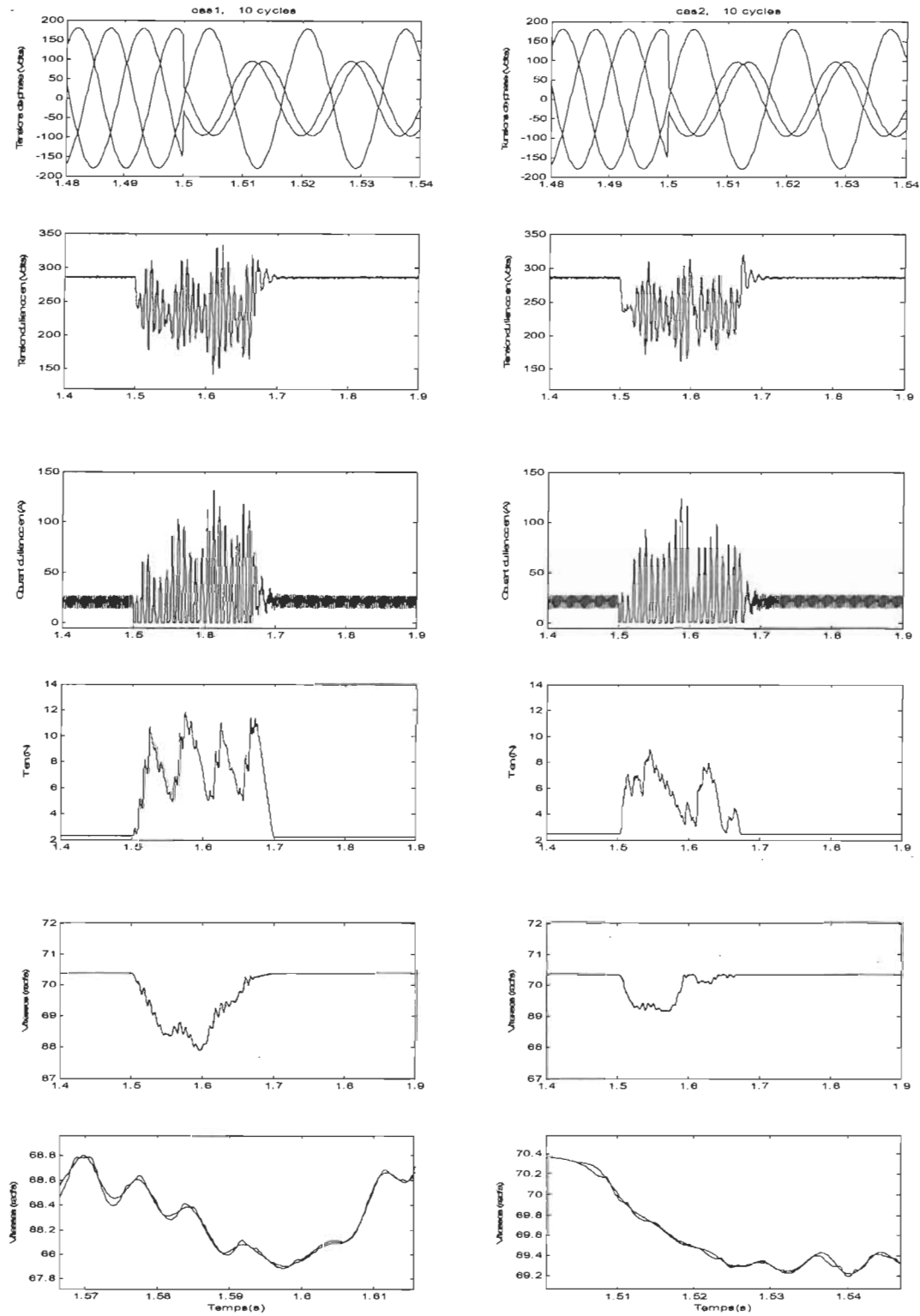


Figure C.9 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 10 cycles.

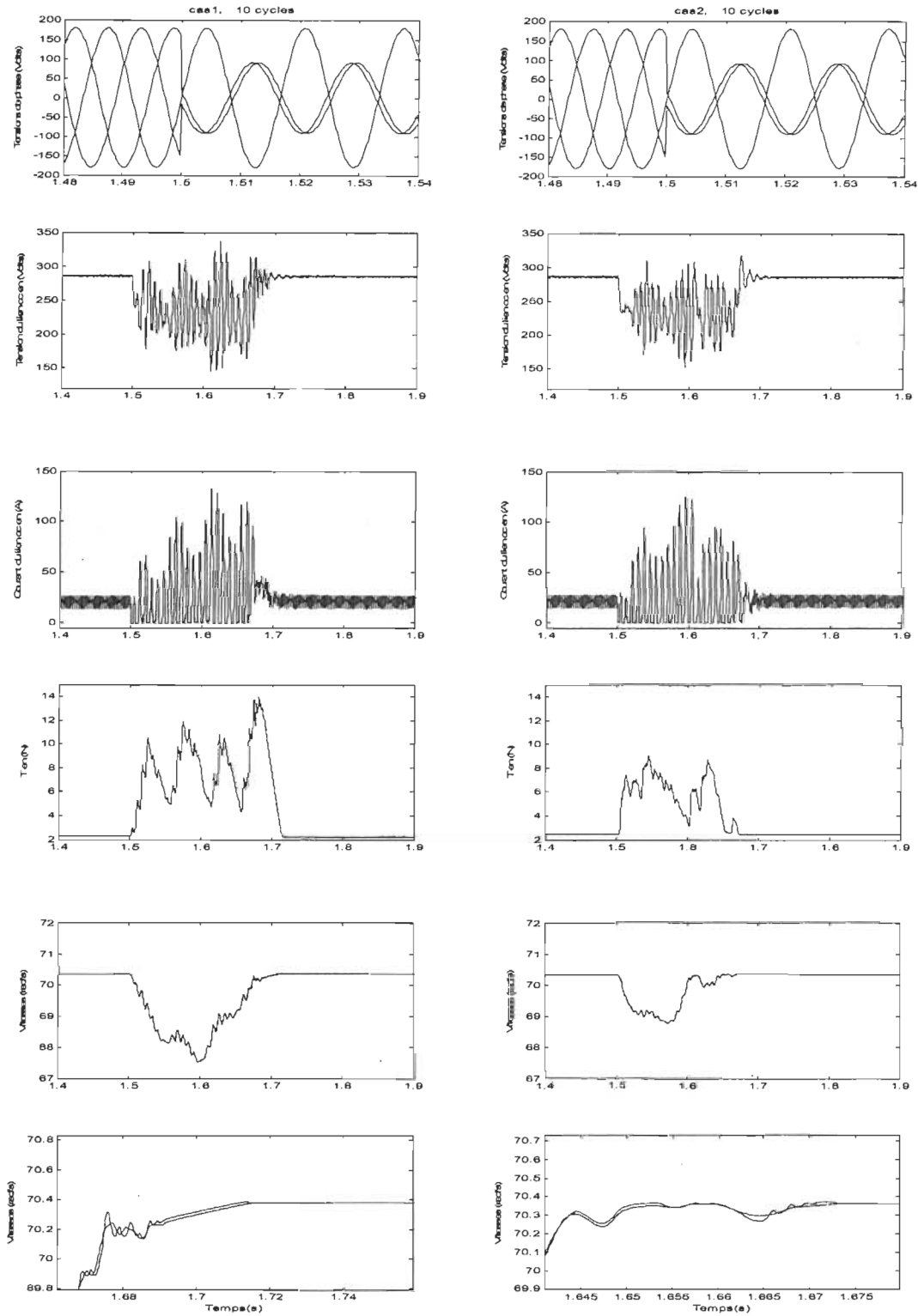


Figure C.10 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 10 cycles.

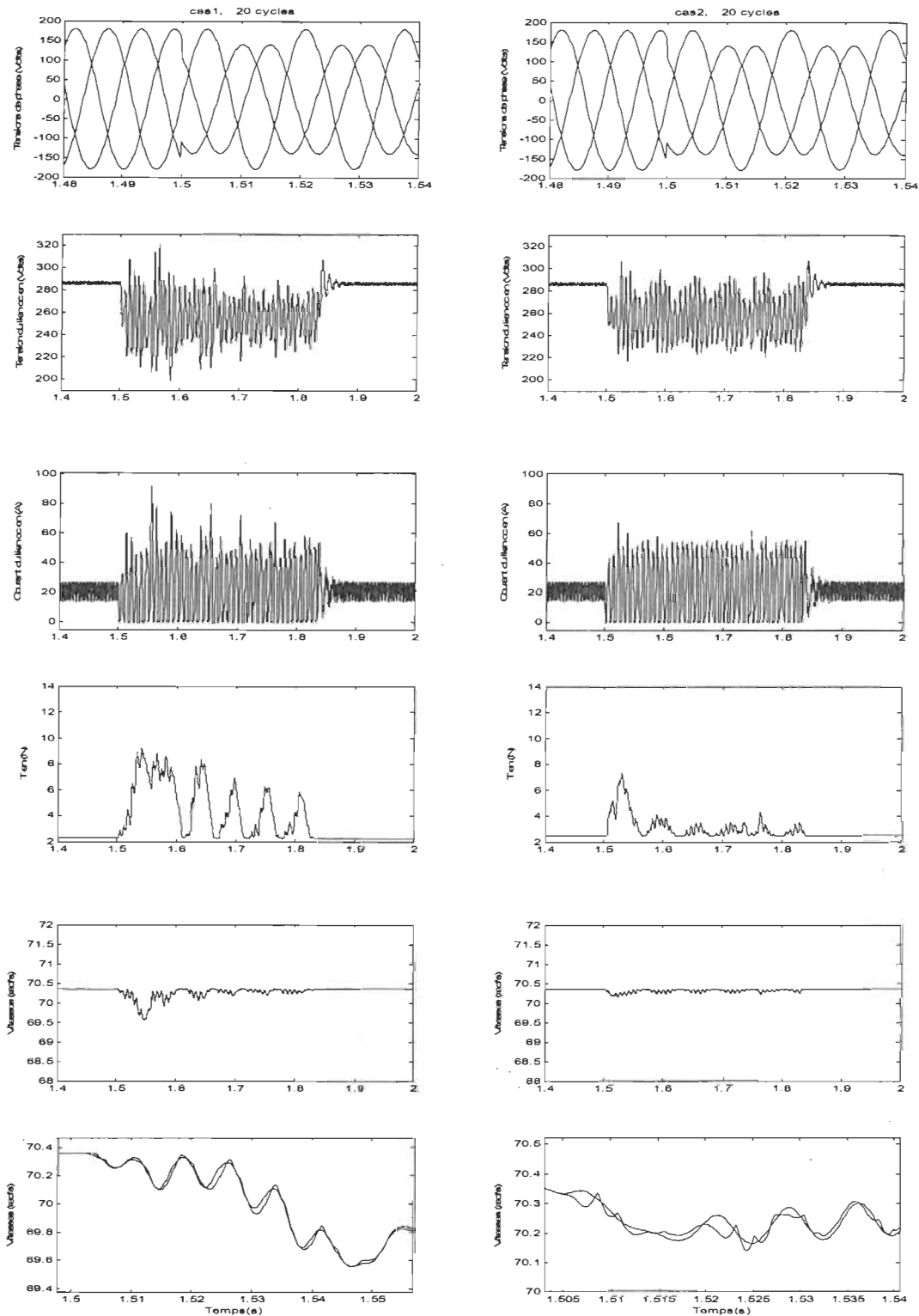


Figure C.11 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 10° de creux de tension de type C durant 20 cycles.

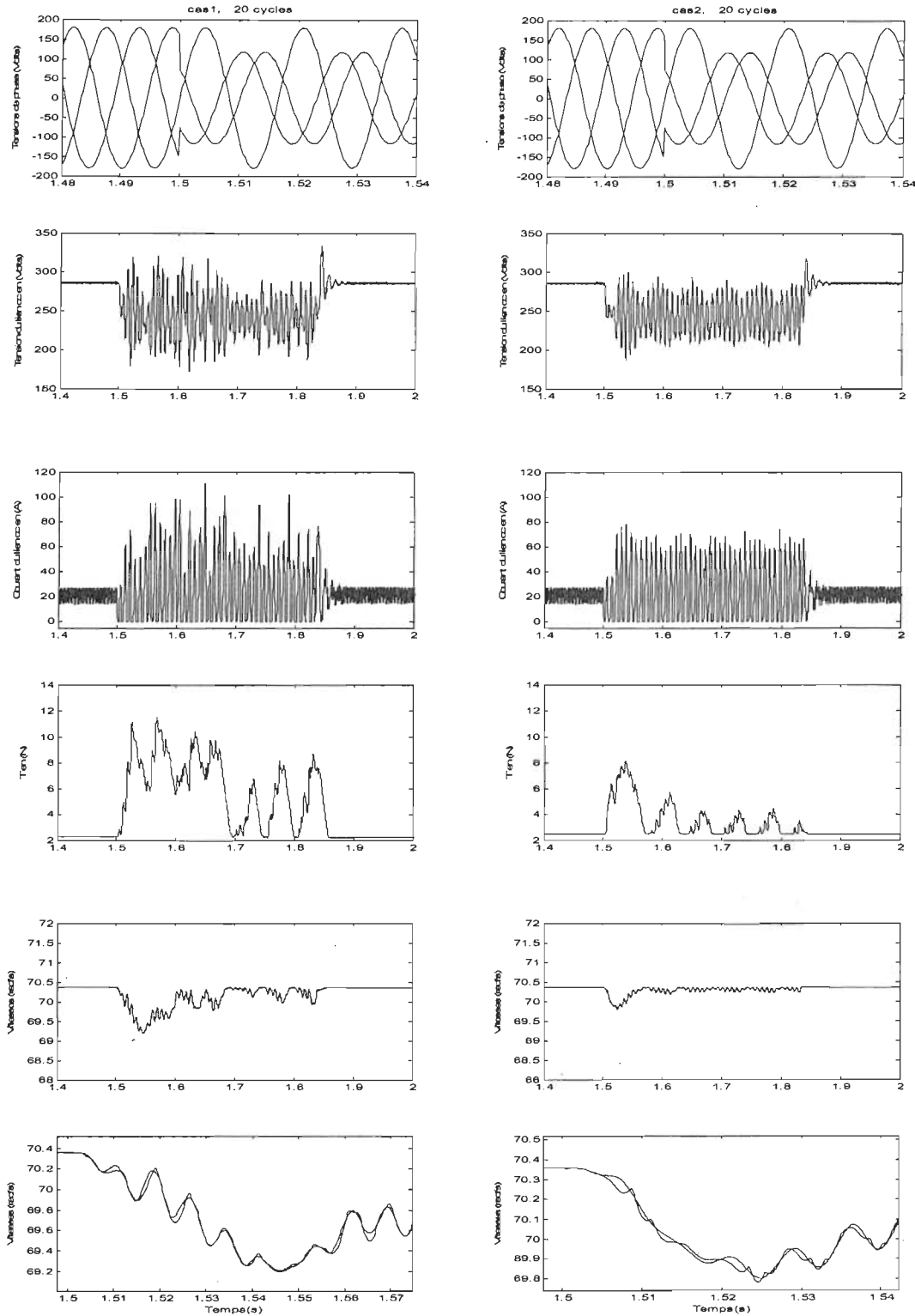


Figure C.12 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 20° de creux de tension de type C durant 20 cycles.

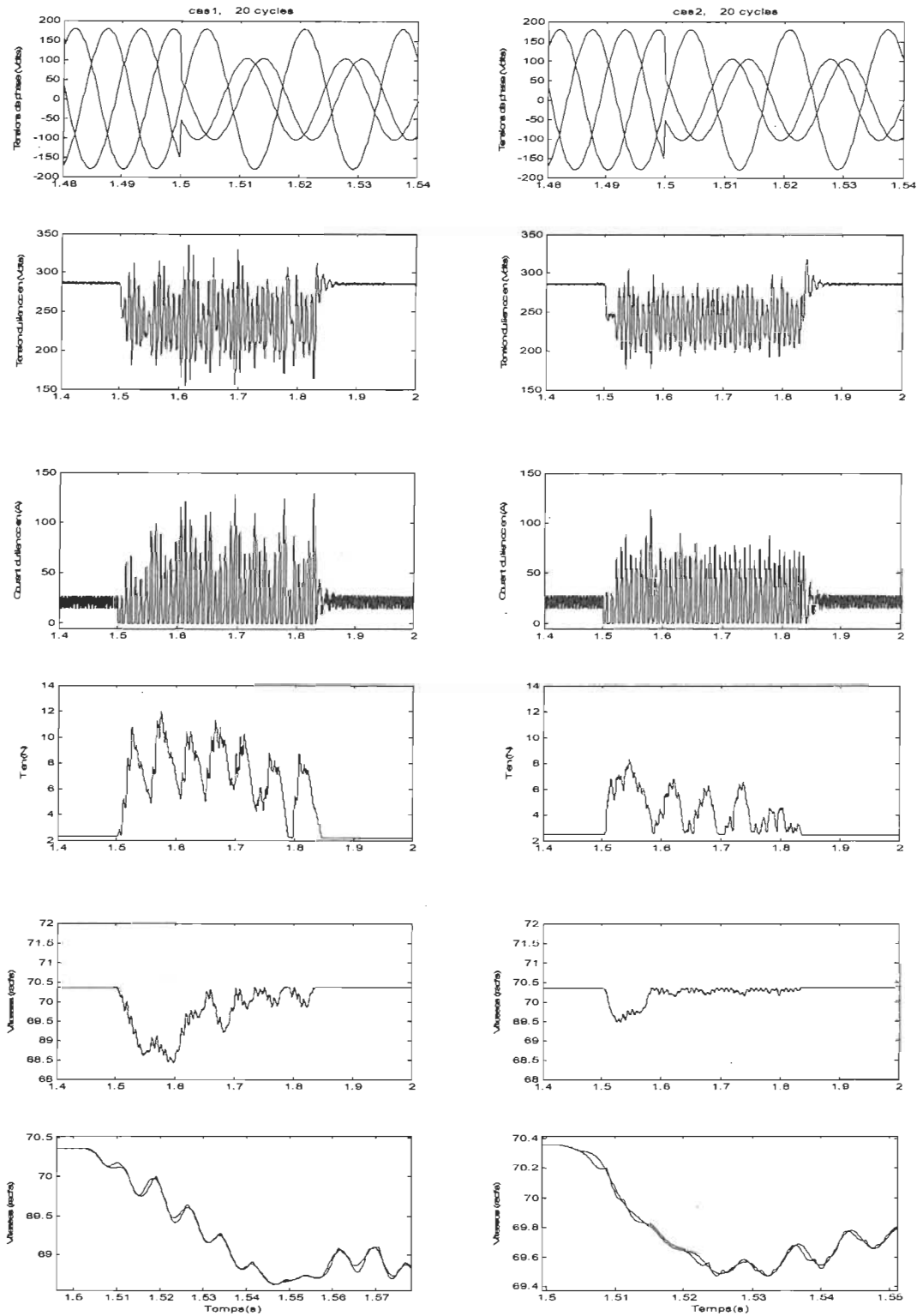


Figure C.13 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 20 cycles.

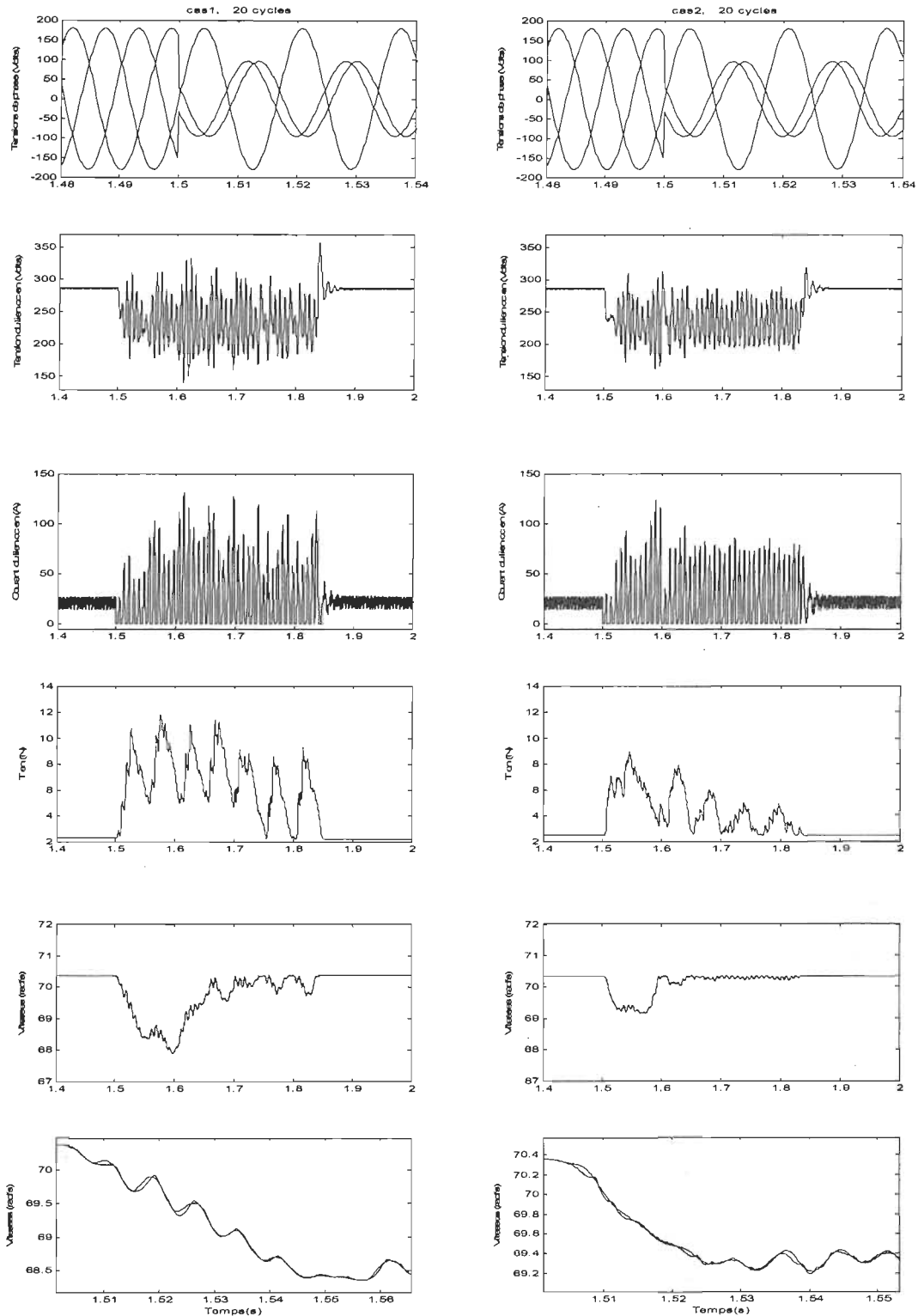


Figure C.14 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 20 cycles.

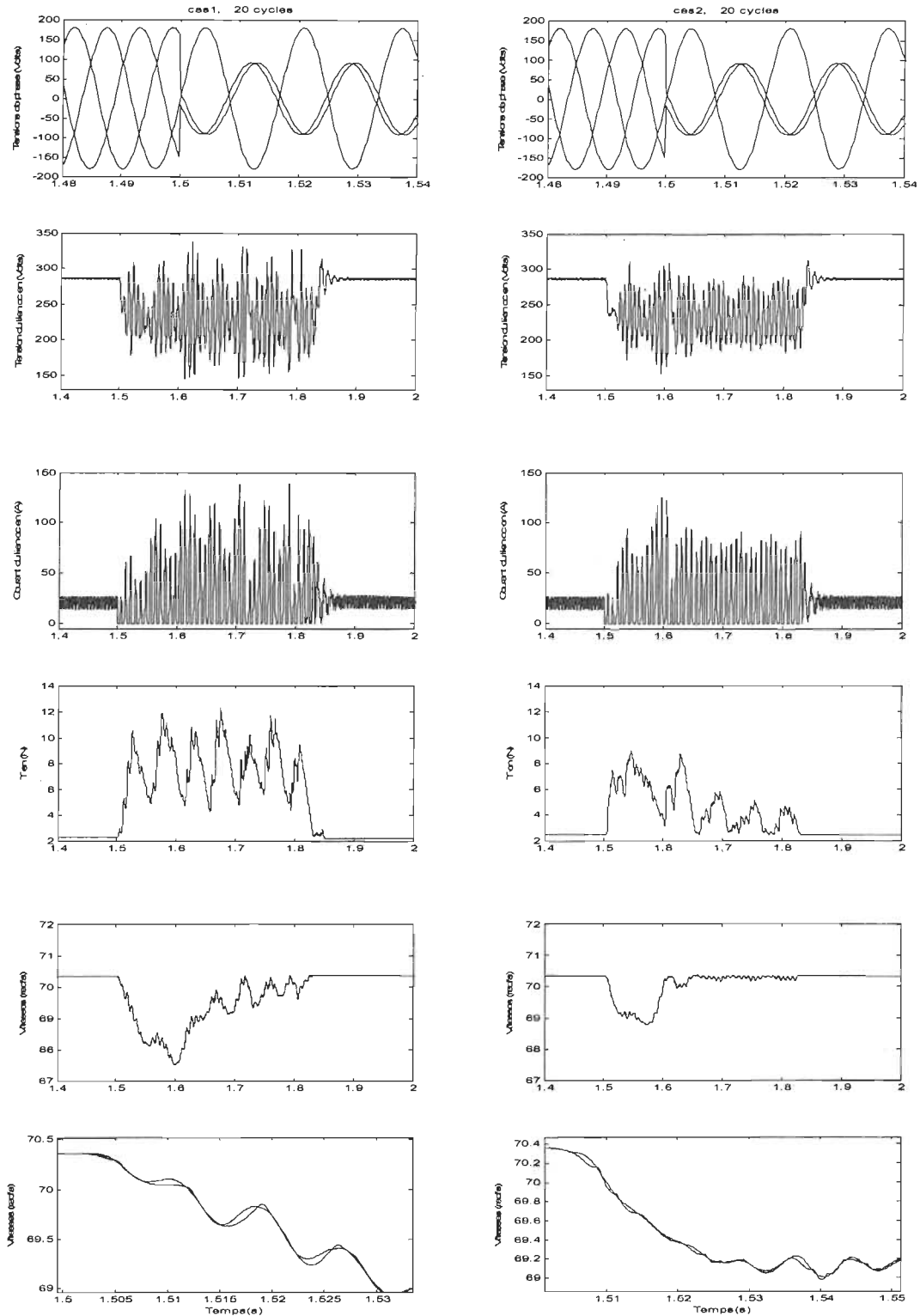


Figure C.15 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 20 cycles.

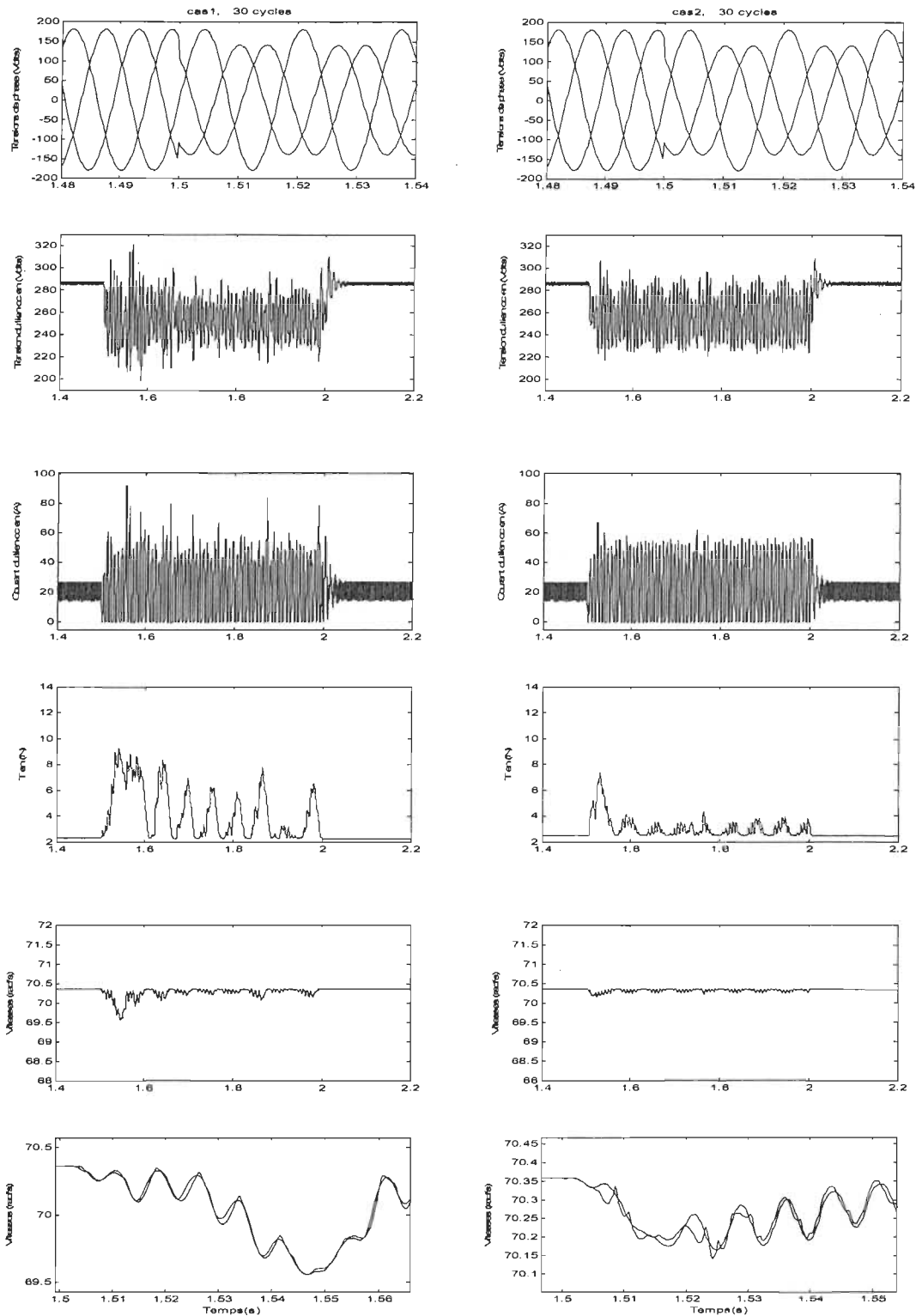


Figure C.16 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 10° de creux de tension de type C durant 30 cycles.

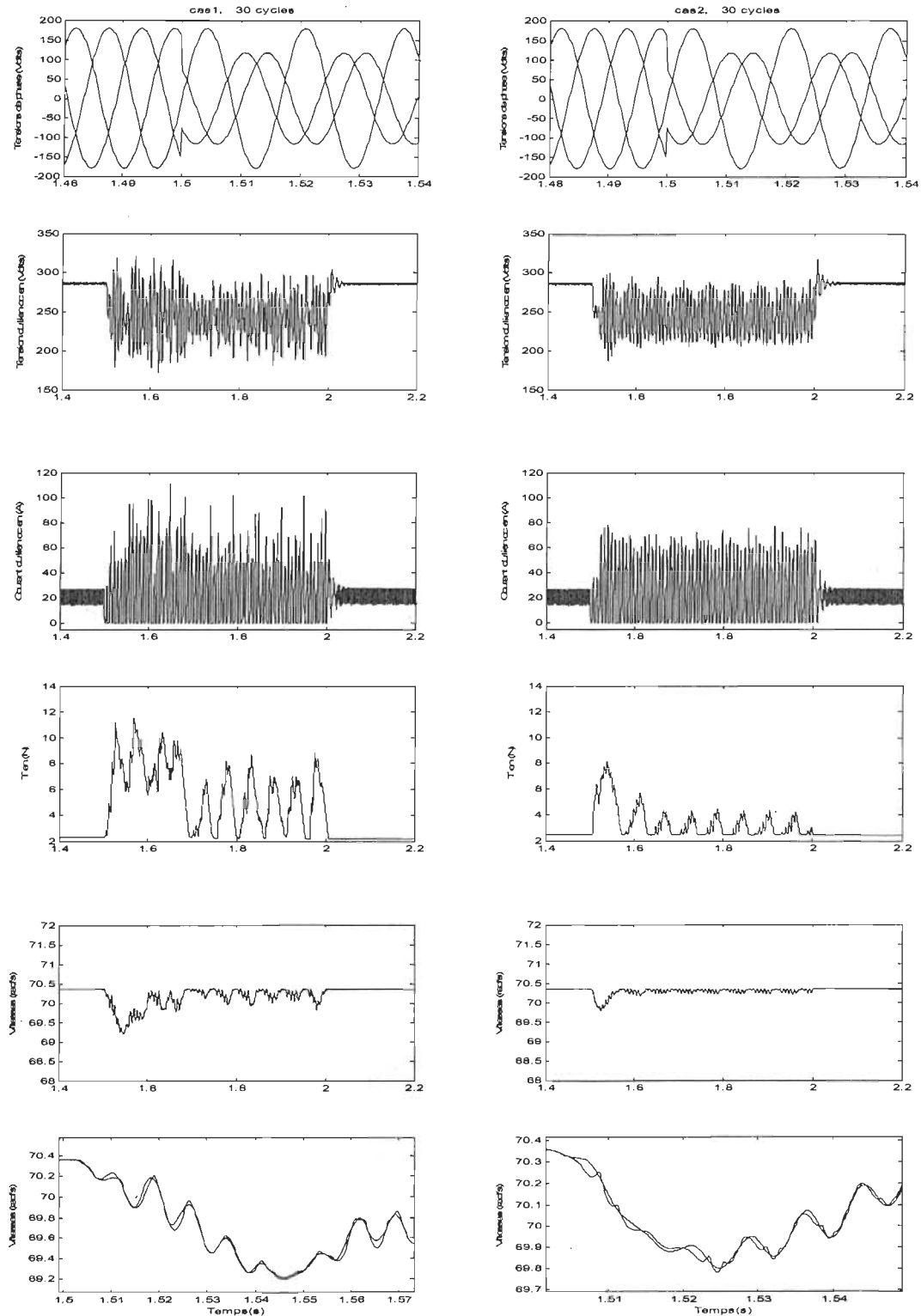


Figure C.17 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 20° de creux de tension de type C durant 30 cycles.

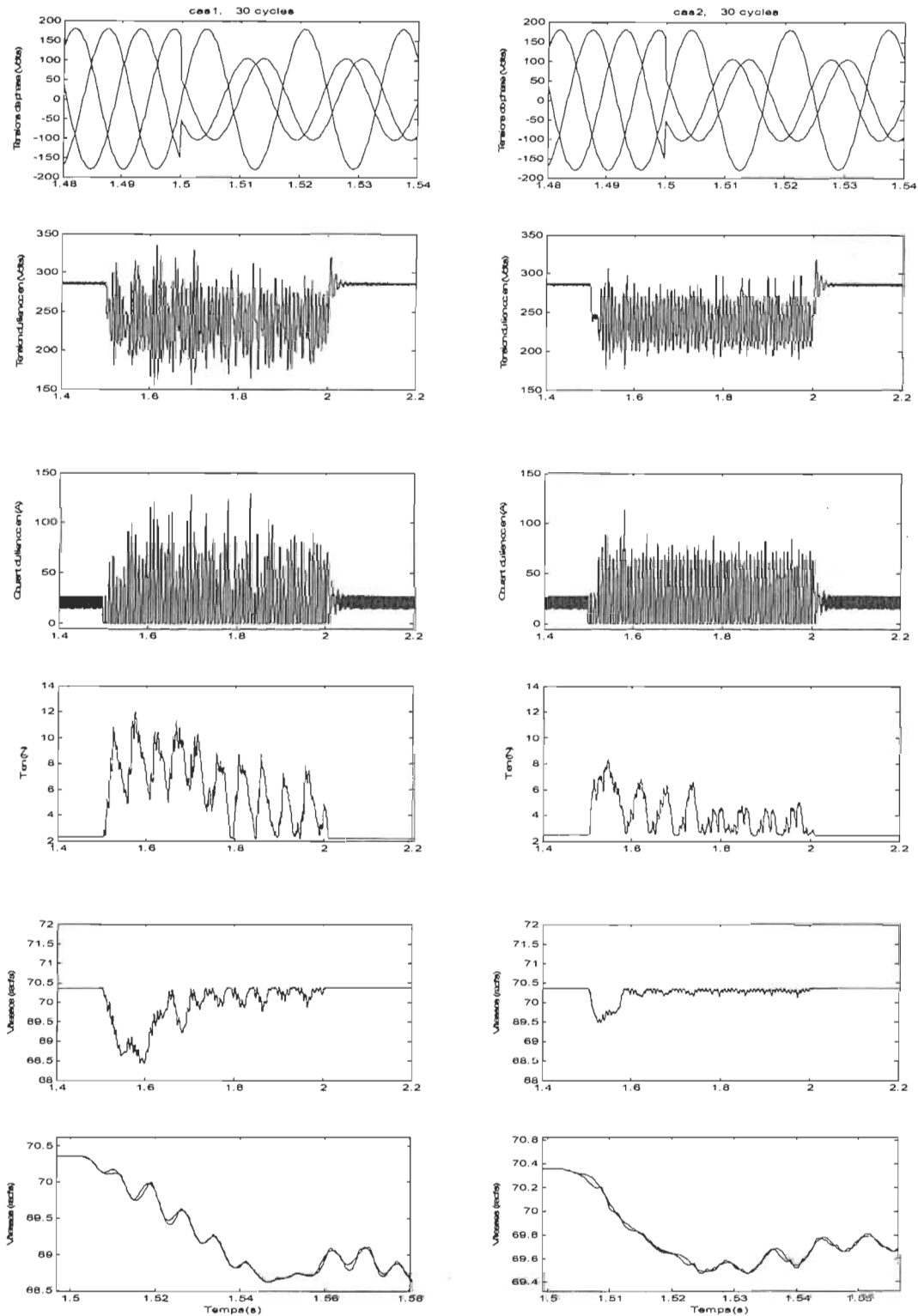


Figure C.18 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 30° de creux de tension de type C durant 30 cycles.

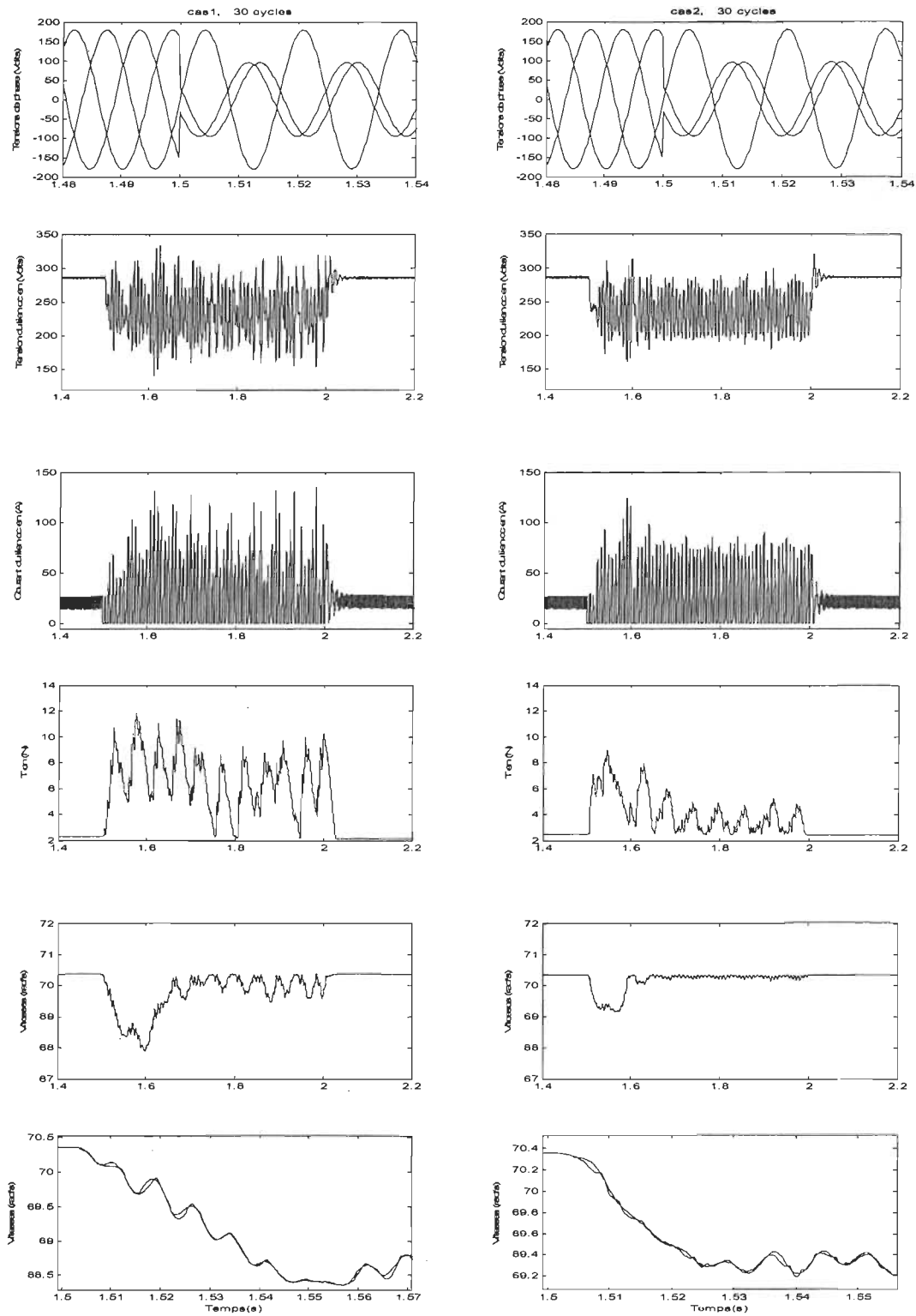


Figure C.19 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 40° de creux de tension de type C durant 30 cycles.

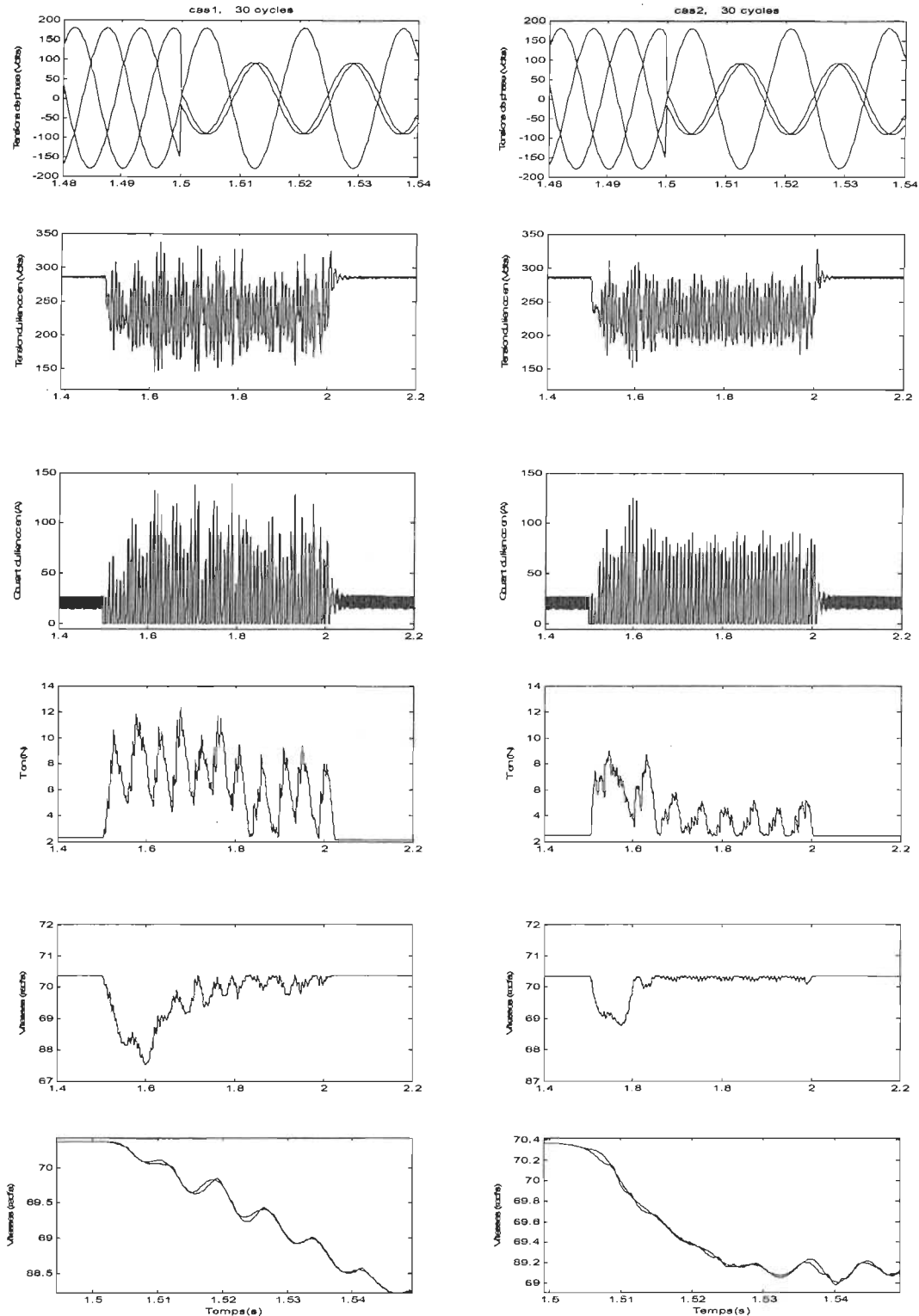


Figure C.20 Résultats de simulations pour un système d'EVV couplés en présence d'un saut de phase 50° de creux de tension de type C durant 30 cycles.

ANNEXE D

PARAMÈTRES DE SIMULATION

D.1. Paramètres du moteur pour un système d'EVV simple.

Moteur : 3 HP 60 Hz 1725 rpm, $V_{nom} = 220$ Vrms, $P_{nom} = 2238$ VA, $R_s = 0.435\Omega$, $L_s = 4$ mH,

$R_r = 0.228 \Omega$, $L_r = 0.8$ mH, $L_m = 34.7$ mH, $F_v = 0.02$ N.m.s, $pp = 2$

L'inertie et le couple de charge sont présentés dans le tableau I

Impédance de ligne : $R_L = 0.01 \Omega$ et $L_L = 1$ mH.

Lien cc: $L = 200 \mu\text{H}$ et $C = 1650 \mu\text{F}$.

Contrôleur de vitesse: $K_p = 13$ et $K_i = 26$.

Limite de couple = 300 Nm.

Vitesse de référence : 70 rad/s.

D.2. Paramètres du moteur pour un système d'EVV couplés.

Moteurs 1 et 2: 3 HP 60 Hz 1725 rpm, $V_{nom} = 220$ Vrms, $P_{nom} = 2238$ VA, $R_s = 0.435\Omega$,

$L_s = 4$ mH, $R_r = 0.228 \Omega$, $L_r = 0.8$ mH, $L_m = 34.7$ mH, $F_{v1} = F_{v2} = 0.02$ N.m.s, $pp = 2$

Les inerties sont spécifiées dans le tableau II.

Impédance de ligne: $R_L = 0.01 \Omega$ et $L_L = 1$ mH.

Lien cc: $L = 200 \mu\text{H}$ et $C = 1650 \mu\text{F}$.

Matériau : $S_0 = 2e-3 \text{ m}^2$, $L = 2$ m, $E = 0.2e9 \text{ N/m}^2$ et $r_1 = r_2 = 0.1$ m.

Gain du contrôleur de vitesse: $K_p = 695$ et $K_i = 50$.

Gain du contrôleur de tension: $K_p = 695$ et $K_i = 50$. (les deux contrôleurs sont identiques)

Gain $K_d = 15350$.

Couple limite = 300 Nm

Signaux de référence: 70 rad/s pour le vitesse et 2.5 N pour la tension.

D.3. Équations mathématiques de la commande à orientation de flux.

$$I_d^* = \frac{Phir^*}{Lm}, \quad Iq^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{pp} \cdot \frac{Lr}{Lm} \cdot \frac{Te^*}{Phir^*}, \quad Phir = \frac{Lm \cdot Id}{1 + Tr \cdot s}$$

$$\theta_e = \text{Angle électrique} = \int_{-\infty}^t (w_r + w_m)$$

Avec:

$$w_r = \text{Vitesse angulaire rotorique (rad/s)} = \frac{Lm \cdot Iq}{Tr \cdot phir}, \quad Tr = \frac{Lr}{Rr}$$

$w_m = \text{Vitesse angulaire mécanique (rad/s)}$.

ANNEXE E

CARACTÉRISTIQUES DES OUTILS RT-LAB ET ARTEMIS

RT-LABTM est un outil de prototypage rapide qui permet de passer automatiquement et facilement du design en schéma-bloc à l'implantation en temps réel, qui présente les caractéristiques suivantes :

- Compatible avec SimulinkTM;
- Pas de programmation requise (RTW);
- Permet la distribution des modèles complexes sur un réseau de PC commerciaux;
- Supporte les systèmes à plusieurs pas de calcul (Multi-taux);
- Offre plusieurs entrées/sorties (ISA, PCI, VME. PC104);
- Roule sur : QNX, Neutrino et Windows NT
- Les fichiers compilés sont exécutés par un groupe de PC et/ou avec un système incorporant des entrées/sorties connectées par des liaisons de communication IEEE 1394 (FireWire).

Cette architecture est en particulier consacrée à la simulation parallèle de modèles complexes requérant des petits pas de calcul et des contraintes de communication serrées. C'est le cas des systèmes électriques munis de convertisseurs de puissance comme celui de notre étude. Le schéma bloc du système est représenté à la figure E.1.

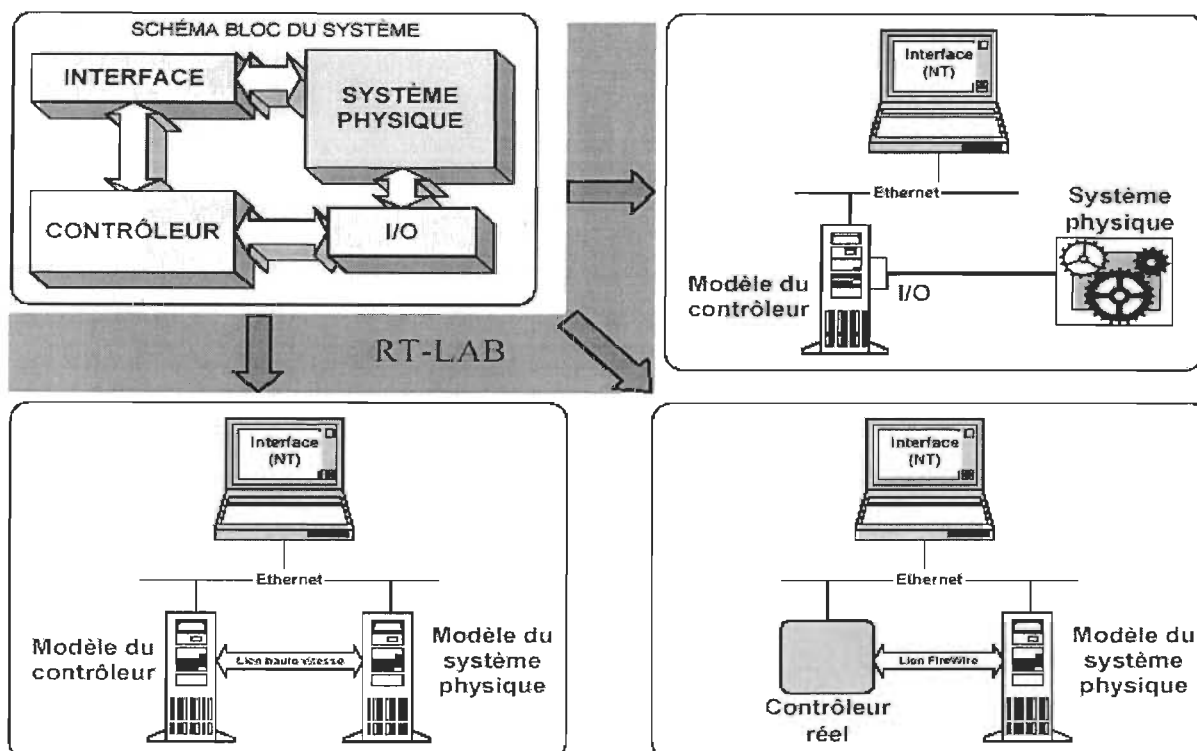


Figure E.1 Schéma bloc du système. [Opal]

ARTEMISTM est un outil qui permet l'exécution des modèles de PSB en temps réel avec les caractéristiques suivantes :

- Méthode d'intégration à pas fixe fortement stable;
- Découplage des systèmes électriques;
- Pré-calcul ou calcul dynamique avec stockage partiel des matrices d'état correspondant à la topologie du circuit;
- Compensation d'événements discrets dans le modèle à temps-discret de la partie linéaire du système.

ARTEMISTM présente les avantages suivants :

- Simulation rapide et possibilité de temps réel lorsque le nombre d'interrupteurs n'est pas trop élevé (par exemple : un pont triphasé);

- Précision;
- Stabilité;
- Exécution sur un ou plusieurs PC;
- Compatibilité avec RT-LAB.

RT-LAB et ARTEMIS présentent les caractéristiques suivantes :

- Simulateur personnel temps réel « Desktop Real-Time Simulator »;
- Ne remplace pas les simulateurs sophistiqués tels que les simulateurs de réseaux comme celui d'Hydro-Québec;
- Idéal pour la simulation et le prototypage rapide des systèmes industriels (Hardware-In-the-Loop, Rapid Control Prototyping) tels que : entraînement de machines, FACTS, PFC, simulateurs de véhicules, d'avion, ...
- Interface avec Test Manager : outil de gestion, d'exécution et de documentation automatique de simulations séquentielles et simultanées.