

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE POUR L'OBTENTION D'UN DIPLÔME DE MAÎTRE ES
SCIENCES APPLIQUÉES EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

PAR
ERIC LE COURTOIS

ÉTUDE ET SIMULATION DES PERTURBATIONS DANS UN RÉSEAU DE
DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE ; CONCEPTION D'UN BANC D'ESSAI ET MISE AU POINT
DE DEUX SYSTÈMES D'ACQUISITION

OCTOBRE 1996

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

La qualité de l'énergie électrique prend de plus en plus d'importance. La création d'un banc d'essai et d'un simulateur de réseaux de distribution sous MATLAB/ SIMULINK servira à étudier les perturbations sur un réseau de distribution électrique afin de mieux cerner l'origine, les causes et les effets des phénomènes perturbateurs. Il sera ainsi possible de mieux caractériser les perturbations présentes et leur propagation à travers le réseau de distribution. Ceci est important dans le but de trouver des solutions pratiques aux problèmes soulevés dans le domaine de la distribution de l'énergie électrique.

La création d'un Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP") est caractérisée par l'utilisation de composants disponibles au sein de la Chaire de recherche industrielle Hydro-Québec/CRSNG (CPEE) du département de génie électrique. Il modélise un réseau de distribution de 25 kV avec un transformateur principal, une ligne de distribution de 30 km, deux transformateurs de distribution et deux groupes de charges. Le premier groupe de charges est composé d'une charge résistive et d'une charge inductive. Une batterie de condensateurs servira à compenser la puissance réactive; il est possible de la disjoncter dans le but de créer des perturbations dues à l'enclenchement et au déclenchement afin d'en analyser les effets. La seconde charge est une charge du type non linéaire injectant des harmoniques sur le réseau de distribution. Cette charge est modélisée par un redresseur triphasé à diodes débitant la puissance sur une charge résistive à travers une inductance de filtrage.

Afin de capter les phénomènes transitoires, deux systèmes d'acquisition de données ont été développés conjointement avec une société québécoise. Le premier système est une unité d'acquisition séquentielle à huit canaux d'acquisition. L'interface de commande de l'appareil et le programme de traitement des données a dû être réalisé. Le deuxième système d'acquisition a été conçu par modules de huit canaux. L'interface de commande du système étant fournie avec l'appareil, il fut cependant nécessaire de concevoir un logiciel de traitement des données. Ce logiciel a été créé sous la plate-forme MATLAB qui est bien adapté pour le traitement des nombres.

Par ailleurs, afin de valider les résultats et d'étudier des essais difficiles à réaliser à l'aide du banc d'essai, une librairie de composants modélisant les différents éléments d'un réseau de distribution a été développée sous l'environnement SIMULINK-MATLAB. Ce simulateur de réseau de distribution, appelé SIMUBEEP, permet de visualiser l'effet des perturbations sur un réseau de distribution typique. Il comprend les principaux éléments d'un réseau de distribution: des sources représentant soit un réseau de transmission ou un réseau de distribution; des transformateurs modélisés suivant plusieurs types de connexions; des lignes de distribution tenant compte de l'effet mutuel entre les lignes; des charges résistives, inductives et capacitives; des moteurs à courant continu et des convertisseurs à six et à douze pulsations utilisées comme charges non linéaires.

Remerciements

Un travail de l'ampleur d'une maîtrise ne s'exécute pas seul. Par chance, sur la route, des amitiés se créent, des liens se tissent, des personnes rencontrées deviennent des aides qui nous font continuer à avancer sans jamais arrêter. Ces personnes que j'ai rencontrées tout au long de ces deux ans et toutes celles qui étaient déjà là avant méritent les remerciements qui leur reviennent.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur et patron, M. Venkatachari Rajagopalan qui m'a supporté non seulement financièrement mais aussi moralement en me faisant comprendre que tout est possible quand on y met l'énergie nécessaire. J'aimerais remercier mon co-directeur, M. Ziwen Yao qui m'a tant appris de la théorie et sur qui j'ai toujours su compter. M. Jacques Poisson mérite, lui aussi, des remerciements pour ce temps passé à m'aider et à me fournir une référence pratique quand la pratique me manquait. À M. Michel Bélanger, qui m'a fourni, de ses connaissances pratiques, une aide incalculable et qui fut toujours là, quand j'en avais besoin. À mes professeurs : M. Ahmed Chériti et M. Pierre Sicard qui m'ont appris ce que je sais maintenant et qui m'ont fait voir que la connaissance est une richesse infinie, impossible à mesurer. À mes compagnons de route, mes amis, sans qui ces deux années auraient été beaucoup trop longues : M. Javad Sadr, M. Abdelkrim Meftah, M. Michel Houenagnon, M. David Brillon, M. André Charrette, Mlle. Dominique Patry, M. Hamid Maçbahi, M. Abdellfattah Ba-Razzouk, M. Ahmed Lakhsasi, M. Lamine Doumbia, M. Nicolas Léchevin, M. Miguel Bertoluchi, M. Jianhong Xu, Mlle Julie Lambert, M. Hugo Lavoie et M. Dorin Neascu. Sachez que vous avez mon entière reconnaissance et toute mon amitié.

Finalement, j'aimerais remercier ceux qui ont toujours été près de moi, qui m'ont appuyé et fourni l'énergie nécessaire à continuer. À ma mère, Monique Le Courtois, qui m'a tout donné sans mesure et qui m'a aimé sans compter. À mon père, André Le Courtois, qui est, encore aujourd'hui, un modèle sans faille à qui j'ai pu me comparer pour grandir sans cesse. À mes frères Michel et Alain Le Courtois, qui ont su me pousser à exceller dans ce que je fais de mieux. Finalement, à ma femme, Nathalie, qui a su me combler, m'aimer et m'appuyer chacune de ces journées. Sans elle, je ne serais pas à écrire ces lignes. Et comment pourrais-je oublier mon fils, Etienne, qui est, sans aucun doute, ma plus grande source de réconfort. Son amour inconditionnel m'a permis de passer à travers ces jours où le travail semblait trop grand. Je vous aime tous et espère être à la hauteur de vos attentes. Puisse la Vie vous donner autant que ce qu'elle m'a donné.

Table des matières

Résumé.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vi
Nomenclature utilisée.....	xi
1. Réseau de transport et distribution d'énergie électrique.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Types de réseaux.....	3
1.3 Type de réseau de distribution ciblé.....	3
1.4 Type de modélisation des lignes de distribution.....	5
1.4.1 Circuit équivalent à paramètres distribués.....	5
1.4.2 Circuit équivalent en π	6
1.5 Calculs des différents paramètres d'un réseau.....	8
1.5.1 Impédance de ligne.....	8
1.5.2 Transformateurs.....	14
1.5.3 Compensateurs statiques.....	16
1.6 Conclusion.....	17
2. Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations (BEEP).....	18
2.1 Introduction.....	18
2.2 Paramètres du modèle réduit d'une ligne.....	19
2.3 Modélisation physique réduite des éléments du réseau et calcul des paramètres.....	19
2.3.1 Ligne de distribution.....	19
2.3.2 Transformateurs.....	21
2.3.3 Charges.....	22
2.3.4 Charge non linéaire.....	23
2.4 Conclusion.....	23
3. Systèmes d'acquisition de données.....	25
3.1 Systèmes d'acquisition faisant partie du banc d'essai BEEP.....	25
3.1.1 VIORNE [3-1].....	25
3.1.2 SORBIER [3-2].....	26
3.2 Logiciels d'acquisition et de traitement des données.....	27
3.2.1 DATA6, le logiciel d'acquisition du système VIORNE.....	27
3.2.2 LYRE et VISION, les logiciels d'acquisition du système SORBIER.....	30
3.2.3 Interface MATLAB [3-4] pour le traitement différé des résultats de mesure du système SORBIER.....	30
3.3 Équations utilisées.....	33
3.3.1 Nomenclature.....	33
3.3.2 Introduction.....	34
3.3.3 Calcul de X_{sm} et X_{cm} , les composantes d'amplitude de la décomposition en série de Fourier.....	34
3.3.4 Calcul de la valeur efficace de la tension et du courant.....	34
3.3.5 Calcul du THD de la tension et du courant.....	35

3.3.6	Calcul du déphasage entre la fondamentale de la tension et la fondamentale du courant, φ	35
3.3.7	Calcul du facteur de puissance de la fondamentale (PF).....	35
3.3.8	Calcul de la puissance apparente, S.....	35
3.3.9	Calcul de la puissance active fondamentale, P.....	35
3.3.10	Calcul de la puissance réactive fondamentale, Q.....	35
3.3.11	Calcul de la puissance de distorsion, D.....	36
3.4	Conclusion.....	36
4.	Résultats d'étude de différents phénomènes à l'aide du BEEP.....	37
4.1	Introduction.....	37
4.2	Régime permanent.....	38
4.3	Enclenchement d'une batterie de condensateurs (compensateur statique).....	45
4.4	Enclenchement d'une charge inductive triphasée.....	49
4.5	Conclusion.....	52
5.	Logiciels de simulation en électronique de puissance.....	53
5.1	Introduction.....	53
5.2	Simulateurs en électronique de puissance.....	53
5.2.1	ATOSEC5.....	53
5.2.2	SABER.....	54
5.2.3	SIMUPELS.....	54
5.3	Simulateurs de réseaux électriques.....	54
5.3.1	ATP/EMTP.....	55
5.3.2	EMTDC.....	55
6.	Développement du logiciel SIMUBEEP.....	56
6.1	Introduction.....	56
6.2	Source triphasée.....	56
6.3	Ligne de distribution.....	58
6.4	Transformateurs.....	62
6.4.1	Connexion $Y\Delta 1$	64
6.4.2	Connexion $Y\Delta 11$	65
6.4.3	Connexion $\Delta Y 1$	67
6.4.4	Connexion $\Delta Y 11$	68
6.4.5	Connexion $YY 12$	70
6.4.6	Connexion $\Delta\Delta 12$	71
6.5	Convertisseurs triphasés.....	73
6.5.1	Convertisseur à 6 pulsations avec angle d'amorçage déphasé.....	74
6.5.2	Convertisseur à six pulsations avec calcul complet.....	75
6.5.3	Convertisseur à 12 pulsations.....	76
6.6	Charges.....	77
6.6.1	Moteur à courant continu (c.c.).....	77
6.6.2	Charge linéaire RLC (UI) parallèle.....	79
6.7	Modèle en pi (π).....	86
6.8	Conclusion.....	87
7.	Méthode itérative de simulation globale.....	88
7.1	Introduction.....	88

7.2 Méthode itérative de simulation globale.....	88
7.3 Exemple d'application de la méthode	90
7.3.1 Méthodologie.....	91
7.3.2 Caractéristiques du système étudié.....	94
7.3.3 Simulation.....	95
7.3.4 Résultats de simulation.....	96
7.4 Conclusion	101
8. Simulation du BEEP : Étude de divers phénomènes.....	102
8.1 Introduction.....	102
8.2 Enclenchement et déclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs (compensateur statique).....	103
8.3 Enclenchement d'une charge inductive triphasée.....	107
8.4 Chute de la tension du réseau.....	111
8.5 Hausse de la tension du réseau.....	114
8.6 Conclusion	118
9. Analyse des résultats expérimentaux et de simulation.....	119
9.1 Introduction.....	119
9.2 Comparaison des résultats.....	119
9.2.1 Enclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs	119
9.2.2 Enclenchement d'une charge inductive triphasée	120
9.3 Chute et hausse de la tension du réseau	121
9.4 Conclusion	122
Conclusions générales	123
Bibliographie.....	126
Annexe A Beep - Plans et figures	129
Annexe B Logiciel du système VIORNE, codes de programmation.....	138
Annexe C Logiciel du système SORBIER, codes de programmation des logiciels de traitement des données.....	160
Annexe D Méthode itérative de simulation globale, codes de programmation	185

Liste des figures

Figure 1-1 Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations - Schéma unifilaire	4
Figure 1-2 Ligne de distribution à paramètres distribués.....	5
Figure 1-3 Circuit équivalent en π	6
Figure 1-4 Circuit équivalent en T	7
Figure 1-5 Schéma de la géométrie des conducteurs a et b.....	10
Figure 1-6 Géométrie d'un poteau d'une ligne de 25 kV.....	12
Figure 1-7 Modèle du transformateur	15
Figure 1-8 Modèle du transformateur employé.....	16
Figure 1-9 Schéma de principe du modèle du condensateur.....	17
Figure 2-1 Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP").....	18
Figure 3-1 Configuration du système SORBIER avec PSION.....	26
Figure 3-2 Configuration du système SORBIER avec réseau sous Windows.....	26
Figure 3-3 Schéma d'interaction entre les différents logiciels composant le système du VIORNE	28
Figure 3-4 Tableau des résultats calculés par DATA6.....	28
Figure 3-5 Fenêtre d'affichage des résultats d'acquisition par DATA6.....	29
Figure 3-6 Interface du logiciel d'acquisition LYRE	30
Figure 3-7 Interface du programme sous MATLAB pour l'analyse des données du Sorbier31	
Figure 3-8 Affichage des mesures de tension et courant d'une phase	32
Figure 3-9 Résultats calculés pour une session utilisant deux SORBIER et douze canaux32	
Figure 3-10 Analyse de Fourier par FFT.....	33
Figure 4-1 Schéma unifilaire du montage utilisé pour le BEEP et SIMUBEEP.....	37
Figure 4-2 Régime permanent, tension et courant, phase A, charge linéaire.....	39
Figure 4-3 Régime permanent, tension et courant, phase B, charge linéaire	39
Figure 4-4 Régime permanent, tension et courant, phase C, charge linéaire	40
Figure 4-5 Régime permanent, tension et courant, phase A, charge non linéaire.....	40
Figure 4-6 Régime permanent, tension et courant, phase B, charge non linéaire	41
Figure 4-7 Régime permanent, tension et courant, phase B, charge non linéaire	41
Figure 4-8 Régime permanent, tension et analyse harmonique, phase A, charge non linéaire	42
Figure 4-9 Régime permanent, tension et analyse harmonique, phase B, charge non linéaire	43
Figure 4-10 Régime permanent, tension et analyse harmonique, phase C, charge non linéaire	43
Figure 4-11 Régime permanent, courant et analyse harmonique, phase A, charge non linéaire	44
Figure 4-12 Régime permanent, courant et analyse harmonique, phase B, charge non linéaire	44
Figure 4-13 Régime permanent, courant et analyse harmonique, phase C, charge non linéaire	45
Figure 4-14 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase A, charge linéaire	46

Figure 4-15 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase B, charge linéaire	46
Figure 4-16 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase C, charge linéaire	47
Figure 4-17 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase A, charge non linéaire	47
Figure 4-18 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase B, charge non linéaire	48
Figure 4-19 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase C, charge non linéaire	48
Figure 4-20 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase A, charge linéaire	49
Figure 4-21 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase B, charge linéaire	50
Figure 4-22 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase C, charge linéaire	50
Figure 4-23 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase A, charge non linéaire	51
Figure 4-24 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase B, charge non linéaire	51
Figure 4-25 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase C, charge non linéaire	52
Figure 6-1 Librairie SIMUBEED	56
Figure 6-2 Réseaux de distribution	56
Figure 6-3 Modèle de la source triphasée avec impédance interne (méthode des mailles).....	57
Figure 6-4 Impédance RL (IU).....	58
Figure 6-5 Schéma de principe de RL (IU).....	58
Figure 6-6 Module lignes de distribution.....	58
Figure 6-7 Modèle d'une ligne de distribution avec influence de la mutuelle	59
Figure 6-8 Modèle d'une ligne de distribution sans influence de la mutuelle.....	60
Figure 6-9 Disposition des conducteurs d'une ligne pour le calcul.....	61
Figure 6-10 Module Transformateurs	62
Figure 6-11 Modèle du transformateur à couplage $Y\Delta 1$	64
Figure 6-12 Schéma de principe du transformateur à couplage $Y\Delta 1$	64
Figure 6-13 Modèle du transformateur à couplage $Y\Delta 11$	66
Figure 6-14 Schéma de principe du transformateur à couplage $Y\Delta 11$	66
Figure 6-15 Modèle du transformateur à couplage $\Delta Y 1$	67
Figure 6-16 Schéma de principe du transformateur à couplage $\Delta Y 1$	68
Figure 6-17 Modèle du transformateur à couplage $\Delta Y 11$	69
Figure 6-18 Schéma de principe du transformateur à couplage $\Delta Y 11$	69
Figure 6-19 Modèle du transformateur à couplage $YY 12$	70
Figure 6-20 Schéma de principe du transformateur à couplage $YY 12$	71
Figure 6-21 Modèle du transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$	72
Figure 6-22 Schéma de principe du transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$	72
Figure 6-23 Module Convertisseurs à thyristors	73

Figure 6-24 Ensemble convertisseur à six pulsations triphasé et commande	74
Figure 6-25 Modèle de la commande du convertisseur à six pulsations avec calcul déphasé	75
Figure 6-26 Modèle du convertisseur triphasé six pulsations à six thyristors.....	75
Figure 6-27 Modèle de la commande du convertisseur à 6 pulsations calcul complet	76
Figure 6-28 Convertisseur à 12 pulsations.....	77
Figure 6-29 Module moteurs.....	77
Figure 6-30 Modèle du moteur à courant continu à excitation indépendante	78
Figure 6-31 Moteur à courant continu (modèle E-R-L)	79
Figure 6-32 Moteur à courant continu à aimant permanent	79
Figure 6-33 Module Charges RLC.....	80
Figure 6-34 Schéma de principe monophasé de la charge RLC parallèle.....	80
Figure 6-35 Modèle de la charge RLC parallèle triphasée.....	81
Figure 6-36 Schéma de principe de la charge RCL parallèle triphasée	81
Figure 6-37 Modèle de la résistance et de l'inductance (modèle UI).....	82
Figure 6-38 Schéma de principe du modèle du condensateur.....	83
Figure 6-39 Modèle du condensateur (UI).....	83
Figure 6-40 Modèle RLC avec logique de surveillance de la tension et du courant.....	85
Figure 6-41 Bloc Logique pour surveillance d'enclenchement et déclenchement.....	86
Figure 6-42 Modèle du circuit équivalent en π de la ligne de distribution	86
Figure 7-1 Organigramme de la méthode itérative de simulation globale	89
Figure 7-2 Schéma unifilaire du système étudié	91
Figure 7-3 Schéma unifilaire du système total étudié et présentation des variables.....	92
Figure 7-4 Schéma unifilaire du système itératif simulé (1er sous-système).....	92
Figure 7-5 Schéma unifilaire du système itératif à simuler (2e sous-système).....	93
Figure 7-6 ixf1s-Courant au secondaire du transformateur XF1.....	97
Figure 7-7 ixf2s-Courant au secondaire du transformateur XF2.....	97
Figure 7-8 ixf3s-Courant au secondaire du transformateur XF3.....	97
Figure 7-9 iss-Courant au secondaire du transformateur XF4	97
Figure 7-10 ixf1s-Courant au secondaire du transformateur XF1.....	98
Figure 7-11 ixf2s-Courant au secondaire du transformateur XF2.....	98
Figure 7-12 ixf3s-Courant au secondaire du transformateur XF3.....	99
Figure 7-13 iss-Courant au secondaire du transformateur XF4	99
Figure 7-14 Courant au secondaire du transformateur XF1	100
Figure 7-15 Courant au secondaire du transformateur XF2.....	100
Figure 7-16 Courant au secondaire du transformateur XF3.....	100
Figure 7-17 Courant au secondaire du transformateur XF4.....	100
Figure 8-1 Schéma unifilaire du montage utilisé pour le BEEP et SIMUBEEP.....	103
Figure 8-2 Schéma du montage de simulation de disjonction d'une batterie triphasée de condensateurs.....	104
Figure 8-3 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, tension au secondaire du transformateur principal XF1	104
Figure 8-4 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, tension au secondaire du transformateur de distribution de la charge linéaire XF2	105

Figure 8-5 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, courant traversant la charge linéaire.....	105
Figure 8-6 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, courant traversant la charge non linéaire.....	106
Figure 8-7 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, courant au secondaire du transformateur principal XF1	106
Figure 8-8 Schéma de montage, courant et tension d'une charge RL	107
Figure 8-9 Schéma du montage de simulation de disjonction d'une charge inductive triphasée	108
Figure 8-10 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, tension au secondaire du transformateur principal XF1	109
Figure 8-11 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, tension d'alimentation de la charge linéaire XF2	109
Figure 8-12 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, courant traversant la charge linéaire	110
Figure 8-13 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, courant traversant la charge non linéaire	110
Figure 8-14 Schéma du montage de simulation de chute de la tension du réseau	111
Figure 8-15 Chute de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur principal XF1	112
Figure 8-16 Chute de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur de distribution de la charge linéaire XF2.....	112
Figure 8-17 Chute de la tension du réseau, courant traversant la charge linéaire	113
Figure 8-18 Chute de la tension du réseau, courant traversant la charge non linéaire	113
Figure 8-19 Chute de la tension du réseau, courant au secondaire du transformateur principal XF1	114
Figure 8-20 Schéma du montage de simulation de chute de la tension du réseau	115
Figure 8-21 Hausse de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur principal XF1	115
Figure 8-22 Hausse de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur de distribution de la charge linéaire XF2	116
Figure 8-23 Hausse de la tension du réseau, courant traversant la charge linéaire	116
Figure 8-24 Hausse de la tension du réseau, courant traversant la charge non linéaire ..	117
Figure 8-25 Hausse de la tension du réseau, courant au secondaire du transformateur principal XF1	117

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Caractéristiques du câble conducteur ACSR, 336MCM, toron 26/7	20
Tableau 2-2 Caractéristiques électriques du transformateur XF1	21
Tableau 2-3 Caractéristiques électriques du transformateur XF2	22
Tableau 2-4 Caractéristiques électriques du transformateur XF3	22
Tableau 4-1 Régime permanent, résultats calculés	42
Tableau 7-1 Paramètres affectées aux différentes variables.....	95
Tableau 7-2 Résultats obtenus pour le temps d'utilisation du CPU.....	101

Nomenclature utilisée

a_0	: Amplitude de la composante continue de la décomposition d'un signal
a_n	: Amplitudes des composantes paires de la décomposition d'un signal
b_n	: Amplitudes des composantes impaires de la décomposition d'un signal
C_n	: Amplitude maximale de la $n^{\text{ième}}$ harmonique
BT(N)	: Bornier de tension (N : nombre)
d	: Longueur de la ligne (m)
D	: Puissance de distorsion (VA)
d_{ab}	: Distance du conducteur a au conducteur b (m)
$D_{\text{éq}}$: Distance équivalente entre les câbles de distribution (m)
DJ(N)	: Disjoncteur (N : nombre)
D_s	: Diamètre équivalent du câble de distribution (m)
C	: Condensateur (F)
C_L	: Condensateur de charge (F)
E	: Tension induite (V)
e	: Tension induite réduite (p.u.)
ESR	: Résistance série parasite du condensateur (Ω)
f	: Coefficient de friction (N.m/(rad.s ⁻¹))
f_{base}	: Fréquence de base du signal (60Hz)
fcem	: Force contre-électromotrice (V ou p.u.)
GMR	: Diamètre équivalent du câble de distribution (m)
h	: hauteur du conducteur (m)
h_a	: Hauteur du conducteur a (m)
i	: Compteur (1 à N)
I	: Courant (A)
I'	: Courant de sortie (A)
I_{cm}	: Amplitude de a_n appliqué à un signal de courant
I_{ph}	: Courant de phase (A)
I_{sm}	: Amplitude de b_n appliqué à un signal de courant
J	: Inertie (kg/m ²)
K_f	: Coefficient de friction (N.m/(rad.s ⁻¹))
K_ϕ	: Coefficient de couple/tension induite (V/(rad.s ⁻¹))
I_a	: Courant du circuit d'induit (A)
I_i	: Courant d'entrée (A)
I_{nom}	: Courant nominal (A)
I_o	: Courant de sortie (A)
$\vec{I}(x)$: Vecteur de courant à la position x de la ligne (A)
$\vec{I}_r = \vec{I}(0)$: Courant au récepteur (A)
$\vec{I}_s = \vec{I}(d)$: Courant à l'émetteur (A)
L	: Inductance (H)
L_a	: Inductance d'induit (H)
L_{aa}	: Inductance propre série d'un conducteur (H)

L_c	: Inductance série parasite du condensateur (H)
$L_{\text{éq}}$: Inductance série équivalente du conducteur (H)
L_{fuite}	: Inductance de fuite du transformateur (H)
L_L	: Inductance de charge (H)
L_{NL}	: Inductance de lissage du pont redresseur à diodes (H)
M	: Mutuelle (H)
m	: Réciproque de la profondeur complexe de pénétration
M_n	: Couple nominal (N.m)
n	: Rapport de transformation
N	: Nombre d'échantillons acquis correspondant à P_T périodes
p	: Indice du pulsation
P	: Puissance active fondamentale (W)
PF	: Facteur de puissance
P_n	: Puissance nominale (VA)
P_T	: Nombre de périodes complètes échantillonnées du signal de 60Hz
Q	: Puissance réactive (VAR)
R	: Résistance (Ω)
r	: Rayon du conducteur (m)
R_a	: Résistance d'induit (Ω)
r_a	: rayon du conducteur a (m)
R_{cc}	: Rapport de court-circuit (en pourcentage)
$R_{\text{enroulement}}$: Résistance de l'enroulement du transformateur (Ω)
R_L	: Résistance de charge (Ω)
R_{NL}	: Résistance de charge du pont redresseur à diodes (Ω)
R_S	: Résistance parallèle parasite du condensateur (Ω)
r_T	: Résistivité du retour par la terre (Ω/m)
S	: Puissance apparente
S_{ab}	: Distance d'un conducteur à l'image du second conducteur (m)
S_{nom}	: Puissance apparente nominale du transformateur (VA)
S_w	: Interrupteur, disjoncteur
t	: Temps (s)
T_1, T_2	: Températures ($^{\circ}C$)
T_a	: Constante de temps de l'induit (s)
T_e	: Constante de temps électrique (s)
$T_{\text{é}}$: Période d'échantillonnage (s)
T_{em}	: Couple électromagnétique (N.m)
THD	: Mesure du pourcentage d'amplitude d'une harmonique par rapport à l'amplitude de la fondamentale (Total harmonic distortion)
T_L	: Couple de charge (N.m)
T_m	: Constante de temps mécanique (s)
U	: Tension (V)
U_a	: Tension d'induit (V)
u_e	: Tension du circuit d'excitation (p.u.)
U_n	: Valeur de base pour la tension (V)
v	: Valeur instantanée de la tension (V)

V_{cm} : Amplitude de a_n appliqué à un signal de tension
 V_i : Tension d'entrée (A)
 V_{sm} : Amplitude de b_n appliqué à un signal de tension
 V_{LL} : Tension ligne à ligne (V)
 V_{max} : Tension ligne à ligne maximale d'entrée du redresseur triphasé (V)
 V_{moy} : Tension moyenne continue de sortie d'un redresseur (V)
 V_{nom} : Tension nominale (V)
 V_o : Tension de sortie (V)
 V_{ph} : Tension de phase (V)
 $V_{primaire}$: Tension appliquée au primaire du transformateur (V)
 $\bar{v}_r = \bar{v}(0)$: Tension au récepteur (V)
 $\bar{v}_s = \bar{v}(d)$: Tension à l'émetteur (V)
 $\bar{V}(x)$: Vecteur de tension à la position x de la ligne (V)
 V' : Tension de sortie (V)
 W : Vitesse de la machine (tours par minute)
 x : Position sur la ligne, mesuré du côté récepteur vers le côté émetteur(m)
 X : Grandeur (tension ou courant) (V ou A)
 X_a : Admittance parallèle de la ligne (Ω^{-1})
 X_{eff} : Grandeur efficace (tension ou courant) (V ou A)
 $X_{eff_{fond}}$: Grandeur efficace fondamentale (courant) (V ou A)
 $XF(N)$: Transformateur (N : nombre)
 X_i : Amplitude du signal X pour l'échantillon i
 $\bar{y} = j\omega C$: Admittance parallèle par unité de longueur ($S/m = \Omega^{-1}/m$)
 Z : Impédance (Ω)
 $\bar{z} = R + j\omega L$: Impédance série par unité de longueur (Ω/m)
 z_a : Impédance résistive série d'un conducteur d'une ligne de distribution (Ω/m)
 Z_c : Impédance caractéristique de la ligne (Ω)
 $Z_{\acute{e}q}$: Impédance équivalente (Ω)
 $Z_{L\acute{e}q}$: Impédance inductive équivalente (Ω)
 Z_L : Impédance inductive (Ω)
 Z_R : Impédance résistive équivalente (Ω)
 Z'_{ii} : Impédance série du conducteur i d'une ligne de distribution (Ω/m)
 Z'_{ij} : Impédance mutuelle des conducteurs i et j d'une ligne de distribution (Ω/m)
 α : Angle d'amorçage
 α_T : Coefficient de température à la température de référence
 ε : Emissivité (F/m)
 γ : Coefficient de propagation de la ligne de distribution (m^{-1})
 φ : Angle de déphasage tension-courant fondamental (degrés)
 φ_n : Phase de la $n^{i\grave{e}me}$ harmonique
 ϕ : Fréquence d'échantillonnage (s^{-1})
 μ : Perméabilité du milieu (H/m)
 ω : Pulsation (rad/s)
 ω_n : Fréquence de résonance (rad/s)
 Ω : Vitesse (rad/s), unité de résistance

Ω_n : Valeur de base pour la vitesse (rad/s)
 ρ : Résistivité du conducteur (Ω/m)
 θ : Angle
 ζ : Coefficient d'amortissement

Introduction générale

Depuis longtemps, on s'intéresse à l'étude des phénomènes perturbant les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Avec la croissance constante de la demande en énergie électrique, les méthodes de plus en plus diversifiées utilisées pour modifier et transporter cette énergie et la prise de conscience des différents types de pollution électrique, les ingénieurs d'aujourd'hui font face à des phénomènes perturbateurs de plus en plus nombreux et de plus en plus complexes. Dû à un besoin croissant, pour le consommateur, en qualité de l'énergie électrique distribuée, cette dernière est maintenant perçue comme étant un produit plutôt qu'un service. C'est pourquoi, avec l'utilisation intensive des convertisseurs de puissance et la demande grandissante en puissance et surtout en qualité de la puissance distribuée aux consommateurs, l'étude, la compréhension et la caractérisation des phénomènes liés à la production, transmission et distribution de l'énergie électrique devient un problème de premier plan. De nouvelles normes sont définies dans le but de limiter ces perturbations électriques. Des études sont effectuées sur la compatibilité électromagnétique, la production et la propagation des harmoniques, les effets de chutes, hausses et du papillotement de la tension du réseau, l'interaction entre différents éléments d'un même réseau ou d'un réseau éloigné lors de perturbations. Des chercheurs se penchent sur la question afin de mieux comprendre ces phénomènes dans le but d'y trouver des réponses, des solutions pratiques afin de répondre à cette demande croissante en qualité de l'énergie électrique.

Le travail présenté dans ce mémoire de maîtrise rapporte les travaux réalisés pour la Chaire de recherche industrielle sur les Procédés Efficaces Électrothermiques, CPEE, dans le but de développer, modifier et réaliser des outils pour l'étude des perturbations sur un réseau de distribution de l'énergie électrique.

Le travail réalisé peut être divisé principalement en trois parties distinctes. La première partie du travail a été consacrée à la modification et à la validation d'un Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations "BEEP". Ce banc d'essai modélise un réseau de distribution 25 kV avec ses transformateurs, lignes de distribution et charges permettant de réaliser différentes études liées aux perturbations d'un réseau de distribution et à la propagation de ces perturbations à travers le réseau modélisé. Cette partie est développée au chapitre 2 de ce document.

La deuxième partie du travail réalisé a été consacrée à la mise au point de systèmes d'acquisition de données afin de quantifier les phénomènes étudiés sur le banc d'essai. Le développement de ces appareils de mesure a été réalisé conjointement avec une compagnie québécoise; le logiciel nécessaire à la commande d'un de ces appareils de même que les logiciels nécessaires au traitement des données ont aussi été réalisés. Cette partie est développée au chapitre 3 de ce document.

La troisième partie du travail a été consacrée au développement d'une librairie de simulation appelée SIMUBEEP et développée dans l'environnement SIMULINK/MATLAB modélisant les principaux éléments d'un réseau de distribution et de consommation. SIMUBEEP a été développé dans le but de valider les résultats fournis par le banc d'essai BEEP et dans le but d'étudier différents phénomènes difficiles à recréer en utilisant ce même banc d'essai. Le développement de

la librairie de simulation est présentée au chapitre 6 de ce document. De plus, une méthode itérative de simulation globale a été appliquée afin de tenter de réduire les temps de calcul inhérents à la simulation d'un système à multi-convertisseurs de puissance. Cette méthode est présentée au chapitre 7 de ce document.

Finalement, à l'aide du banc d'essai BEEP, différents essais ont été effectués et à l'aide de la librairie de simulation SIMUBEEP différentes simulations ont été réalisées dans le but de vérifier la fonctionnalité des outils d'étude. Ces manipulations sont présentées respectivement aux chapitres 4 et 8 de ce document. Une comparaison des résultats est présentée au chapitre 9.

Comme le travail sur le BEEP était commencé à mon arrivée, il est important de discuter de l'apport fait par mon travail. Voici pourquoi j'aimerais faire une énumération des travaux que j'ai réalisés.

BEEP

- Calcul des charges
- Calcul des paramètres d'un système de distribution réel
- Remplacement des charges par des éléments plus appropriés
- Remplacement d'un variac monophasé par un variac triphasé
- Implantation du transformateur principal
- Implantation des divers appareils d'acquisition
- Numérotation des branchements et exécution de plans
- Réalisation des essais présentés dans ce mémoire

SIMUBEEP

- Développement des modèles de
 - Source triphasée
 - Charge RLC
 - Disjoncteurs
 - Transformateurs
 - Ligne de distribution avec et sans mutuelle
 - Moteur c.c. à aimant permanent
 - Moteur c.c. approximé E-R-L
- Application de la méthode itérative de simulation globale

Systemes d'acquisition

- Développement de l'interface de commande du VIORNE
- Développement du programme d'analyse des résultats provenant du VIORNE
- Développement des programmes d'analyse des résultats provenant du SORBIER

CHAPITRE 1

1. Réseau de transport et distribution d'énergie électrique

1.1 Introduction

Le réseau électrique est un système complexe comprenant la production, la transmission, la distribution et la consommation d'énergie électrique. Dans le but d'en faire une étude, la compréhension de ses éléments et de la modélisation de ces éléments est primordiale. De plus, il est nécessaire de connaître la façon de recueillir les informations pertinentes à l'élaboration des modèles des éléments du réseau électrique. Plusieurs méthodes de modélisation des éléments d'un réseau électrique sont présentées dans la littérature dépendant du type d'analyse requise. La simplification des modèles, lorsque possible, sera un atout certain lors de la simulation d'un tel système en permettant d'évaluer les phénomènes à étudier tout en requérant un temps de calcul raisonnable.

Dans cette section, les types de réseaux de même que certains types de modélisation seront présentés. De plus, les équations rattachées aux différents modèles, des exemples de calcul, lorsque cela sera possible, et les sources permettant de trouver les différents paramètres des modèles seront discutés.

1.2 Types de réseaux

Dans son ensemble, le système de distribution Hydro-Québec se compose principalement de deux sous-systèmes permettant d'acheminer l'énergie électrique, produite dans les centrales, vers le consommateur. Ce consommateur peut être du type résidentiel, commercial ou industriel. De plus, ces types de consommateurs sont parfois raccordés par l'intermédiaire d'un poste convertisseur statique.

Ces sous-systèmes sont :

1. La production et le transport d'énergie électrique
2. La distribution de l'énergie électrique

Les lignes qui relient les consommateurs aux producteurs d'énergie électrique sont principalement de deux types soit:

1. Les lignes aériennes
2. Les lignes souterraines

1.3 Type de réseau de distribution ciblé

Le type de réseau ciblé pour l'étude des perturbations est principalement un réseau de distribution aérien de tension égale ou inférieure à 25 kV. Les charges, ou consommateurs utilisant ce réseau sont alimentés par des lignes de distribution et des transformateurs réduisant la tension au niveau requis pour la consommation. Présentement, selon la Figure 1-1, le réseau étudié comporte deux

consommateurs. Le premier étant représenté par une charge dite linéaire composée d'une charge résistive, inductive et capacitive parallèle triphasée. Le second consommateur est représenté par une charge dite non linéaire, soit un pont redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive par une inductance de lissage.

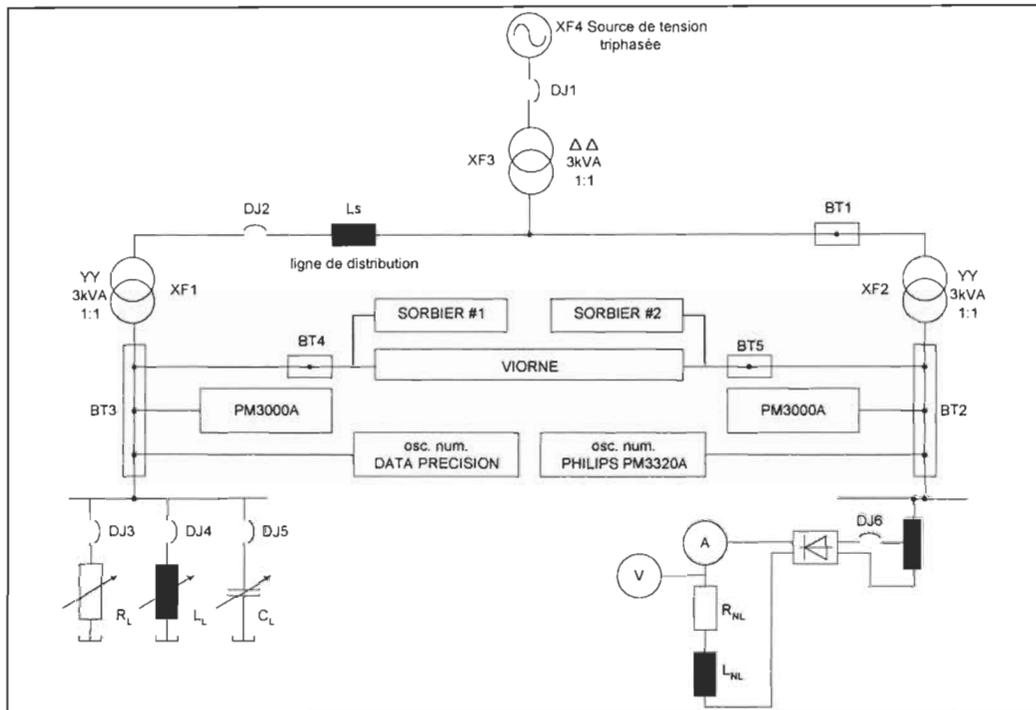


Figure 1-1 Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations - Schéma unifilaire

Tel que présenté à la section 1.2, le système de distribution Hydro-Québec se compose principalement de deux sous-ensembles qui sont :

1. La production et le transport d'énergie électrique
2. La distribution de l'énergie électrique

Les circuits de 25 kV et moins sont ceux qui nous intéressent. Ils font partie de la seconde catégorie, soit celle de la distribution. La capacité ampèremétrique des conducteurs de ce sous-système est généralement inférieure à 600 ampères. Dans ce cas, la ligne aérienne débute sa course au poste de répartition à partir d'un réseau de transformation et de disjonction. Les transformateurs, au nombre de deux, sont généralement d'une puissance de 30 MVA ayant un rapport de court circuit de l'ordre de 10%. À partir de ce rapport, l'impédance équivalente est estimée. De ce point, le circuit s'étend sur plusieurs kilomètres. Cette valeur est très variable et dépend de l'étendue de la région à desservir. Elle peut varier de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres.

En termes de points de raccordement, une forte proportion des charges est alimentée ou transitée par le réseau de 25 kV. Les circuits aériens de distribution 25 kV utilisés par Hydro-Québec sont généralement du type radial. Lorsque les circuits de distribution sont souterrains, on utilise les circuits en boucle ouverte sur disjoncteur d'attache. Cette redondance offre une fiabilité accrue en fourniture d'énergie électrique. Dans le cadre de nos travaux, la ligne de type aérien a été retenue.

La ligne aérienne étudiée est montée sur poteaux et traverses de bois tel que présenté dans le manuel B.41.11 1991 [1-1]. La distance entre les conducteurs est d'environ 1.10m. La distance au sol des conducteurs sous tension est normalisée par rapport à l'endroit où cette ligne doit traverser. Pour les fins de cette étude, les dégagements seront de 4.75m par rapport au sol. Ces paramètres déterminent les caractéristiques électromagnétiques de la ligne.

1.4 Type de modélisation des lignes de distribution

Principalement deux types de circuits équivalents peuvent être utilisés dans le but de modéliser une ligne de transmission. Ces circuits équivalents sont :

- Circuit équivalent à paramètres distribués.
- Circuit équivalent en pi (π)

1.4.1 Circuit équivalent à paramètres distribués

Cette méthode de modélisation [1-2] utilise l'équation différentielle partielle de la ligne en utilisant les impédances distribuées de la ligne. Ces paramètres sont donc distribués et constants. Ce modèle est recommandé pour les lignes longues. La terminologie "ligne longue" réfère à la longueur de la ligne par comparaison à la longueur d'onde du signal. À 60 Hz, la longueur d'onde est de 5000 km, ce qui est supérieur à la longueur d'une ligne de distribution. Cependant à fréquence plus élevée, la longueur d'onde du signal diminue. Par exemple, pour la onzième harmonique de 60 Hz, la longueur d'onde est de 5000/11 km, soit 455 km. Et un quart de cette longueur d'onde n'est plus que de 113.6 km.

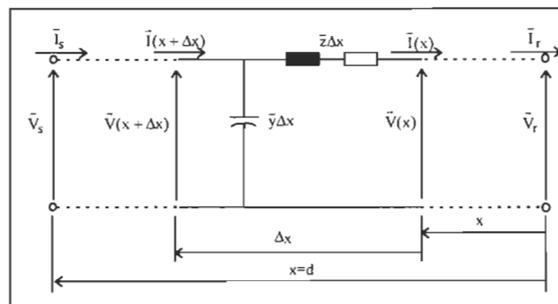


Figure 1-2 Ligne de distribution à paramètres distribués

Ce modèle est régi par des équations qui sont présentées dans la littérature concernant la transmission et la distribution de l'énergie électrique.

Sur la Figure 1-2, en sachant que

$$\bar{z} = R + j\omega L$$

$$\bar{y} = j\omega C$$

$$\sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}} = \bar{Z}_c \quad (1-1)$$

$$\sqrt{\bar{z}\bar{y}} = \bar{\gamma} \quad (1-2)$$

où \bar{Z}_c représente l'impédance caractéristique de la ligne et $\bar{\gamma}$ représente la constante de propagation de la ligne, il est possible de fournir une équation différentielle pour la tension et le courant en fonction de la position sur la ligne telle que:

$$\bar{V}(x) = \bar{V}_r \cosh \bar{\gamma}x + \bar{Z}_c \bar{I}_r \sinh \bar{\gamma}x \quad (1-3)$$

$$\bar{I}(x) = \frac{\bar{V}_r}{\bar{Z}_c} \sinh \bar{\gamma}x + \bar{I}_r \cosh \bar{\gamma}x \quad (1-4)$$

Les équations 1-3 et 1-4 permettent de retrouver la tension et le courant à tout point de la ligne, connaissant les constantes \bar{Z}_c et $\bar{\gamma}$ de la ligne et les valeurs de tension et courant du côté du récepteur.

1.4.2 Circuit équivalent en π

Cette méthode de modélisation de la ligne est plutôt simple et très employée en modélisation numérique. Elle s'appuie sur un circuit équivalent qui a la forme d'un π , tel que présenté à la Figure 1-3. Une variante de ce circuit équivalent est présenté à la Figure 1-4. Il s'agit du circuit équivalent en T. Dans cette section, seulement le modèle en π sera abordé. Ce modèle est directement applicable aux lignes courtes. Pour appliquer ce modèle à des lignes longues, plusieurs circuits équivalents en π peuvent être connectés en série pour améliorer l'exactitude des résultats qui sont affectés par les effets d'ondes stationnaires. Plusieurs méthodes de détermination de l'erreur engendrée par la modélisation de la ligne de distribution par un seul circuit équivalent en π sont proposés par différents auteurs [1-3], [1-4]. La méthode présentée dans la référence [1-3] est concise et facile à comprendre. C'est pourquoi elle sera employée. Cependant, tous les auteurs s'entendent pour dire que plus la fréquence est élevée, et plus la longueur de la ligne représentée est grande, plus le nombre de sections π devra être important.

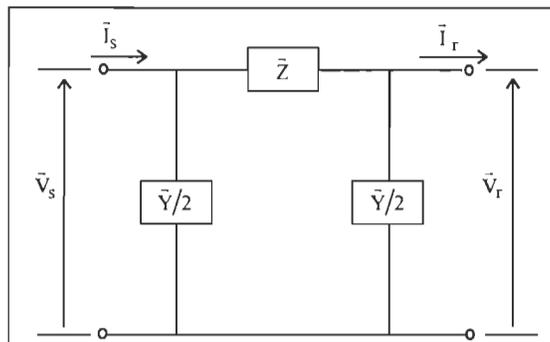


Figure 1-3 Circuit équivalent en π

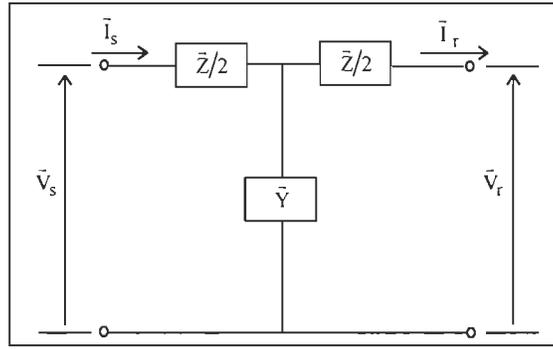


Figure 1-4 Circuit équivalent en T

Les équations régissant un tel circuit équivalent sont présentées aux équations 1-11 et 1-12 [1-2].

En posant

$$\bar{z} = R + j\omega L, \quad (1-5)$$

$$\bar{y} = j\omega C, \quad (1-6)$$

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}} \text{ et} \quad (1-7)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{z}\bar{y}} \quad (1-8)$$

on peut définir \bar{Z} et $\frac{\bar{Y}}{2}$ tel que présenté aux équations 1-9 et 1-10.

$$\bar{Z} = \bar{Z}_c \sinh(\bar{\gamma}d) \quad (1-9)$$

$$\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{1}{\bar{Z}_c} \tanh\left(\frac{1}{\bar{\gamma}d}\right) \quad (1-10)$$

Z_c représente l'impédance caractéristique de la ligne et γ représente le coefficient de propagation.

Les équations régissant le circuit équivalent en π deviennent alors telles que décrites aux équations 1-11 et 1-12.

$$\bar{V}_s = \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right)\bar{V}_r + \bar{Z}\bar{I}_r \quad (1-11)$$

$$\bar{I}_s = \left(\bar{Y} + \frac{\bar{Z}\bar{Y}^2}{4}\right)\bar{V}_r + \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right)\bar{I}_r \quad (1-12)$$

Dans le cas où la ligne est courte ($\gamma d \ll 1$), il est possible d'approximer les valeurs de Y et Z selon les équations 1-13 et 1-14.

$$\bar{Z} \cong \bar{z}d \quad (1-13)$$

$$\frac{\bar{Y}}{2} \cong \frac{\bar{y}_d}{2} \quad (1-14)$$

Si les équations 1-13 et 1-14 sont utilisées, le circuit équivalent résultant est appelé "circuit équivalent en π nominal" [1-2]. En général, cette approximation est valable pour des lignes de transmission de longueur inférieures à 200 km [1-2].

L'erreur apportée par l'utilisation d'une seule section π ou T pour la modélisation d'une ligne de distribution ou de transmission est dépendante de la longueur de la ligne et de la fréquence la plus élevée du phénomène étudié [1-3]. En général, il est habituel de comparer la longueur de la ligne à un quart de la longueur d'onde de la fréquence la plus élevée [1-3]. De cette façon, à une fréquence de 1kHz, un quart de longueur d'onde correspond à 74.5 km. Si la 25^e harmonique de 60 Hz est étudiée, le quart de la longueur d'onde correspond à 62 km. En respectant cette logique, une ligne de 30 km ne devra pas être étudiée pour une fréquence supérieure à 2.7 kHz, soit la 45^e harmonique si l'on veut maintenir l'erreur due à la modélisation inférieure à 2%. Pour des fréquences plus élevées, un plus grand nombre de circuits en π devront être utilisés en divisant l'impédance totale en sections pour conserver l'erreur faible.

Un autre facteur influençant l'erreur introduite par la modélisation d'une ligne au moyen d'un circuit équivalent π ou T est défini comme étant le rapport $\frac{\sinh \theta}{\theta}$ où θ est défini comme étant :

$$\theta = j\omega(LC)^{1/2} \text{ (rad)}$$

ω est la pulsation à la fréquence étudiée ($2\pi f$)

L est l'impédance inductive totale de la ligne

C est l'impédance capacitive de la ligne

Tant que le rapport $\frac{\sinh \theta}{\theta}$ demeure près de l'unité, l'erreur introduite par l'approximation est négligeable [1-3]. Dans notre cas, il est possible de calculer cette erreur en calculant les paramètres de notre ligne. Les prochaines sections présenteront le calcul de ces paramètres.

1.5 Calculs des différents paramètres d'un réseau

Dans la section suivante, certains calculs de paramètres de différentes parties d'un réseau de distribution seront présentés. Pour chacun des calculs, les données dont la connaissance préalable est nécessaire, seront introduites. Pour les calculs concernant le réseau étudié, la plupart des données sont tirées de la référence [1-1].

1.5.1 Impédance de ligne

L'impédance de la ligne de distribution se calcule de différentes façons suivant le type de modèle utilisé. Cette impédance est composée de l'impédance résistive série, de l'impédance inductive série, de l'impédance capacitive parallèle et de l'impédance inductive mutuelle. Il est à noter que

souvent, l'impédance inductive mutuelle n'est pas modélisée et, dans ce cas, l'effet inductif mutuel doit être tenu compte en calculant l'impédance inductive série équivalente. Cependant, pour un système déséquilibré, la modélisation de l'inductance mutuelle est préférable.

1.5.1.1 Impédance résistive

L'impédance résistive est une donnée de la ligne. La valeur de cette impédance dépend du type de matériau dont sont faits les conducteurs, de la section des conducteurs, de la longueur de la ligne et du nombre de conducteurs par phase. La donnée fournie par un fabricant ou par le service de distribution et de maintenance d'une ligne de distribution est généralement la valeur de l'impédance résistive par unité de longueur.

Les données typiques recueillies pour un réseau 25kV permettent de fixer la valeur de l'impédance unitaire à 0.17 Ω/km à une température de 20°Celsius [1-1].

Cette donnée varie en fonction de certains facteurs. Premièrement, la température influence la résistivité d'un matériau. Afin de calculer l'impédance résistive d'une ligne à une température donnée, l'équation 1-15 peut être employée.

$$R(T_2) = R(T_1)[1 + \alpha_{T_1}(T_2 - T_1)] \quad (1-15)$$

où:

T_1 est la température de référence

T_2 est la température pour laquelle on désire la valeur de résistance

α_{T_1} est le coefficient de température à la température de référence (relatif au matériau).

Bien que la variation de la résistance en fonction de la température ne soit pas tout à fait linéaire, l'équation 1-15 fournit une très bonne approximation.

En second lieu, à fréquence élevée, le phénomène "d'effet pelliculaire" ou "effet de peau" joue un rôle important. Ce phénomène fait augmenter la résistivité équivalente du matériau puisque la section efficace (section où passe le courant) du conducteur est réduite. Le calcul de l'impédance d'un conducteur cylindrique solide en Ω/m tenant compte de l'effet de peau est présenté à l'équation 1-16. [1-5]

$$Z = \frac{\rho m I_0(mr)}{2\pi r I_1(mr)} \quad (1-16)$$

où :

ρ est la résistivité du conducteur

r est le rayon du conducteur (m)

I_0 est la fonction de Bessel modifiée du premier type d'ordre 0

I_1 est la fonction de Bessel modifiée du premier type d'ordre 1

et $m = \sqrt{j\omega\mu/\rho}$ est la réciproque de la profondeur complexe de pénétration.

Pour notre étude, l'effet pelliculaire et la variation de la résistance en fonction de la température sont négligés.

Pour une ligne de 30km, on peut donc évaluer l'impédance résistive série de la ligne à :
 $R_{30km} = 30 \times 0.17 = 5.1 \Omega$

1.5.1.2 Impédance inductive série ("self")

L'impédance inductive série de la ligne de distribution est dépendante de diverses données de la ligne. Elle dépend de la perméabilité magnétique du milieu (μ), de la distance du câble au sol et du rayon du conducteur. L'équation permettant de déterminer l'impédance totale d'un conducteur (résistive série, inductive série et mutuelle) est présentée à l'équation 1-17 [1-6]. Cette équation se rapporte à la Figure 1-5 pour la détermination des paramètres de l'équation.

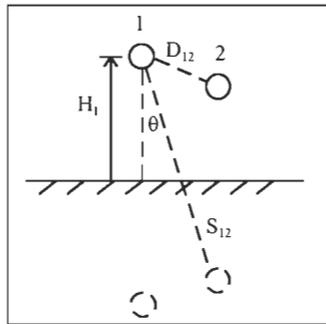


Figure 1-5 Schéma de la géométrie des conducteurs a et b

L'équation complète trouvée dans la référence [1-6] est reprise à l'équation 1-17 et correspond à la chute de tension sur un conducteur d'un système à deux conducteurs.

$$V_1 = \left[z_a + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h_1}{a}\right) + \frac{\omega \mu_0}{\pi} (A_{11} + jB_{11}) \right] I_1 - \left[j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_1}{d_{12}}\right) + \frac{\omega \mu_0}{\pi} (A_{12} + jB_{12}) \right] I_2 \quad (1-17)$$

où :

V_1 est la chute de tension causée par l'impédance de la ligne (volts/m)

I_1 est le courant traversant le conducteur 1 (A/m)

I_2 est le courant traversant le conducteur 2 (A/m)

z_a est l'impédance résistive série du conducteur 1 (Ω/m)

μ_0 est la perméabilité du milieu ($4\pi 10^{-7}$ H/m)

r est le rayon du conducteur 1 (m)

h_1 est la hauteur du conducteur 1 au sol (m)

A et B sont les termes correcteurs pour un retour par la terre qui n'est pas parfait.

Les termes correcteurs A et B sont définis par les équations 1-18 et 1-19 mais sont négligés dans la présente étude. On considère donc le retour par la terre comme ayant une résistance nulle.

$$A = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos\theta + \frac{k^2}{16} \left[\left(0.6728 + \ln \frac{2}{k} \right) \cos 2\theta + \theta \sin 2\theta \right] + \frac{k^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{\pi k^4 \cos 4\theta}{1536} \quad (1-18)$$

$$B = -0.0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos \theta - \frac{\pi k \cos 2\theta}{64} + \frac{k^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{k^4}{384} \left[\left(\ln \frac{2}{k} + 1.0895 \right) \cos 4\theta + \theta \sin 4\theta \right] \quad (1-19)$$

où (voir Figure 1-5) :

$$k = 8.565 \times 10^{-4} (2h) \sqrt{\frac{f}{r_T}}$$

θ = Angle entre la droite reliant un conducteur et son image et la droite reliant ce même conducteur à l'image d'un autre conducteur (utilisé dans le calcul de l'inductance mutuelle). Pour le calcul de l'impédance inductive série, $\theta=0$.

r_T = Résistivité du retour par la terre (Ω/m^3)

L'équation 1-17 comporte principalement deux termes. Le premier terme évalue l'effet du conducteur sur lui-même ("self"). Il s'agit de l'effet de l'inductance propre du conducteur et de la résistance du conducteur. Le second terme représente l'effet mutuel entre les conducteurs. L'inductance calculée dans le second terme représente la mutuelle entre les différents conducteurs et sera utilisé à la section 1.5.1.3.

On doit, tout d'abord, calculer l'impédance inductive propre du conducteur qui est dépendante de la perméabilité du milieu de la hauteur au sol du conducteur et de son rayon. L'équation 1-20 tirée de l'équation 1-17 permet de calculer l'impédance inductive interne du conducteur en Ω/m en négligeant la résistivité du sol.

$$Z_L = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{h}{r} \right) \quad (1-20)$$

Calculons, donc, l'inductance série ou "self" pour notre cas. Pour le système étudié, les données sont [1-1] :

$$\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

h = hauteur du conducteur par rapport au sol = 4.75 m.

Diamètre extérieur = 0.01831 m

GMR = rayon géométrique moyen = 0.00741 m

Pour tenir compte du fait que le conducteur est constitué de multiples torons, on doit utiliser la valeur du GMR au lieu de prendre directement la valeur du rayon extérieur du conducteur.

$$z = j \frac{(2\pi 60)(4\pi 10^{-7})}{2\pi} \ln \left(\frac{4.75}{0.00741} \right) = j0.487 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ ou } j0.487 \text{ }\Omega/\text{km} \text{ à une fréquence de 60 Hz. On}$$

peut aussi dire que $L = 1.292 \text{ mH/km}$.

Pour une ligne de 30 km, l'inductance propre est évaluée à 38.75 mH. L'impédance pour 30 km est donc de 14.61 Ω .

1.5.1.3 Impédance inductive mutuelle

Afin de calculer l'impédance inductive mutuelle entre deux conducteurs, on utilise l'équation 1-18 en n'utilisant que le second terme qui correspond à l'effet mutuel. L'équation utilisée devient donc l'équation 1-21 [1-5].

$$Z_{ab} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{d_{ab}} \quad (1-21)$$

où (voir Figure 1-5) :

$2h$ = Distance entre un conducteur et son image par rapport au sol (m)

d_{ab} = Distance entre les deux conducteurs (m)

Dans notre cas, l'impédance mutuelle à 60 Hz entre deux conducteurs peut se calculer de la façon suivante en utilisant la distance équivalente entre les conducteurs :

En négligeant la résistivité du retour par la terre et sachant que (voir la Figure 1-6) :

$$D_{\text{éq}} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} = \sqrt[3]{1.24 \times 1.01 \times 2.25} = 1.41 \text{ m} \quad (1-22)$$

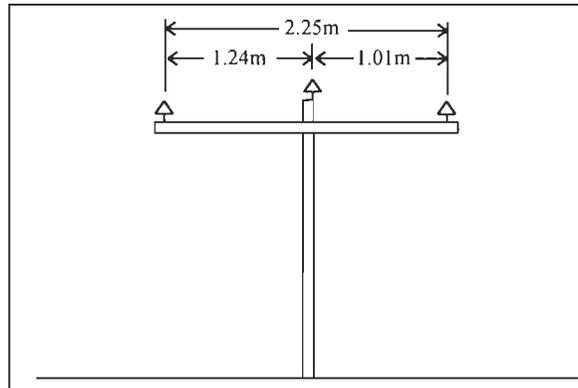


Figure 1-6 Géométrie d'un poteau d'une ligne de 25 kV [1-1]

On peut calculer l'impédance mutuelle à 60 Hz :

$$Z_{ab} = j(2\pi 60) \frac{4\pi 10^{-7}}{2\pi} \ln \left(\frac{9.5}{1.41} \right) = j0.144 \text{ m}\Omega/\text{m} = 0.144 \text{ }\Omega/\text{km}$$

On peut aussi dire que l'inductance mutuelle est d'une valeur de 0.382.1 $\mu\text{H}/\text{m}$ ou de 0.382 mH/km. Pour une ligne de 30 km, on aura donc une mutuelle de 11.46 mH. On aura donc une impédance mutuelle de 4.32 Ω pour une fréquence de 60 Hz.

1.5.1.4 Impédance inductive équivalente

Il est intéressant de remarquer que l'effet de la mutuelle n'augmente pas l'impédance inductive d'un conducteur, dans le cas où un système triphasé est équilibré. En fait, l'effet des mutuelles diminue l'impédance inductive d'un conducteur. Comme le démontrent les équations 1-23 et 1-24, la chute de tension créée par l'effet des mutuelles aura donc un effet positif dans le cas d'un système ou d'un défaut équilibré en diminuant l'impédance inductive équivalente. Afin de trouver un équivalent pour l'impédance inductive totale d'un conducteur, l'équation des impédances inductives équivalentes par phase sera donc celle définie par l'équation 1-24.

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &= Z_L I_1 + Z_M I_2 + Z_M I_3 = Z_L I_1 + Z_M (I_2 + I_3) \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \\ I_1 &= -I_2 - I_3\end{aligned}\tag{1-23}$$

$$\begin{aligned}Z_{L\text{éq}} &= Z_L - Z_M \\ \text{ou} \\ L_{\text{éq}} &= L - M\end{aligned}\tag{1-24}$$

Il est possible de déterminer une équation pour calculer une inductance équivalente. À partir des équations 1-20 et 1-21, on peut faire le développement suivant :

$$L_{\text{éq}} = L - M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h}{r}\right) - \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{d_{ab}}\right) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{ab}}{2r}\right)\tag{1-25}$$

$$L_{\text{éq}} = \frac{4\pi 10^{-7}}{2\pi} \ln\left(\frac{1.41}{0.00741}\right) = 1.05 \mu\text{H/m} = 1.05 \text{ mH/km}$$

$$Z_{L\text{éq}} = 2\pi 60 L_{\text{éq}} = 2\pi 60 (1.05 \times 10^{-3}) = 0.396 \Omega/\text{km} \text{ pour une fréquence de } 60 \text{ Hz.}$$

Pour 30 km, on a donc une impédance inductive équivalente de 11.87 Ω à 60 Hz. L'impédance inductive équivalente trouvée en utilisant les équations 1-20 et 1-21 est aussi de 11.87 Ω à 60 Hz.

L'équation 1-25 coïncide avec les équations trouvées aux références [1-7] et [1-8]. Dans la littérature, on parle généralement d'une impédance inductive équivalente. Ceci peut être acceptable dans un cas où le système est équilibré et où le retour par la terre est négligé. Cette dernière méthode de calcul n'a cependant pas l'avantage de fournir l'information sur le rapport de grandeurs entre l'inductance propre et mutuelle d'une même ligne.

1.5.1.5 Impédance capacitive parallèle (shunt)

Dans la modélisation de la ligne de distribution, un paramètre nécessaire à évaluer pour la mise en forme du circuit équivalent en π est l'impédance capacitive parallèle. Dans le modèle en π ,

l'impédance capacitive parallèle est représentée par le terme $Y/2$. Cette impédance exprimée en F/m se calcule à partir de l'équation (1-26) tirée de [1-9].

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad (1-26)$$

où :

ϵ_0 : représente la permittivité absolue du vide, $\epsilon_0 = \frac{1 \times 10^{-9}}{36\pi}$ F/m

ϵ_r : représente la permittivité relative du milieu

h : représente la hauteur du conducteur

r : représente le rayon du conducteur

Dans le cadre de notre étude, le calcul de l'impédance capacitive parallèle donne le résultat suivant :

$$C = \frac{2\pi}{36\pi 10^9 \ln\left(\frac{2 \times 4.75}{0.003705}\right)} = 7.08 \times 10^{-12} \text{ F/m ou } 7.08 \times 10^{-9} \text{ F/km}$$

Il en résulte, pour une ligne de 30 km, une capacité parallèle de 0.212 μF ou une impédance capacitive parallèle de 12.51 k Ω .

Pour notre étude, les résultats calculés jusqu'à présent sont donc :

R	= 0.17 Ω/km	$R_{30\text{km}}$	= 5.1 Ω	$R_{30\text{km}}$	= 5.1 Ω
L	= 1.292 mH/km	$L_{30\text{km}}$	= 38.75 mH	$X_{L(60\text{ Hz})}$	= 14.61 Ω
M	= 0.382 mH/km	$M_{30\text{km}}$	= 11.46 mH	$X_{M(60\text{ Hz})}$	= 4.32 Ω
C	= 7.08×10^{-9} F/km	$C_{30\text{km}}$	= 0.212 μF	$X_{C(60\text{ Hz})}$	= 12.51 k Ω

1.5.2 Transformateurs

Les paramètres des transformateurs dépendent principalement du type de transformateur étudié et de ses caractéristiques. Le type de refroidissement utilisé, la puissance nominale, la charge, la température d'opération, le nombre d'enroulements, et l'âge du transformateur sont des variables qui influencent le calcul et la mesure des paramètres d'un transformateur. De plus, les impédances varient en fonction de la fréquence à laquelle elles sont calculées. En augmentant la fréquence, la résistance équivalente aura tendance à augmenter due à l'effet pelliculaire, alors que l'inductance équivalente aura tendance à diminuer [1-4]. Un modèle de transformateur très utilisé est celui présenté à la Figure 1-7. La méthode employée pour déterminer les paramètres de ce modèle se résume en deux essais : essais en circuit ouvert et essai en court-circuit. Cette méthode est bien documentée dans la littérature.

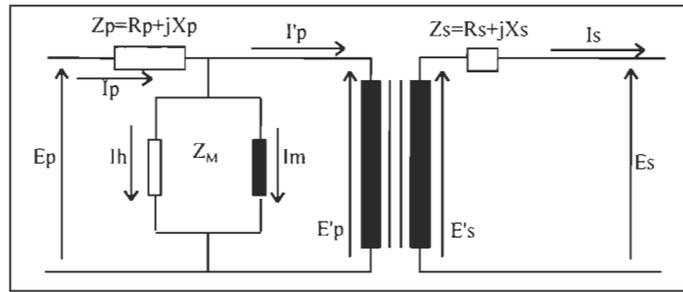


Figure 1-7 Modèle du transformateur

Certains ouvrages [1-10], [1-11] fournissent des valeurs typiques pour les paramètres des transformateurs. Cependant, il est possible de déterminer les valeurs exactes de ces paramètres, soit par mesure, soit grâce au fabricant. Afin de simuler un réseau typique pour notre étude, il sera donc possible d'utiliser les valeurs retrouvées dans la littérature ou, en dernier recours, d'approximer ces valeurs dans le but d'évaluer l'effet global des perturbations sur le ou les transformateur(s) faisant partie du réseau de distribution. Dans le cadre de la simulation du banc d'essai, nous avons utilisé les valeurs données dans les notices techniques des transformateur faisant partie du banc d'essai.

Les paramètres à déterminer pour les transformateurs sont :

- Puissance nominale
- Rapport de transformation primaire/secondaire
- Impédance interne
 - Rapport d'impédance ou de court-circuit
 - Rapport X/R

Les deux premières caractéristiques sont faciles à obtenir. Elles sont habituellement inscrites sur le transformateur. Pour ce qui est des impédances internes, leur détermination dépend du transformateur utilisé et de ses caractéristiques propres. Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude représente le transformateur comme un diviseur de tension et de courant avec chute de tension causée par l'impédance interne inductive et résistive. Ce modèle est présenté à la Figure 1-8. Il est possible de rapporter l'impédance du transformateur soit du côté primaire, soit du côté secondaire. Dans notre cas, l'impédance est rapportée du côté secondaire. Elle est déterminée en supposant que le rapport X/R est suffisamment élevé pour évaluer l'impédance inductive à partir de la puissance apparente. La valeur de la résistance est déterminée à partir du rapport X/R typique fixé. Le rapport X/R est typiquement compris entre 10 et 30 [1-12]. Ce rapport est plus bas pour des transformateurs de distribution et plus élevé pour des transformateurs utilisés dans un réseau de transmission à très haute tension. Une valeur typique pour les transformateurs utilisés dans la présente étude se situe autour de 15, ceux-ci étant dans la partie distribution du réseau.

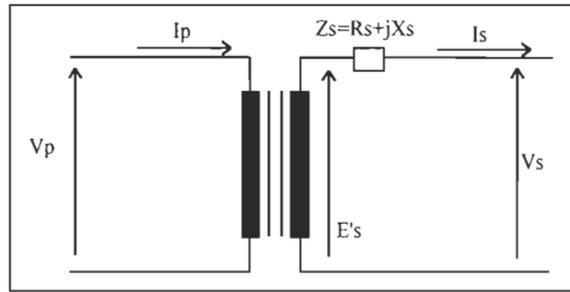


Figure 1-8 Modèle du transformateur employé

L'impédance inductive sera donc évaluée à partir du calcul de la puissance apparente nominale, celle-ci étant connue. L'équation 1-27 permet de calculer l'impédance inductive équivalente du modèle en fonction de la puissance apparente nominale du transformateur, du rapport de court-circuit (rapport d'impédance) et de la tension nominale d'opération.

$$Z_L \cong \frac{R_{cc} V_{nom}^2}{S_{nom}} \quad (1-27)$$

$$L = \frac{Z_L}{\omega}$$

Afin de calculer l'impédance résistive équivalente du modèle de transformateur, on se sert du rapport X/R. Lorsque celui-ci n'est pas fourni par le fabricant, il sera nécessaire d'approximer cette valeur en utilisant des valeurs typiques ou de faire les essais en court-circuit et en circuit ouvert afin de déterminer les impédances équivalentes.

$$Z_R = \frac{Z_L}{X/R} \quad (1-28)$$

1.5.3 Compensateurs statiques

Les compensateurs statiques (ou batteries de condensateurs) sont fréquemment employés sur des réseaux moyennes et hautes tensions. Leur principal rôle est de compenser l'énergie réactive afin d'améliorer le facteur de puissance de la ligne qui est diminué par une charge inductive. Quelques fois, ils sont utilisés pour aider à maintenir la tension du réseau. La présence de compensateurs statiques peut créer des résonances au niveau du système local et entraîner des courants excessifs qui peuvent provoquer la défaillance de ces compensateurs ou de tout autre élément du réseau. En général, ces condensateurs sont conçus pour supporter des tensions jusqu'à 1.8 fois [1-13] la tension nominale du système. Le compensateur statique est habituellement modélisé par plusieurs condensateurs connectés en parallèle qui sont idéaux ou non idéaux. Le modèle d'un condensateur non-idéal utilisé est présenté à la Figure 1-9 [1-12], [1-14].

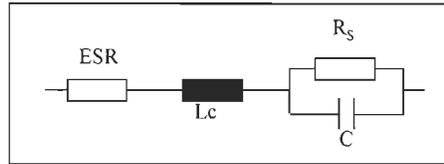


Figure 1-9 Schéma de principe du modèle du condensateur [1-12], [1-14]

La valeur des condensateurs enclenchés de la batterie doit tenir compte en tout temps de la charge inductive pour compenser le facteur de puissance. Pour cette raison, les mécanismes de régulation vont déterminer le nombre de condensateurs de la batterie qui seront actifs afin d'améliorer le facteur de puissance. Une pratique utilisée dans le but de diminuer l'effet néfaste de l'enclenchement et du déclenchement d'une batterie de condensateurs est d'enclencher la batterie au passage par zéro de la tension de leur phase et déclencher la batterie lors du passage par zéro du courant qui les traverse. Ceci est fait dans le but de limiter d'une part, les courants de charge des condensateurs lors de l'enclenchement et d'autre part, les charges accumulées lors du déclenchement. Cependant, les mécanismes de détection doivent être précis et les systèmes d'enclenchement et de déclenchement doivent être rapides et fiables pour éliminer les effets engendrés par un enclenchement ou un déclenchement non synchronisé.

1.6 Conclusion

Dans cette section, les principaux éléments d'un réseau électrique de même que leurs modèles respectifs en plus de certaines méthodes de calcul et de prise de données ont été présentés. Ces données et modèles seront utiles lors de la conception du simulateur numérique présenté au chapitre 6 et du banc d'essais présenté au chapitre 2 de ce mémoire. Il est à noter qu'il est possible d'utiliser, pour certains éléments, des micro-modèles qui reflètent mieux la réalité. Cependant, la présente étude se concentre à évaluer les effets globaux sur le système suite à certaines perturbations et que l'étude des mécanismes internes des éléments n'est pas mise à profit. C'est pourquoi les éléments seront plutôt modélisés selon des macro-modèles, suffisants pour visualiser les phénomènes externes.

CHAPITRE 2

2. Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations (BEEP)

2.1 Introduction

La réalisation de ce banc d'essai a débuté grâce à des subventions du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et aux efforts de M. Michel Bélanger, ing. [1-7], [2-1]. Le banc d'essai représenté à la Figure 2-1 a été créé dans le but de permettre l'étude des perturbations sur un réseau de distribution de moins de 25 kV, de permettre une validation de diverses simulations numériques et de réduire le temps nécessaire à l'évaluation des effets des perturbations et pour la recherche des solutions. Par ce banc d'essai, on tente de reproduire le plus fidèlement possible chacun des composants d'un réseau de distribution de 25 kV par divers éléments fonctionnant à des tensions de l'ordre de 120 volts et des courants allant jusqu'à 5 ampères. Ce banc d'essai a été conçu par modules, permettant de remplacer certains modules par d'autres ou tout simplement d'en ajouter. Ce chapitre fait état de la réalisation de ce banc d'essai, des éléments utilisés pour modéliser le réseau de distribution ainsi que des calculs et mesures inhérents au dimensionnement de chacun des éléments du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations, ("BEEP"). Suite à une recherche bibliographique effectuée sur des simulateurs analogiques du type du BEEP, aucune référence sur un travail similaire n'a pu être trouvée.

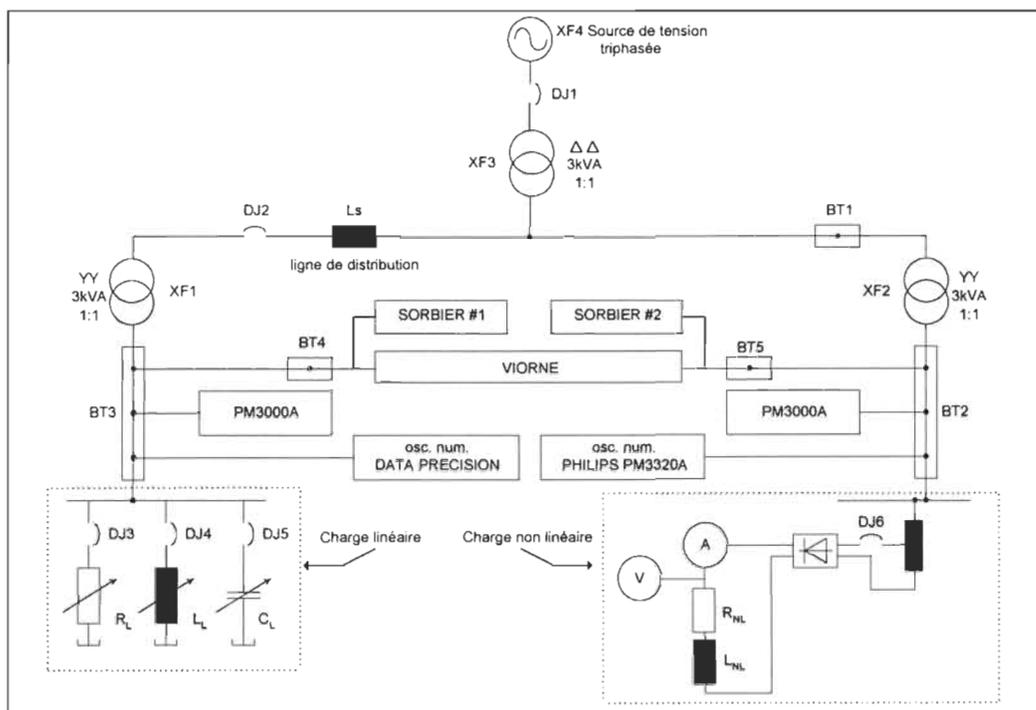


Figure 2-1 Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP")

Les figures et tableaux relatifs au banc d'essai sont présentés en annexe A. Cette annexe comprend les différents plans du montage du banc d'essai, la liste des branchements et la liste des appareils de mesure et des composants du montage.

2.2 Paramètres du modèle réduit d'une ligne

Afin de minimiser, dans un premier temps, les coûts de réalisation du modèle réduit du réseau de distribution, le matériel de laboratoire directement accessible a été utilisé. Cela a imposé les contraintes suivantes lors de la conception du banc d'essai :

1. Capacité ampèremétrique de travail du modèle réduit
2. La représentation proportionnelle des charges.

La capacité ampèremétrique est imposée par la valeur nominale des composantes faisant partie du circuit. Ceci impose un courant maximal de 5 ampères. Jusqu'à maintenant, la tension d'essai est 50% de la valeur nominale de 120V. On peut donc observer que c'est le courant qui fixe les limites d'opération, en ajustant la tension en conséquence.

La contrainte de proportionnalité des composants adresse la difficulté d'assigner à chacun des composants du circuit un rôle proportionnel par rapport aux autres. Par exemple, il serait indésirable de câbler un transformateur de distribution ayant une puissance similaire au transformateur principal de l'artère. Ainsi, lors d'un réenclenchement, le courant d'appel du transformateur de distribution serait disproportionné.

La contrainte de proportionnalité a été respecté dans une certaine mesure. Les charges utilisées ont été calculées dans le but de respecter un rapport de grandeur par rapport aux puissances du système et afin de représenter des charges typiques. Cependant, dû à la limitation des équipements disponibles, le transformateur principal et les transformateurs de distribution sont de même puissance. Pour les besoins de l'étude présentée, l'effet apporté par un tel arrangement est négligé mais des correctifs devront être apportés.

2.3 Modélisation physique réduite des éléments du réseau et calcul des paramètres.

Chacun des éléments formant le banc d'essai provient des laboratoires de la Chaire de recherche industrielle sur les procédés efficaces électrothermiques (CPEE) du département de génie électrique de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Le banc d'essai a donc dû être conçu en utilisant les éléments disponibles. Cette section présente les calculs inhérents aux éléments d'un réseau électrique, les éléments utilisés afin de réaliser le montage et les valeurs de ces éléments. Le banc d'essai a donc été réalisé avec la ferme intention de conserver un certain rapport de grandeur pour chacun des éléments par rapport aux grandeurs d'un réseau électrique réel.

2.3.1 Ligne de distribution

Tel que vu au chapitre 1, la modélisation d'une ligne de transmission peut être réalisée à l'aide de deux circuits équivalents, soit :

1. Circuit à paramètres distribués
2. Circuit équivalent en π

La facilité de réalisation pratique du circuit équivalent en π est importante. Par contre la réalisation à l'aide du circuit à paramètres distribués requiert la mise en place d'une succession de modèles en π . La réalisation de ce type de circuit est évitée en se basant sur la relation du temps de propagation [2-3].

$$t = \sqrt{LC} \times d \text{ (sec)} \quad (2-1)$$

En pratique, le modèle en π donne des résultats satisfaisants sur les lignes de transmission d'une longueur inférieure à 80 km. Il a été découvert que l'erreur ainsi introduite est inférieure à 1% [2-3]. Le modèle de la ligne est donc représenté à l'aide du modèle en π et la ligne sera supposée d'une longueur de 30 km. De plus, de la référence [2-4], on constate que la partie capacitive de la modélisation d'une ligne de distribution de tension inférieure à 40 kV et d'une longueur inférieure à 46 km peut être négligée.

Les caractéristiques physiques relatives à la ligne peuvent être déduites de deux sources :

1. Données repères [2-5].
2. Normes de distribution de réseau aérien [1-1]

Les caractéristiques de la ligne correspondant à un câble conducteur de type Linet, ACSR, toron 26/7, 336 MCM, capacité ampèremétrique : été=500A, hiver=640A sont résumées au tableau 2-1 [1-1].

Tableau 2-1 Caractéristiques du câble conducteur ACSR, 336MCM, toron 26/7 [1-1]

DESCRIPTION	Impédance/mi	Impédance/km	Impédance totale (30km)
diamètre extérieur	0.721 pouces	0.01831 m	0.01831 m
résistance c.c.	0.268 Ω /mille	0.166 Ω /km	4.98 Ω
résistance a.c. à 20°C	0.274 Ω /mille	0.170 Ω /km	5.1 Ω
résistance a.c. à 50°C	0.301 Ω /mille	0.187 Ω /km	5.61 Ω
D_s ou GMR	0.0243 pied	0.00741m	0.00741m
X_a	451M Ω	726M Ω /km	24M Ω

Pour la conception des divers composants, nous avons tenté de garder un certain degré de proportionnalité entre les impédances séries de ces composantes.

L'impédance d'une ligne réelle a un courant de court-circuit d'environ 6 p.u. (celui-ci peut varier en général de 4 à 11 p.u.) avec un rapport X/R de 15. Cette caractéristique a été respectée dans la mesure du possible. Cette caractéristique correspond à l'impédance série et a été ajustée de façon à obtenir un courant de court-circuit équivalent à une ligne réelle. Comme on désire une charge maximale de 5 ampères, 6 p.u. correspond à 30 ampères. La réactance série a donc une impédance de 40 volts/30 ampères, soit 1.33 volts par ampère de charge. Ce qui équivaut à dire :

$$Z_L = 1.33\Omega$$

Pour le calcul de l'inductance, il s'agit de diviser par la pulsation soit :

$$L = \frac{Z_L}{2\pi f} = \frac{1.33}{2\pi 60} = 3.5 \text{mH} \quad (2-2)$$

et la résistance série se calcule de la façon suivante :

$$R = \frac{1.33}{15} = 0.089 \Omega \quad (2-3)$$

Malheureusement, il est difficile d'obtenir une résistance d'aussi faible valeur et les incertitudes quant aux résistances des fils et des composantes du système nous font croire qu'il n'est pas nécessaire, à ce stade, d'ajouter à la ligne une telle résistance.

Concernant la simulation de la mutuelle de la ligne, un moteur asynchrone à rotor bobiné a été évalué dans le but d'accomplir cette tâche. En gardant le rotor en circuit ouvert, il est possible d'utiliser l'inductance de magnétisation comme couplage magnétique. Cependant, le moteur disponible causait une augmentation du rapport X/R dû à l'inductance élevée du stator.

Les valeurs absolues de X, R et du rapport X/R jouent un rôle prédominant durant les essais à courant élevé et les perturbations transitoires. Un rapport X/R élevé résulte en une asymétrie du courant. Cette asymétrie étant causée par l'inductance. De même, un rapport élevé réduit l'atténuation des transitoires se propageant sur la ligne, ce qui est à éviter.

Pour ces raisons, le moteur asynchrone à rotor bobiné n'est pas employé pour représenter une ligne de distribution. À notre avis, il serait possible de simuler les caractéristiques d'une ligne de transmission/distribution avec un transformateur triphasé fabriqué sur mesure avec la possibilité d'ajustement de l'inductance mutuelle. Cette mutuelle est nécessaire à l'exactitude des résultats lors d'essais de type déséquilibrés.

2.3.2 Transformateurs

Les transformateurs utilisés sont ceux qui étaient disponibles sur place. Leurs caractéristiques sont résumées aux tableaux 2-2 à 2-4.

Tableau 2-2 Caractéristiques électriques du transformateur XF1

XF1	Primaire	Secondaire	Tertiaire
Tension (volts)	120	120	120
Courant (A)	8	4	4
Puissance (kVA)	3	1.5	1.5
Couplage			
L_{fuite} (mH)	n/a	0.71	0.63
$R_{\text{enroulement}}$ (Ω)	0.29	0.36	0.24

Tableau 2-3 Caractéristiques électriques du transformateur XF2

XF2	Primaire	Secondaire	Tertiaire
Tension (volts)	120	120	120
Courant (A)	8,4	4,2	4,2
Puissance (kVA)	3	1.5	1.5
Couplage			
L_{fuite} (mH)	n/a	0.77	0.82
$R_{\text{enroulement}}$ (Ω)	0.19	0.52	0.57

Tableau 2-4 Caractéristiques électriques du transformateur XF3

XF3	Primaire	Secondaire	Tertiaire
Tension (volts)	120	120	120
Courant (A)	8,4	4,2	4,2
Puissance (kVA)	3	1.5	1.5
Couplage			
L_{fuite} (mH)	n/a	0.77	0.82
$R_{\text{enroulement}}$ (Ω)	0.19	0.52	0.57

2.3.3 Charges

Le calcul des charges dépend du courant de charge prévu pour le banc d'essai. Le courant de charge est fixé à 20% du courant nominal de 5A, soit 1A. Afin de déterminer les valeurs des charges, un rapport de charge X/R a été fixé. La charge fixée est de 80% résistive et de 60% inductive par rapport à la puissance apparente totale. Ceci implique que le courant de charge de la charge résistive sera de 80% le courant de charge total et que le courant de charge inductive sera de 60% le courant de charge total. Ceci nous permet de calculer les valeurs de la charge résistive triphasée et de la charge inductive triphasée. La charge capacitive est utilisée pour compenser la puissance réactive. Le calcul de la charge capacitive dépendra donc de la charge inductive qu'elle devra compenser. Ce calcul est présenté à la section 2.3.3.3.

2.3.3.1 Charge résistive

Comme le courant de charge a été fixé à 1A et que la proportion de la charge résistive a été fixée à 60%, la charge résistive peut être déterminée.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{40V}{0.8 \times 1A} = 50.0 \Omega \quad (2-4)$$

2.3.3.2 Charge inductive

De la même façon qu'en 2.2.3.1, il est possible de déterminer la valeur de la charge inductive. Sachant que cette charge doit accepter 40% de la puissance totale de charge, il est possible de déterminer sa valeur selon les équations 2-5 et 2-6.

$$Z_L = \frac{40V}{0.6 \times 1A} = 66.7 \Omega \quad (2-5)$$

$$L = \frac{Z_L}{\omega} = \frac{66.7}{2\pi 60} = 176.84 \text{ mH} \quad (2-6)$$

2.3.3.3 Compensateur statique

La charge capacitive est calculée en fonction de la charge inductive. Cette charge capacitive est utilisée pour modéliser un compensateur statique. Sa valeur sera donc calculée afin de compenser l'énergie réactive consommée par la charge inductive. L'équation 2-7 permet de calculer sa valeur.

$$Z_C = Z_L = 66.7 \Omega$$
$$C = \frac{1}{\omega Z_C} = \frac{1}{\omega Z_L} = \frac{1}{2\pi 60 \times 66.7} = 39.79 \mu\text{F} \quad (2-7)$$

2.3.4 Charge non linéaire

La charge linéaire est modélisée par un redresseur triphasé 6 pulsations à diodes. Ce redresseur débite sur une charge RL série. La puissance supportée par la charge RL série est limitée. Pour cette raison, un autotransformateur de type variac a été installé entre le transformateur principal et le redresseur à diodes. De cette façon, il est possible de limiter le courant traversant la charge c.c.. Cette limite en courant est fixée à 5 ampères c.c. de façon à ne pas surcharger les charges et les fils qui, eux aussi, ne supportent pas plus de 5 ampères.

2.4 Conclusion

Le Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations (BEEP) a été conçu pour modéliser un système de distribution de l'énergie électrique réel ou tout au moins, tenter de respecter les ordres de grandeur dans le but premier d'étudier la propagation des perturbations à travers un réseau de distribution.

Ce banc d'essai a été réalisé en utilisant les ressources matérielles disponibles. Ceci ne permet pas, à première vue, de réaliser un modèle réduit d'un système de distribution réel d'une façon exacte.

Cependant, des études [2-1] réalisées par M. Michel Bélanger à l'aide du banc d'essai (BEEP) et s'appuyant sur des simulations réalisées à l'aide du logiciel de simulation ATP/EMTP [2-3] ont permis de constater que l'erreur introduite par l'inexactitude des composantes est de l'ordre de 15%. Cependant, les formes d'onde sont similaires. De plus, le chapitre 4 fait état de résultats quant à d'autres manipulations plus récentes.

CHAPITRE 3

3. Systèmes d'acquisition de données

Afin de mesurer et d'évaluer les phénomènes créés sur le banc d'essai, des systèmes d'acquisition de données sont requis. Dans cette section, nous élaborons les détails des différents appareils d'acquisition de données utilisés. Tout d'abord, les qualités matérielles des appareils puis les logiciels utilisés pour la gestion des appareils, le transfert des données et le traitement en différé seront présentés. Dans le but de répondre efficacement au domaine dans lequel ces appareils sont utilisés, ils doivent posséder certaines qualités particulières à ce domaine spécifique.

Les principales qualités recherchées sont :

- Échantillonnage sur plusieurs canaux en courant et tension
- Possibilité d'échantillonner des signaux d'amplitude variable (à haute et basse tension, à fort et faible courant)
- Haute fréquence d'échantillonnage permettant d'analyser le signal jusqu'à la 50^{ième} harmonique. (signal de 3000 Hz, échantillonnage minimum de 6000 échantillons/s)
- Possibilité du traitement des données
 - Affichage des signaux échantillonnés
 - Calcul de
 - Distorsion totale harmonique ("THD" en anglais) en tension et en courant
 - Puissance apparente
 - Puissance active
 - Puissance réactive
 - Puissance de distorsion
 - Tension et courant efficace
 - Angle de déphasage tension-courant
 - Facteur de puissance
 - Transformée de Fourier du signal
- Possibilité de déplacer l'appareil facilement sur un site quelconque

Deux types d'appareils d'acquisition de données ont été achetés qui ont été développés sur mesure. Ces deux appareils sont des prototypes conçus spécialement pour les besoins rencontrés. Chacun des appareils sera présenté dans la section 3.1.

3.1 Systèmes d'acquisition faisant partie du banc d'essai BEEP

3.1.1 VIORNE [3-1]

Le VIORNE a été le premier appareil développé pour récupérer les données sur le banc d'essais BEEP. Voici ses caractéristiques matérielles :

- Système d'acquisition analogique-numérique
- 3 canaux d'acquisition en tension (flottant ou référencé)

- Entrées en tension : 0 à 120 V c.a.
- 3 canaux d'acquisition en courant (flottant ou référencé)
- Entrées en courant : 0 à 5 A
- Capacité maximale d'échantillonnage de 75000 échantillons/seconde pour un canal et de 75000/(nombre de canaux) pour l'utilisation de plus d'un canal
- Isolation de 240 V c.a.
- Réponse en fréquence 40 Hz-10 kHz
- Mémoire interne de 256 kByte
- Transfert des données par lien RS-232
- Portatif
- Résolution 12 bits

Ce système d'acquisition est suffisamment performant et portable pour certains besoins. Cependant, la mesure sur plus de 6 canaux est impossible. Ce qui restreint son application quant à l'étude de la propagation des perturbations où il est nécessaire d'analyser plusieurs phases en tension et courant sur différentes branches du réseau.

3.1.2 SORBIER [3-2]

Le principe sur lequel est basé le système SORBIER est différent de celui du VIORNE. Premièrement, il est utilisable sous deux configurations qui sont présentées aux Figure 3-1 et Figure 3-2.

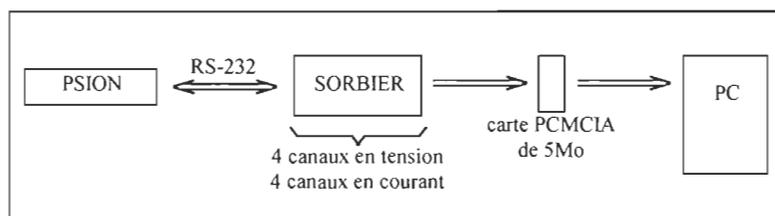


Figure 3-1 Configuration du système SORBIER avec PSION

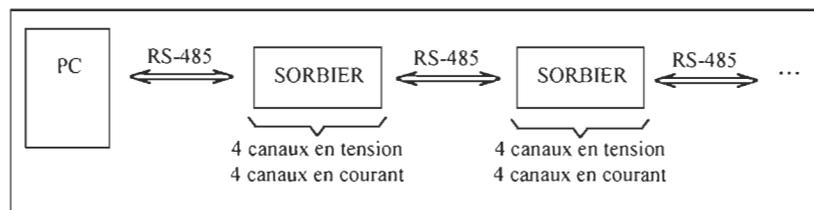


Figure 3-2 Configuration du système SORBIER avec réseau sous Windows

La première configuration permet à un SORBIER de fonctionner de manière autonome. Ceci veut dire qu'aucun ordinateur de type PC n'est nécessaire. Pour cette configuration, un ordinateur de poche (PSION) permet de configurer le SORBIER pour les acquisitions.

La deuxième configuration est réalisée grâce à la capacité des SORBIER de fonctionner en réseau. Pour cette configuration, un logiciel sous Windows, Lyre, permet de configurer l'appareil et de récupérer les données d'un ou plusieurs SORBIER en réseau. Il est possible d'interconnecter jusqu'à 32 appareils SORBIER en réseau. De plus, l'acquisition simultanée sur tous les canaux de tous les SORBIER en réseau a été implantée. Ceci permet d'obtenir de meilleurs résultats lors du calcul de l'angle de déphasage tension-courant.

Voici donc les caractéristiques matérielles pour un appareil de type SORBIER :

- 4 canaux en courant (flottant ou référencé)
- 4 canaux en tension (flottant ou référencé)
- Acquisition simultanée sur les canaux échantillonnés
- Synchronisation de plusieurs appareils SORBIER en réseau
- Sauvegarde des données sur une carte mémoire PCMCIA type II de 5MO
- Résolution d'échantillonnage de 0.5 microsecondes
- Possibilité d'échantillonner de 200 à 35000 échantillons par seconde
- Résolution : 12 bits
- Isolation des signaux de puissance à 1500V a.c. ou c.c.
- Bande passante de chaque canal de 0 à 125 kHz
- Gamme de tensions : 12 / 120 / 347 volts c.a. ou c.c.
- Gamme de courants : 50 / 500 / 5000 mA c.a. ou c.c.
- Alimentation de secours interne d'une autonomie de 1.5 heure
- Entrée-Sortie de type RS-232 pour communication PC ou PSION
- Entrée-Sortie de type RS-485 pour communication réseau

3.2 Logiciels d'acquisition et de traitement des données

Pour chacun des systèmes d'acquisition de données, un logiciel servant à commander l'appareil de même qu'à importer les données et faire le traitement en différé a été développé. Cette section permet de mettre en évidence les capacités de même que le fonctionnement des logiciels développés et utilisés pour chacun des systèmes d'acquisition. De plus, les différentes équations utilisées pour calculer certaines grandeurs sont présentées. Le code des programmes et routines informatiques développés sont présentés en annexe B et C. Le code du logiciel LYRE n'est pas présenté, étant la propriété de SEIDEL inc.

3.2.1 DATA6, le logiciel d'acquisition du système VIORNE [3-3]

Ce programme est nécessaire pour la gestion du système VIORNE, le transfert des données vers l'ordinateur de type PC et les calculs nécessaires au traitement des données. Il a été conçu sous Excel 6.0 pour Windows pour la simplicité de programmation avec Visual Basic pour applications, le nombre d'outils intégrés pour le traitement des nombres et son coût relativement faible.

Pour la gestion du système VIORNE, DATA6 n'est pas le seul logiciel utilisé. La gestion des communications RS-232 est réalisée par le logiciel WINWEDGE alors que la carte d'acquisition est gérée par le logiciel DAPL. DATA6 fait la commande de ces deux logiciels. La Figure 3-3 résume schématiquement l'interaction entre les différents logiciels nécessaires au système VIORNE. L'utilisateur, à l'aide du logiciel d'acquisition DATA6, a la possibilité de modifier les différents paramètres de configuration de l'essai, commander une acquisition en mode manuel ou en mode surveillance de seuil et visualiser les résultats de mesure.

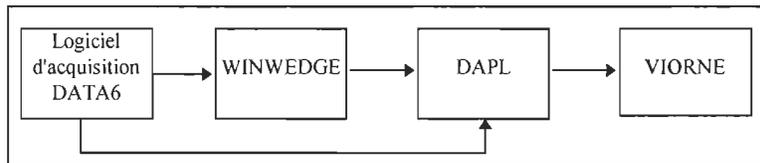


Figure 3-3 Schéma d'interaction entre les différents logiciels composant le système du VIORNE

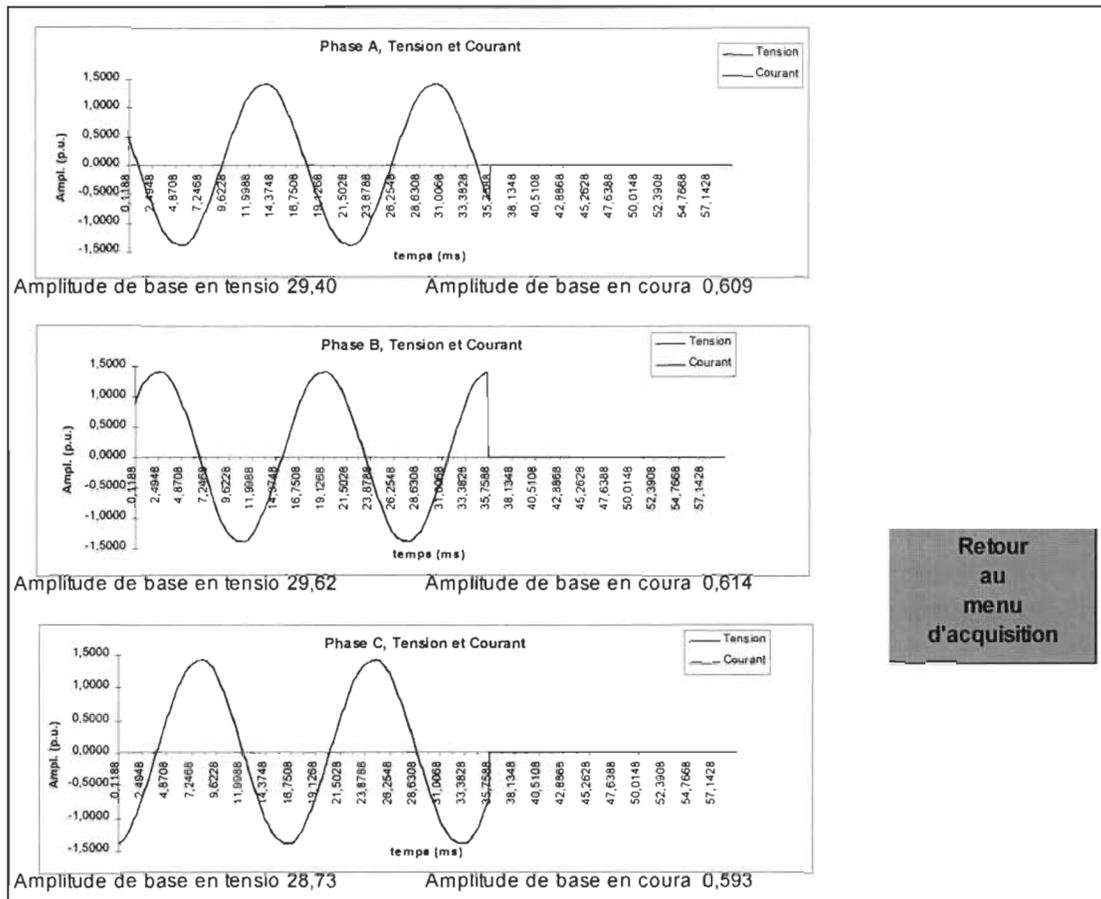
Plusieurs fenêtres servent à modifier la configuration, démarrer une acquisition ou visualiser les résultats. Comme le but de ce mémoire n'est pas de reprendre le manuel d'instructions [3-1], seulement deux fenêtres de résultats sont montrées aux Figure 3-4 et Figure 3-5. Cependant, les instructions du programme de même que la visualisation de toutes les fenêtres sont présentées en annexe B-1.

phase	A (N)	B (N)	C (N)	Unités
S total	17,8972	18,1966	17,0276	VA
P fond	17,8918	18,1893	17,0225	Watt
Q fond	0,2053	0,2541	0,1888	VAR
D	0,3908	0,4471	0,3719	
φ fond	0,66	0,80	0,64	degrés
THD (V)	1,20	1,47	1,13	%
THD (I)	1,82	1,97	1,87	%
FP	1,000	1,000	1,000	
Veff fond	29,395	29,617	28,729	V eff
Ieff fond	0,6087	0,6142	0,5926	A eff
Veff	29,397	29,620	28,731	V eff
Ieff	0,6088	0,6143	0,5927	A eff
Vcm	11,1558	17,5845	-28,4906	V eff
Vsm	-27,1957	23,8319	3,6942	Veff
Icm	0,2375	0,3577	-0,5884	A eff
Ism	-0,5605	0,4993	0,0697	A eff
φ v	2,7523	0,6357	-1,4419	Rad
φ i	2,7408	0,6217	-1,4529	Rad

N
140
0,2918

Retour au menu d'acquisition

Figure 3-4 Tableau des résultats calculés par DATA6



Retour
au
menu
d'acquisition

Figure 3-5 Fenêtre d'affichage des résultats d'acquisition par DATA6

Tel que présenté à la Figure 3-4, le programme DATA6 sous Excel permet de calculer les valeurs suivantes :

- Puissance apparente (VA)
- Puissance active fondamentale
- Puissance réactive fondamentale
- Puissance de distorsion
- Angle de déphasage fondamental tension-courant
- THD en tension et en courant
- Facteur de puissance
- Tension et courant efficace fondamental

Ces valeurs calculées sont les valeurs nécessaires à l'étude des perturbations sur un réseau de distribution électrique. Les équations utilisées pour calculer ces valeurs sont présentées à la section 3.3 et sont utilisées pour traiter les données provenant du VIORNE et du SORBIER.

3.2.2 LYRE et VISION, les logiciels d'acquisition du système SORBIER [3-2]

Comme vu à la section 3.1.2, deux configurations sont possibles dans le but d'effectuer des acquisitions avec le système SORBIER. Deux logiciels différents gèrent la configuration et la commande du système SORBIER dépendant de la configuration utilisée.

Le logiciel faisant la gestion du ou des SORBIER sous réseau windows est appelé LYRE. C'est un programme qui a été conçu à l'aide de Visual Basic. Il permet de commander des acquisitions de trois types : manuelles, par vérification de dépassement de seuil et selon un intervalle de temps programmée. Ce logiciel réalise aussi le transfert de la matrice des données sous format ASCII en créant un fichier texte. Il est possible, en réseau, de gérer jusqu'à 32 appareils SORBIER. La figure 3-6 présente l'interface du logiciel d'acquisition LYRE.

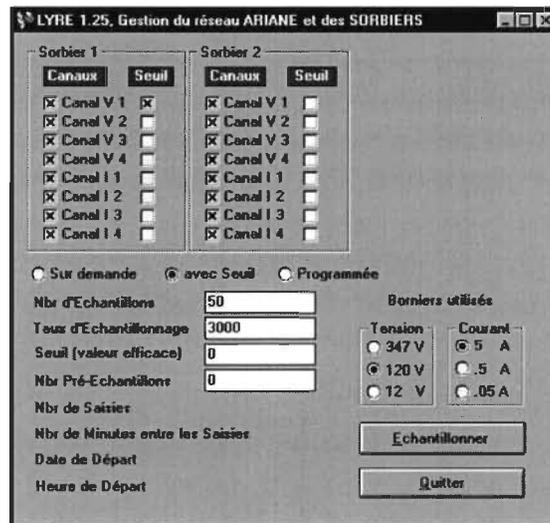


Figure 3-6 Interface du logiciel d'acquisition LYRE

Pour ce qui est de la gestion de l'acquisition en utilisant l'ordinateur de poche PSION, le logiciel servant à gérer la configuration et l'acquisition du SORBIER est appelé VISION. Ce programme a été réalisé en utilisant le langage de programmation compris dans le système d'exploitation du PSION. Il permet de réaliser les mêmes types d'acquisitions qu'en utilisant LYRE à la différence qu'il ne supporte qu'un seul SORBIER. Cette configuration a été conçue dans le but de rendre facile le déplacement du système SORBIER pour effectuer des acquisitions en chantier sans avoir besoin d'un ordinateur de type PC.

3.2.3 Interface MATLAB [3-4] pour le traitement différé des résultats de mesure du système SORBIER

Comme aucun des logiciels utilisant le système SORBIER ne fait le traitement des données, un programme sous MATLAB a été réalisé. Il fonctionne indépendamment du type de configuration

utilisé avec le système SORBIER. Ce programme nommé LYRE.M permet d'afficher les résultats de mesure et de calculer les valeurs requises pour l'analyse d'un phénomène étudié. Ces valeurs calculées sont :

- Valeur efficace fondamentale en tension et en courant
- THD en tension et en courant
- Puissance apparente
- Puissance active fondamentale
- Puissance réactive fondamentale
- Puissance de distorsion
- Facteur de puissance
- Angle de déphasage courant-tension fondamental
- FFT

Les calculs sont effectués sur des périodes entières du signal fondamental pour fournir des résultats les plus exacts possibles. Ces résultats peuvent être sauvegardés dans un fichier sous format ASCII pour références ultérieures. La Figure 3-7 montre l'interface graphique du programme réalisé sous MATLAB et les Figures 3-8 à 3-10 montrent les résultats d'un essai avec deux appareils SORBIER et six canaux par appareil.

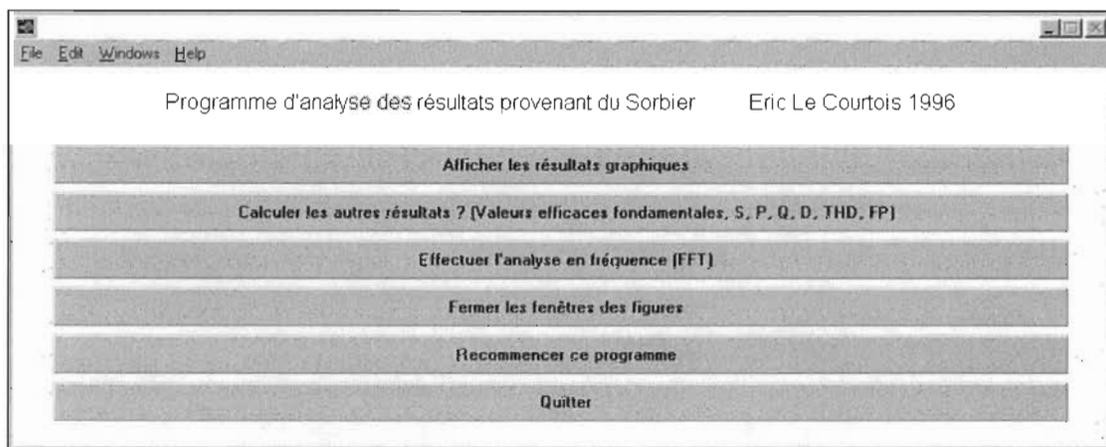


Figure 3-7 Interface du programme sous MATLAB pour l'analyse des données du Sorbier

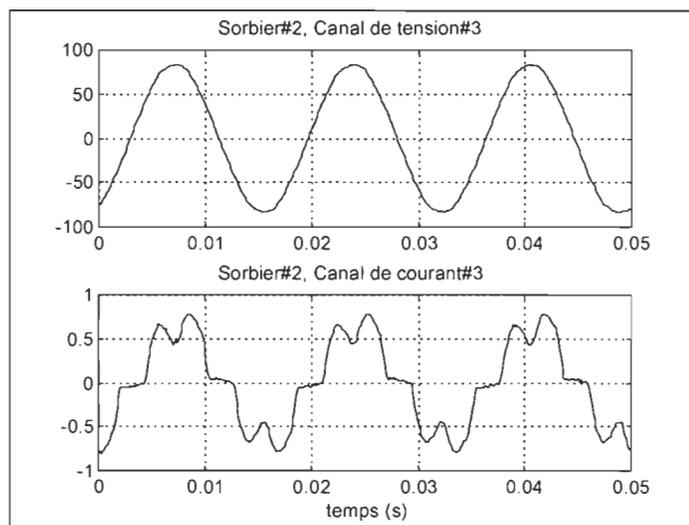


Figure 3-8 Affichage des mesures de tension et courant d'une phase

	eff	THD	phi	FP	S	P	Q	D
S1,V1	31.74	1.221						
S1,I1	0.7972	1.529	-29.14	0.8734	25.3	25.3	0	0.495
S1,V2	32.25	1.161						
S1,I2	0.8138	1.59	-29.16	0.8733	26.24	26.24	0	0.5165
S1,V3	31.27	1.057						
S1,I3	0.7885	1.718	330.7	0.8721	24.65	24.65	0	0.4971
S1,V4	0	0						
S1,I4	0	0	0	0	0	0	0	0
S2,V1	59.11	1.609						
S2,I1	0.4729	31.91	-1.512	0.9997	27.95	26.63	0	8.509
S2,V2	59.8	1.541						
S2,I2	0.5313	27.01	-4.041	0.9975	31.77	30.67	0	8.297
S2,V3	59.2	1.298						
S2,I3	0.4896	30	-9.134	0.9873	28.98	27.76	0	8.335
S2,V4	0	0						
S2,I4	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 3-9 Résultats calculés pour une session utilisant deux SORBIER et douze canaux

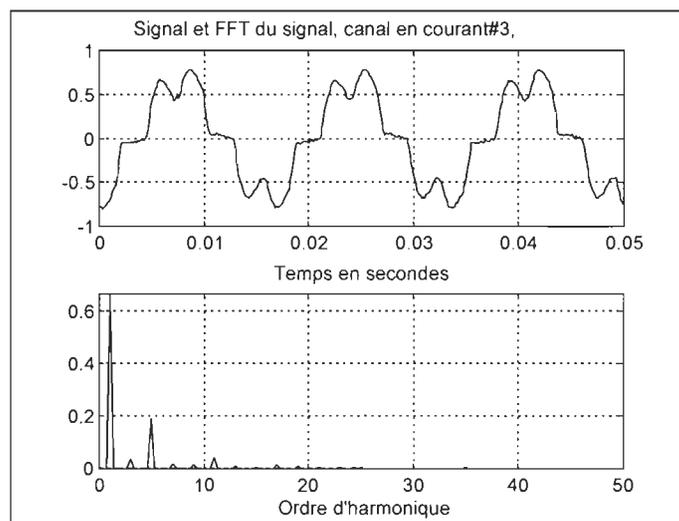


Figure 3-10 Analyse de Fourier par FFT

3.3 Équations utilisées

Afin de calculer les valeurs nécessaires à l'étude des perturbations, plusieurs équations ont été utilisées. Cette section rapporte les différentes étapes de calcul incorporées dans le logiciel DATA6 de même que dans le programme développé sous MATLAB pour les données provenant du système SORBIER. Afin de maintenir une certaine cohérence, la sous-section suivante présente une liste détaillée de la nomenclature utilisée pour exprimer les équations développées.

3.3.1 Nomenclature

- P_T : Nombre de périodes complètes échantillonnées de la fréquence de base du signal
- N : Nombre d'échantillons acquis correspondant à P_T périodes
- T_e : Période d'échantillonnage
- f_{base} : Fréquence de base du signal (60Hz)
- i : Compteur du nombre d'éléments (de 1 à N)
- v : Valeur instantanée de la tension
- V : Tension
- I : Courant
- X : Grandeur (tension ou courant) (V ou I)
- X_{cm} : Composants d'amplitude des ondes paires de la décomposition en séries de Fourier
(V_{cm} ou I_{cm})
- X_{eff} : Valeur efficace (tension ou courant)
- $X_{eff_{fond}}$: Valeur efficace fondamentale (courant)
- X_{sm} : Composants d'amplitude des ondes impaires de la décomposition en séries de Fourier
(V_{sm} ou I_{sm})
- S : Puissance apparente

- P : Puissance active fondamentale
- Q : Puissance réactive fondamentale
- D : Puissance de distorsion
- φ : Angle de déphasage tension-courant fondamental
- PF : Facteur de puissance

3.3.2 Introduction

Selon l'équation 3-1 représentant la décomposition de Fourier, il est possible de représenter un signal quelconque (dont la valeur absolue est limitée) par une sommation de signaux parfaitement sinusoïdaux et un signal constant.

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3-1)$$

Il est aussi possible d'écrire $v(t)$ sous la forme présentée à l'équation 3-2

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3-2)$$

$$\text{où } C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} ; \varphi_n = \text{tg}^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

C_n représente la valeur crête de la $n^{\text{ième}}$ harmonique et φ_n , la phase de la $n^{\text{ième}}$ harmonique. Pour notre analyse, remplaçons a_n par V_{cm} , I_{cm} ou X_{cm} et b_n par V_{sm} , I_{sm} ou X_{sm} . De plus, comme l'analyse est basée sur une forme d'onde à composante continue nulle, a_0 est donc posée nulle. De ces équations, il est possible de retrouver l'équivalence pour les valeurs recherchées en mode échantillonné tel que données par les équations 3-3 à 3-15.

3.3.3 Calcul de X_{sm} et X_{cm} , les composantes d'amplitude de la décomposition en série de Fourier

$$X_{cm} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X_i \cos(2\pi f_{\text{base}} T_{\acute{e}} i) \quad (3-3)$$

$$X_{sm} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X_i \sin(2\pi f_{\text{base}} T_{\acute{e}} i) \quad (3-4)$$

3.3.4 Calcul de la valeur efficace de la tension et du courant

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N}} \quad (3-5)$$

$$X_{eff_{fond}} = \sqrt{\frac{X_{cm}^2 + X_{sm}^2}{2}} \quad (3-6)$$

3.3.5 Calcul du THD de la tension et du courant

$$THD(X) = 100 \sqrt{\frac{(X_{eff})^2 - (X_{eff_{fond}})^2}{(X_{eff_{fond}})^2}} \quad (\%) \quad (3-7)$$

3.3.6 Calcul du déphasage entre la fondamentale de la tension et la fondamentale du courant, φ

$$\varphi_v = \text{tg}^{-1}\left(\frac{V_{cm}}{V_{sm}}\right) \quad (3-8)$$

$$\varphi_i = \text{tg}^{-1}\left(\frac{I_{cm}}{I_{sm}}\right) \quad (3-9)$$

$$\varphi = \varphi_v - \varphi_i \quad (3-10)$$

3.3.7 Calcul du facteur de puissance de la fondamentale (PF)

$$PF = \cos(\varphi) \quad (3-11)$$

3.3.8 Calcul de la puissance apparente, S

$$S = V_{eff} \times I_{eff} \quad (3-12)$$

3.3.9 Calcul de la puissance active fondamentale, P

$$P = V_{eff_{fond}} \times I_{eff_{fond}} \times \cos(\varphi) \quad (3-13)$$

3.3.10 Calcul de la puissance réactive fondamentale, Q

$$Q = V_{eff_{fond}} \times I_{eff_{fond}} \times \sin(\varphi) \quad (3-14)$$

3.3.11 Calcul de la puissance de distorsion, D

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (3-15)$$

Les routines pour résoudre les équations sont implantées au niveau des logiciels de traitement de données correspondant à chacun des deux systèmes d'acquisition. Grâce à ces routines, il est maintenant possible d'évaluer certains phénomènes reliés aux perturbations. Les codes de ces routines MATLAB sont fournis en annexe B pour le système du VIORNE et en annexe C pour le système du SORBIER.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une brève description de deux systèmes d'acquisition, VIORNE et SORBIER. Ces appareils ont été conçus sur mesure selon les besoins particuliers de notre étude en collaboration avec le fournisseur. Des logiciels pour le traitement des données recueillies lors d'acquisitions ont été conçus et ont été présentés dans ce chapitre en plus des équations nécessaires au calcul de diverses grandeurs.

CHAPITRE 4

4. Résultats d'étude de différents phénomènes à l'aide du BEEP

4.1 Introduction

Certains phénomènes pouvant être retrouvés sur un réseau de distribution d'énergie électriques sont intéressants à étudier. Ces phénomènes sont :

- Étude d'enclenchement de condensateurs de charge (compensateurs statiques)
- Étude de déclenchement de condensateurs de charge (compensateurs statiques)
- Étude d'enclenchement de charges inductives
- Étude de perte de la ligne d'un consommateur triphasé
- Étude de la propagation des harmoniques

Cependant, les phénomènes pouvant être étudiés à l'aide du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP") sont présentement restreints par deux facteurs. Premièrement, l'étude de phénomènes tel une chute de tension d'une durée de l'ordre de trois à cinq cycles ou une hausse de tension d'une durée du même ordre ne peut être expérimenté dû à des contraintes des équipements. En effet, afin d'expérimenter un événement tel qu'une chute de tension momentanée, un diviseur de tension avec disjoncteur temporel est nécessaire pour faire chuter la tension durant une période de temps définie. Jusqu'à présent, un tel dispositif n'a pas encore été conçu. De plus, l'acquisition en mode de surveillance n'est possible que si le signal du canal surveillé dépasse un certain seuil. Or, ce type de surveillance ne permet pas la détection d'un signal diminuant en intensité. Pour cette raison, un déclenchement du système d'acquisition de données lors de la perte d'un consommateur triphasé ou du déclenchement d'une batterie de condensateurs est impossible à détecter car le signal surveillé diminue. Pour ces raisons, les études réalisées grâce au banc d'essai BEEP sont de trois types suivant le montage présenté à la figure 4-1:

- Régime permanent
- Enclenchement d'une batterie de condensateurs triphasée (SWC)
- Enclenchement d'une batterie d'inductances triphasée (SWL)

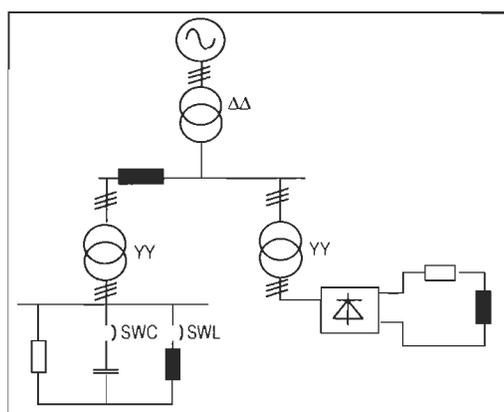


Figure 4-1 Schéma unifilaire du montage utilisé pour le BEEP et SIMUBEEP

La Figure 2-1 présente les endroits de mesure des signaux présentés dans cette étude. Il est à remarquer que la Chaire de recherche industrielle CPEE a tout dernièrement fait l'acquisition de deux sources de puissance programmables qui pourront être employées afin de recréer les types de transitoires qui n'ont pas été étudiées dans la présente étude.

Ce chapitre présente donc les résultats obtenus à partir de ces essais réalisés. Le chapitre 8 propose une étude par simulation numérique de quelques phénomènes pour fins de comparaisons. La comparaison des résultats obtenus par expérimentations à l'aide du BEEP et par simulation à l'aide de SIMUBEEP sont présentés au chapitre 9.

4.2 Régime permanent

Pour évaluer le régime établi, la charge linéaire présente est principalement résistive (voir figure 4-1). Les valeurs des impédances de charge sont présentées à la section 2.3.3. Cet essai permet de visualiser l'état du système en régime établi. Il offre la possibilité de visualiser les différents signaux, d'étudier les résultats calculés :

- THD en tension et en courant
- Tension et courant efficace
- Angle de déphasage entre la fondamentale de tension et la fondamentale de courant
- Facteur de puissance fondamental
- Puissance apparente
- Puissance active fondamentale
- Puissance réactive fondamentale
- Puissance de distorsion

De plus, une analyse de Fourier est effectuée pour déterminer l'amplitude des principales harmoniques.

Les courbes des signaux échantillonnés sont présentés aux figures 4-2 à 4-7, le tableau des résultats calculés correspond au tableau 4-1 et les figures correspondant à l'analyse harmonique sont présentées aux figures 4-8 à 4-13. La tension triphasée mesurée est la tension d'alimentation des charges. Le courant triphasé mesuré est le courant total des charges (voir Figure 2-1 pour les points de mesure).

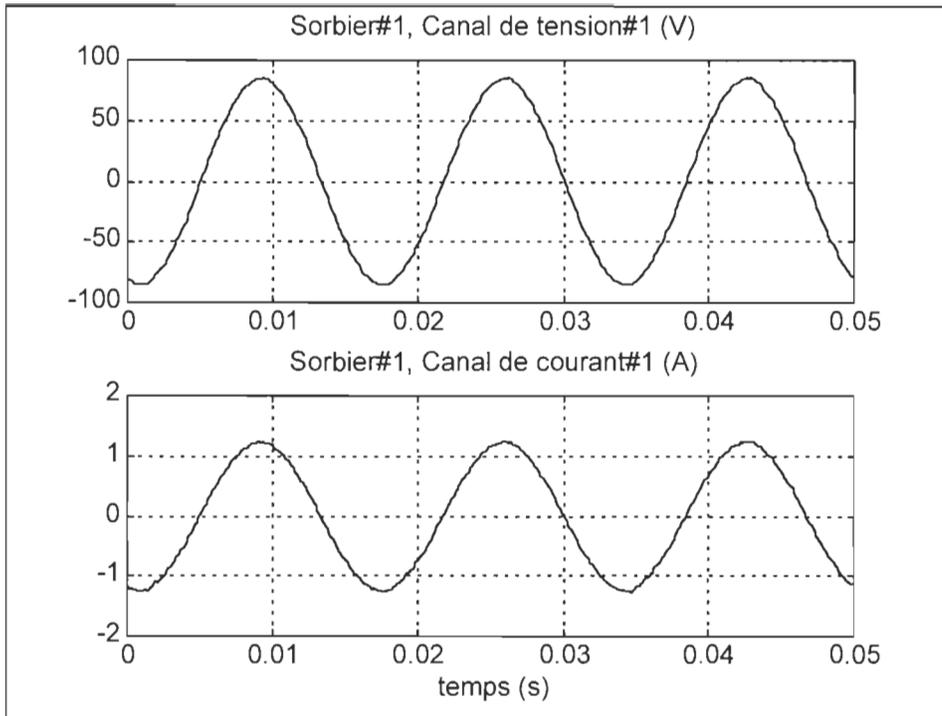


Figure 4-2 Régime permanent, tension et courant, phase A, charge linéaire (voir figure 2-1)

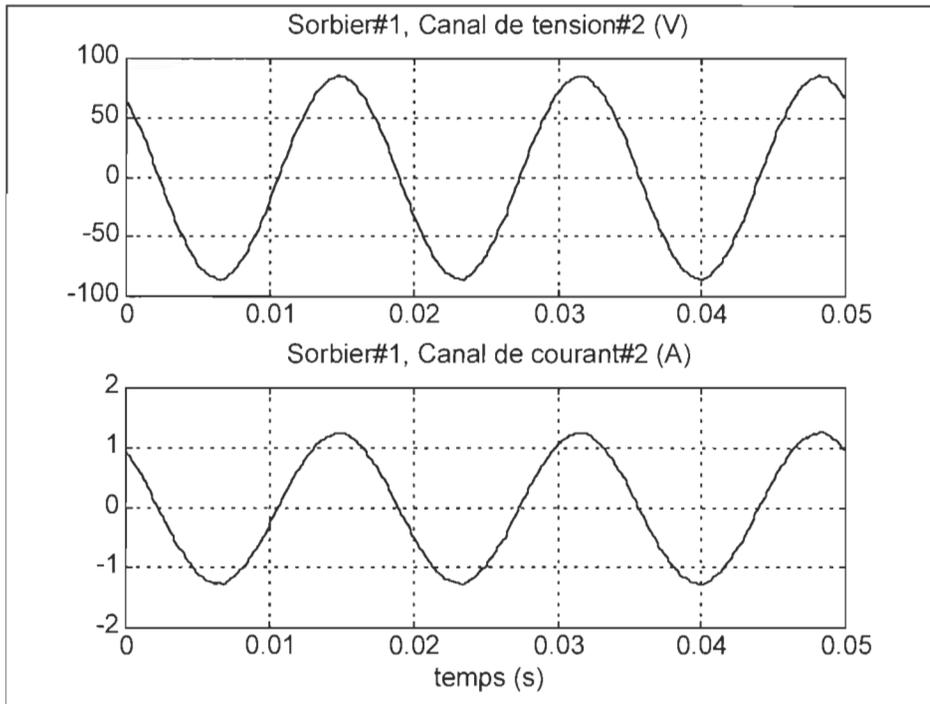


Figure 4-3 Régime permanent, tension et courant, phase B, charge linéaire (voir figure 2-1)

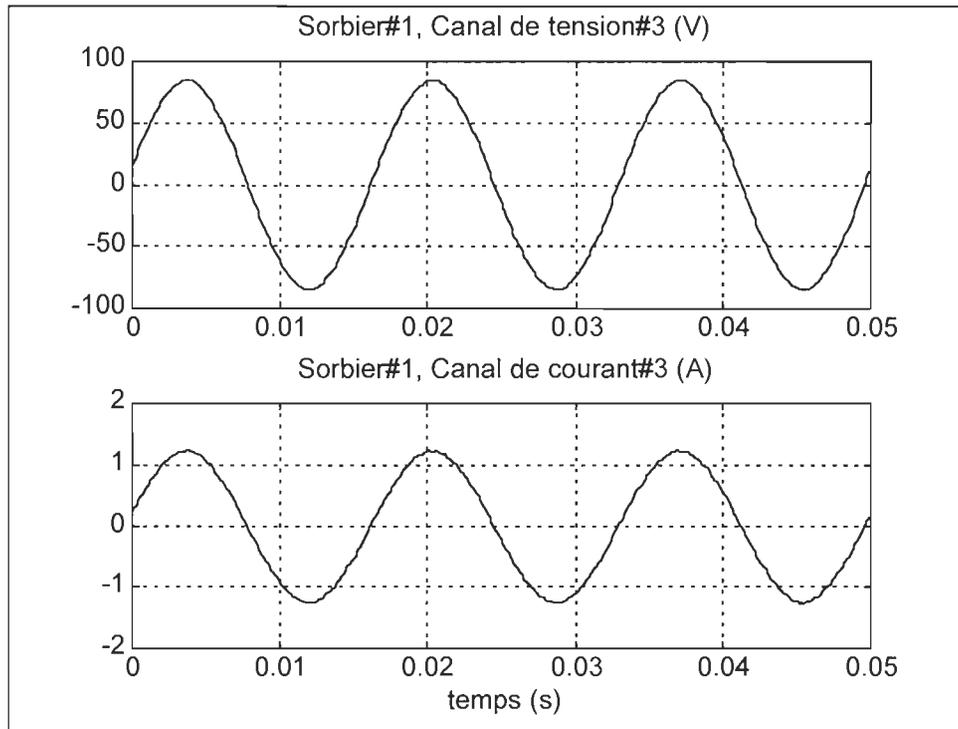


Figure 4-4 Régime permanent, tension et courant, phase C, charge linéaire (voir figure 2-1)

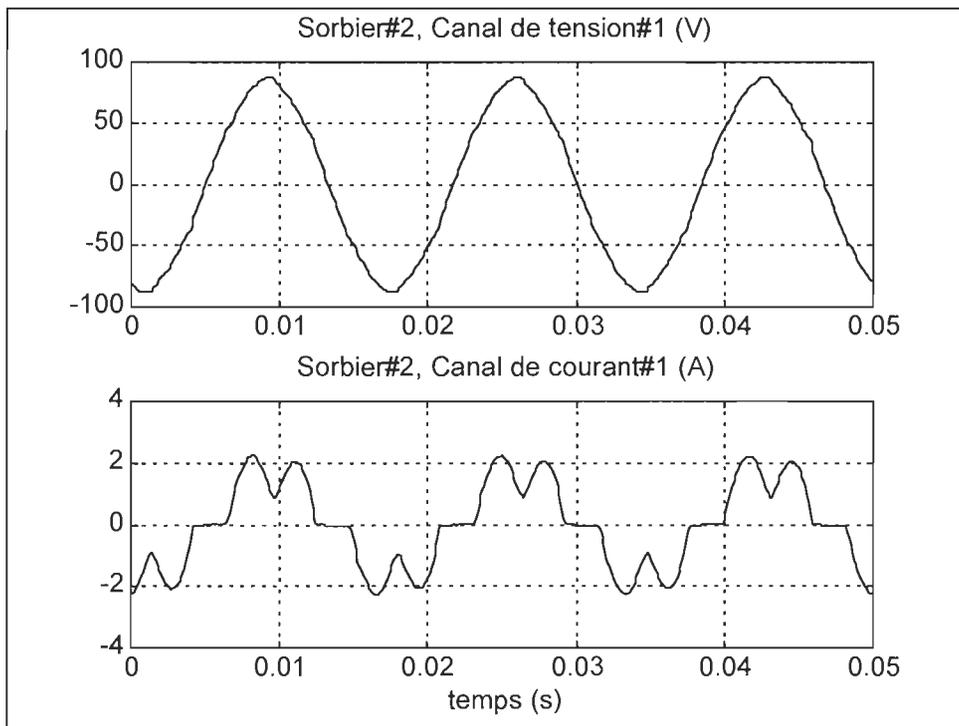


Figure 4-5 Régime permanent, tension et courant, phase A, charge non linéaire (voir figure 2-1)

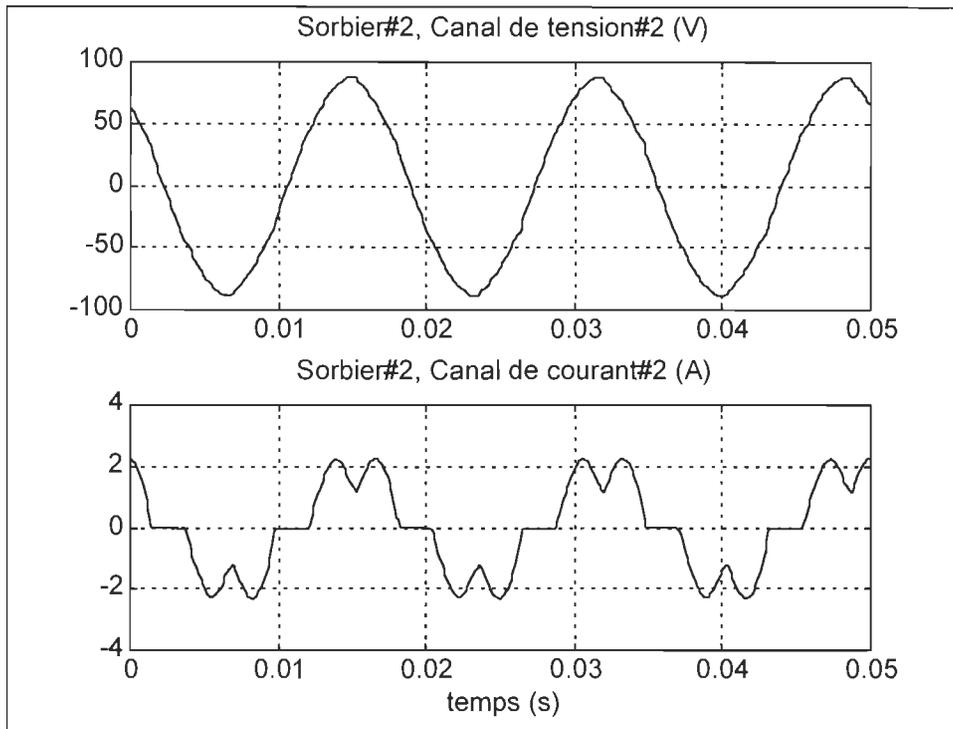


Figure 4-6 Régime permanent, tension et courant, phase B, charge non linéaire (voir figure 2-1)

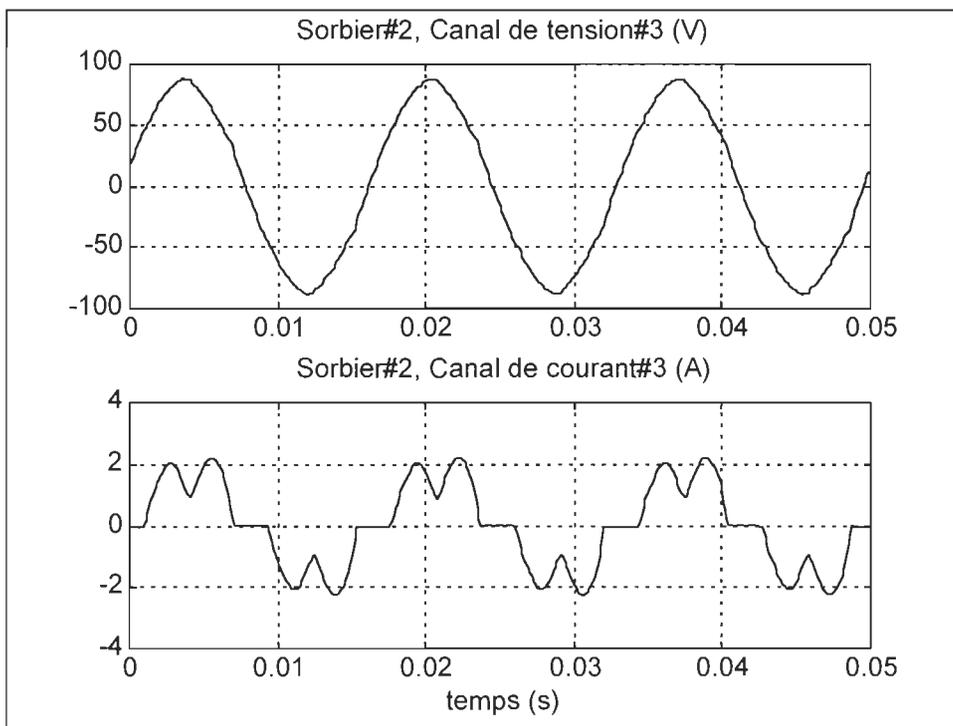


Figure 4-7 Régime permanent, tension et courant, phase B, charge non linéaire (voir figure 2-1)

Tableau 4-1 Régime permanent, résultats calculés

	eff	%THD	Phi(°)	FP	S(VA)	P(W)	Q(VAR)	D(VA)
S1,V1	59.91 V	1.153						
S1,I1	0.872 A	1.581	0.7711	0.9999	52.24	52.23	0	1.022
S1,V2	60.09 V	1.2						
S1,I2	0.8839 A	1.566	0.3515	1	53.12	53.11	0	1.048
S1,V3	59.75 V	1.183						
S1,I3	0.8727 A	1.653	0.1851	1	52.14	52.13	0	1.06
S1,V4	0	0						
S1,I4	0	0	0	0	0	0	0	0
S2,V1	60.47 V	2.483						
S2,I1	1.377 A	37.02	-5.821	0.9948	83.23	78.03	0	28.96
S2,V2	61.03 V	2.424						
S2,I2	1.466 A	32.29	-8.63	0.9887	89.44	85.09	0	27.56
S2,V3	60.77 V	2.5						
S2,I3	1.366 A	36.19	-11.11	0.9813	83.01	78.04	0	28.31
S2,V4	0	0						
S2,I4	0	0	0	0	0	0	0	0

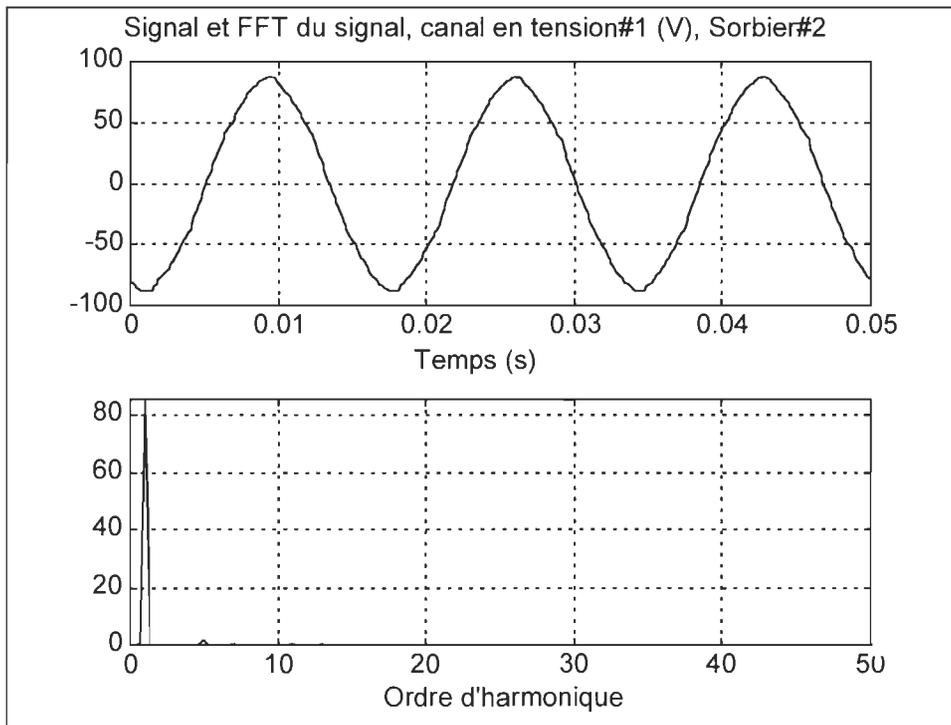


Figure 4-8 Régime permanent, tension et analyse harmonique, phase A, charge non linéaire (voir figure 2-1)

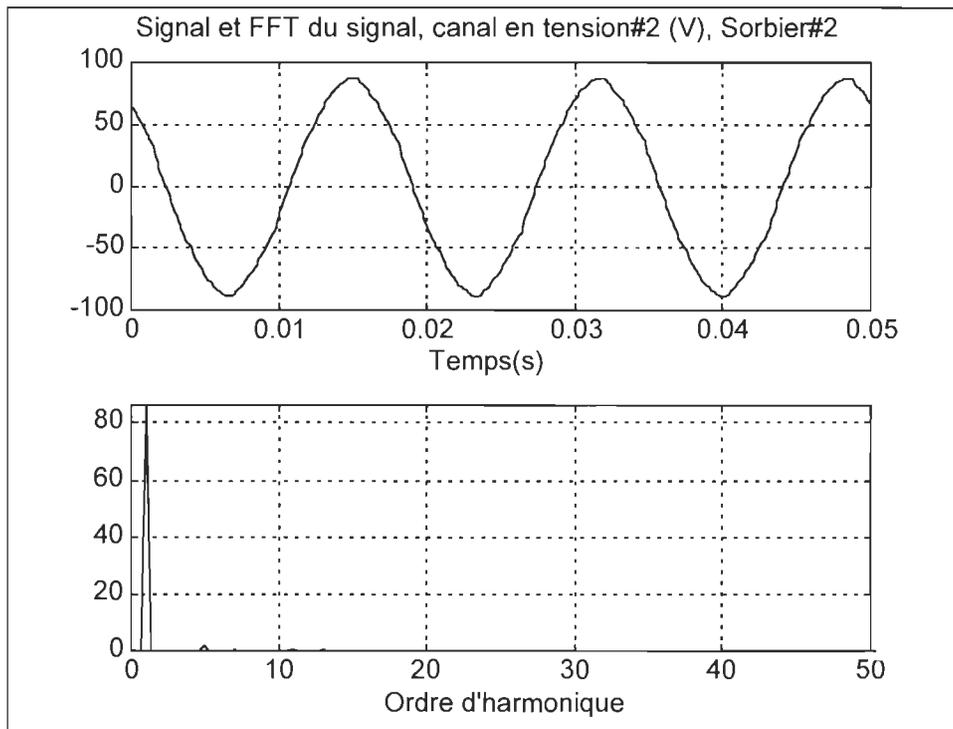


Figure 4-9 Régime permanent, tension et analyse harmonique, phase B, charge non linéaire (voir figure 2-1)

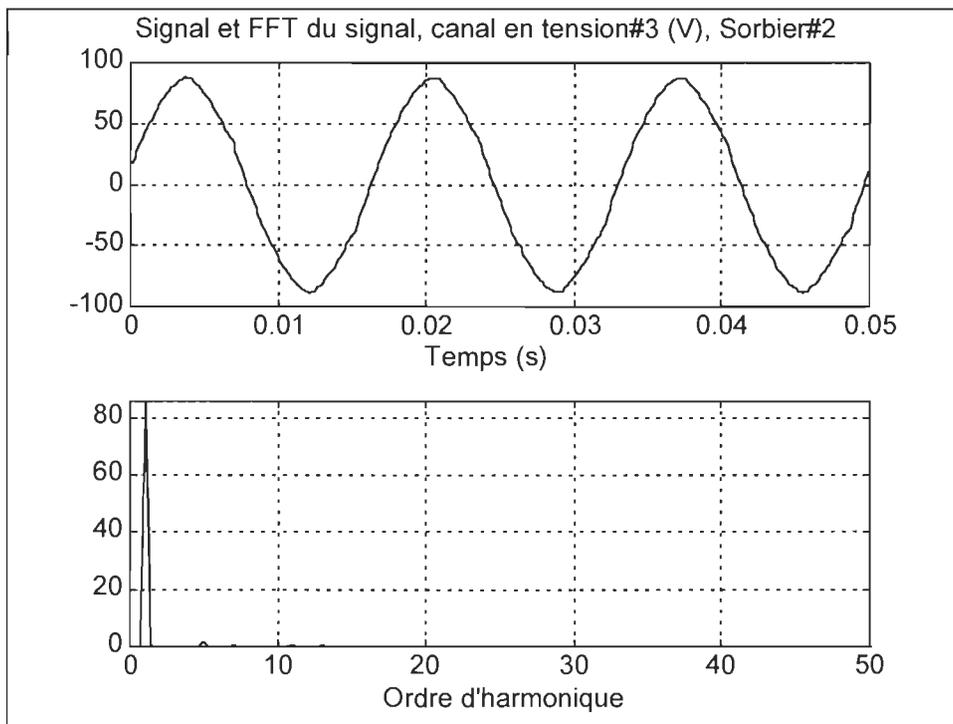


Figure 4-10 Régime permanent, tension et analyse harmonique, phase C, charge non linéaire (voir figure 2-1)

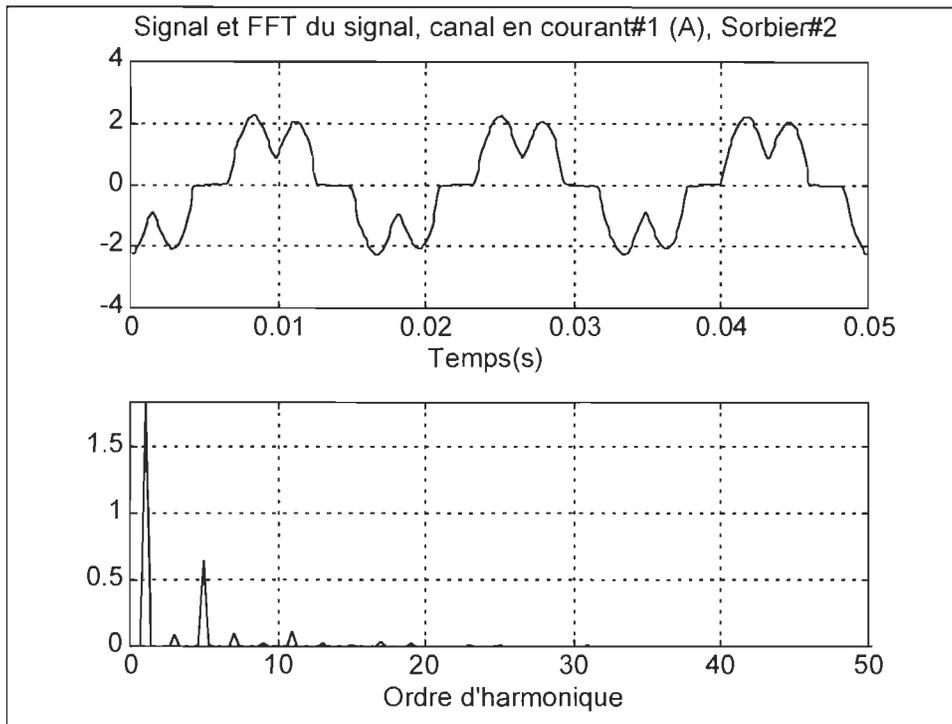


Figure 4-11 Régime permanent, courant et analyse harmonique, phase A, charge non linéaire (voir figure 2-1)

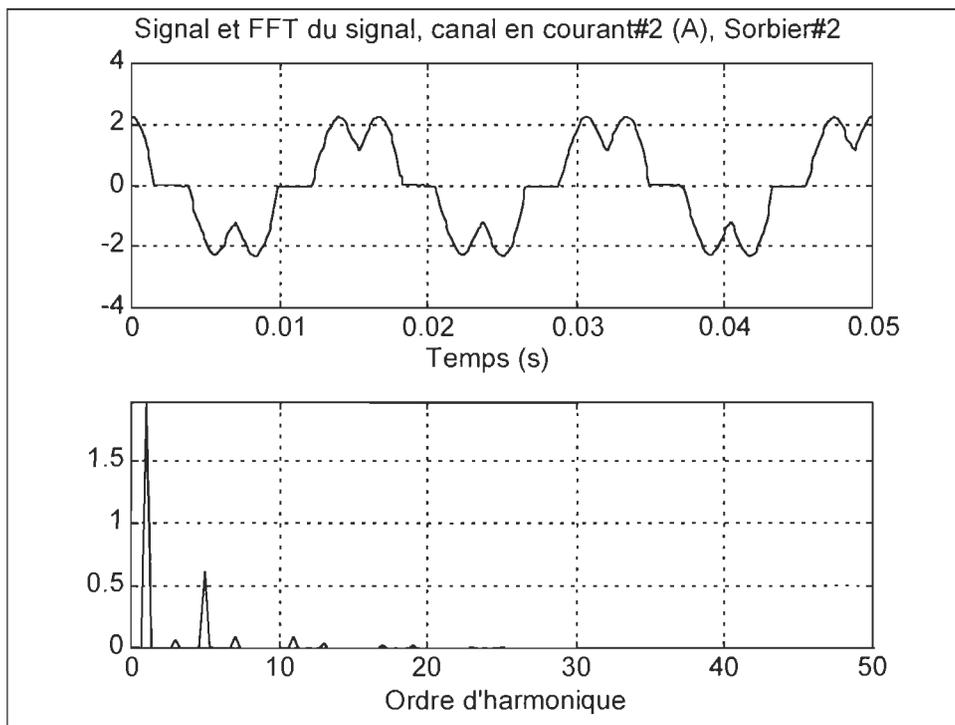


Figure 4-12 Régime permanent, courant et analyse harmonique, phase B, charge non linéaire (vois figure 2-1)

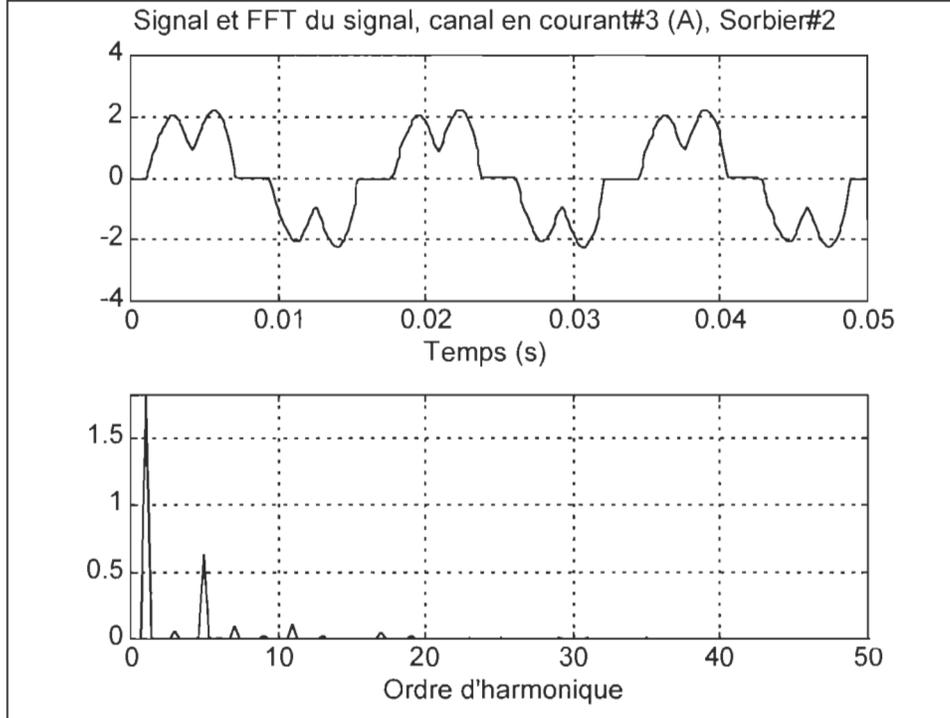


Figure 4-13 Régime permanent, courant et analyse harmonique, phase C, charge non linéaire (voir figure 2-1)

4.3 Enclenchement d'une batterie de condensateurs (compensateur statique)

La charge étant principalement résistive triphasée en régime permanent (voir Figure 4-1), une batterie de condensateurs est enclenchée, simulant l'entrée en fonction d'un compensateur statique. Les valeurs des impédances de charge sont présentées à la section 2.3.3. Cet enclenchement simultané sur les trois phases provoque une onde transitoire de la tension d'alimentation qui est propagée, à travers le transformateur principal vers la charge non linéaire. L'analyse harmonique et le calcul des résultats ne sont pas présentés dans cette section car ces calculs ne s'appliquent qu'à un signal périodique. Ce qui n'est pas le cas pour cet essai où nous ne nous intéressons qu'au régime transitoire créé par cet enclenchement. Les résultats de l'essai sont présentés aux figures 4-14 à 4-19. La tension triphasée mesurée est la tension d'alimentation des charges. Le courant triphasé mesuré est le courant total des charges (voir Figure 2-1 pour les points de mesure).

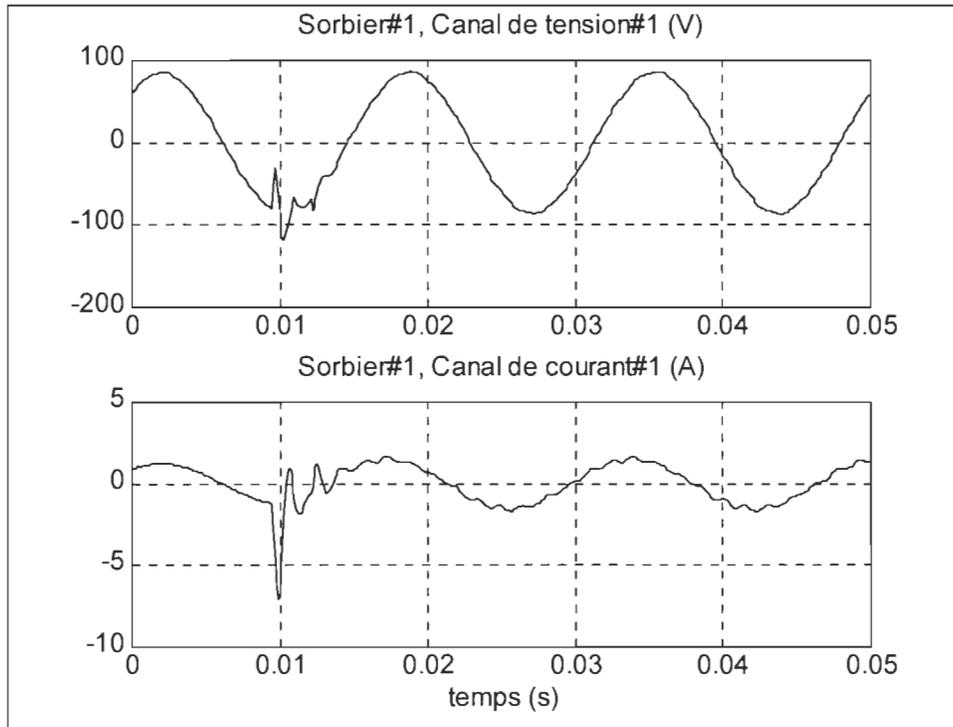


Figure 4-14 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase A, charge linéaire (voir figure 2-1)

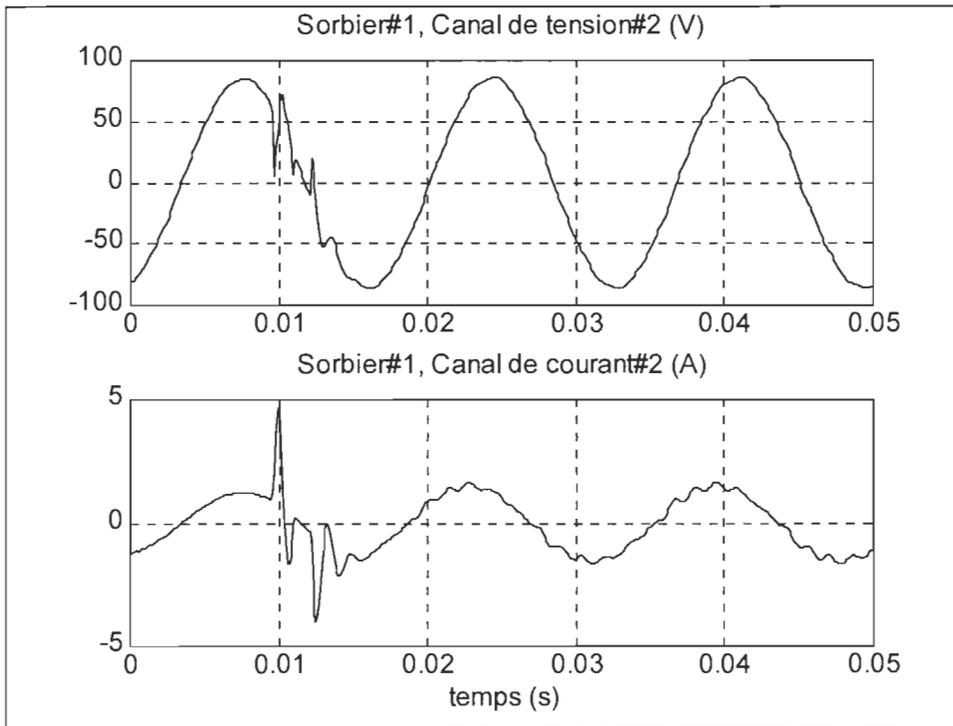


Figure 4-15 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase B, charge linéaire (voir figure 2-1)

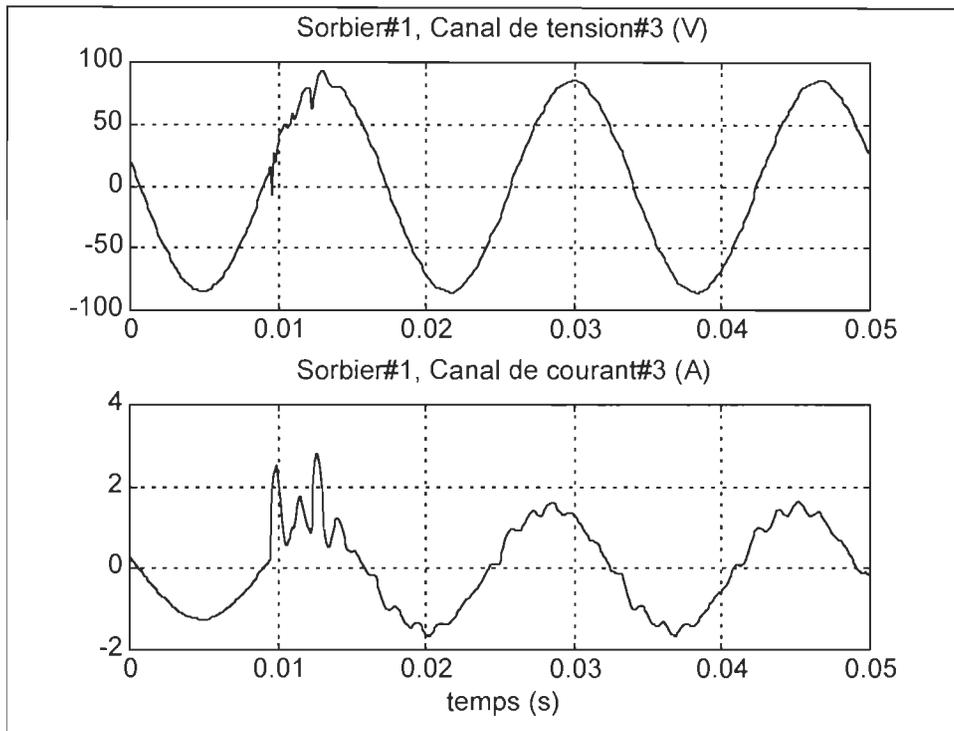


Figure 4-16 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase C, charge linéaire (voir figure 2-1)

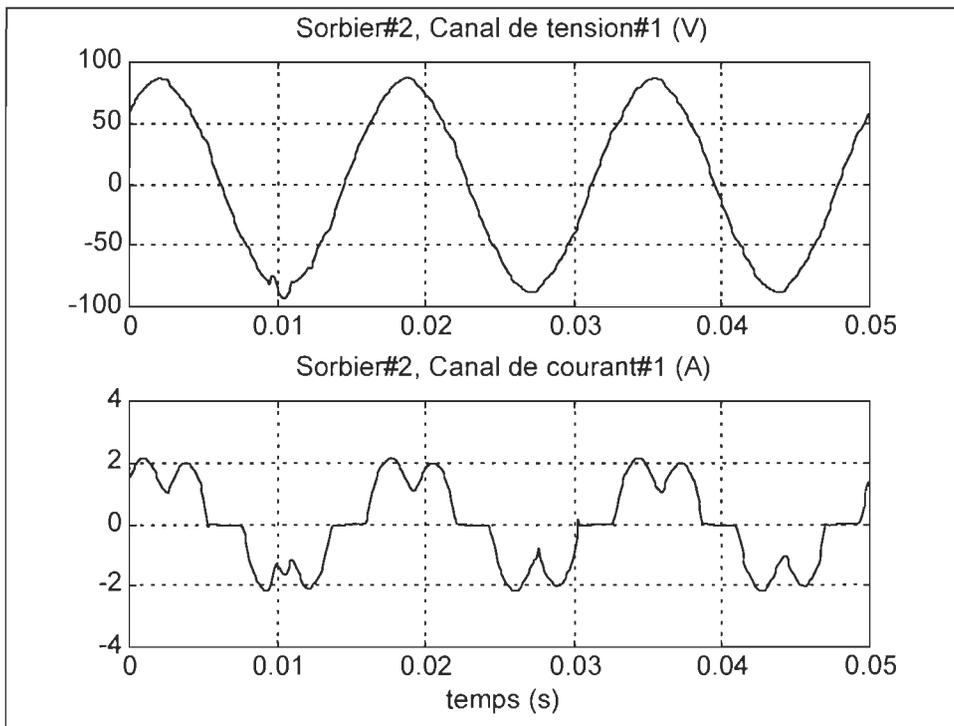


Figure 4-17 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase A, charge non linéaire (voir figure 2-1)

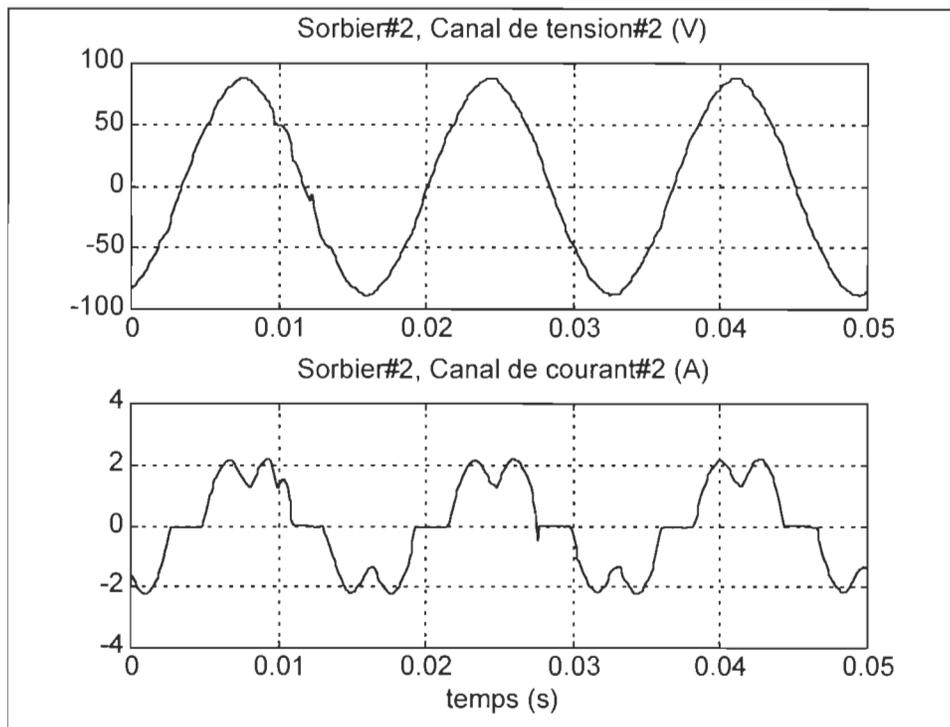


Figure 4-18 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase B, charge non linéaire (voir figure 2-1)

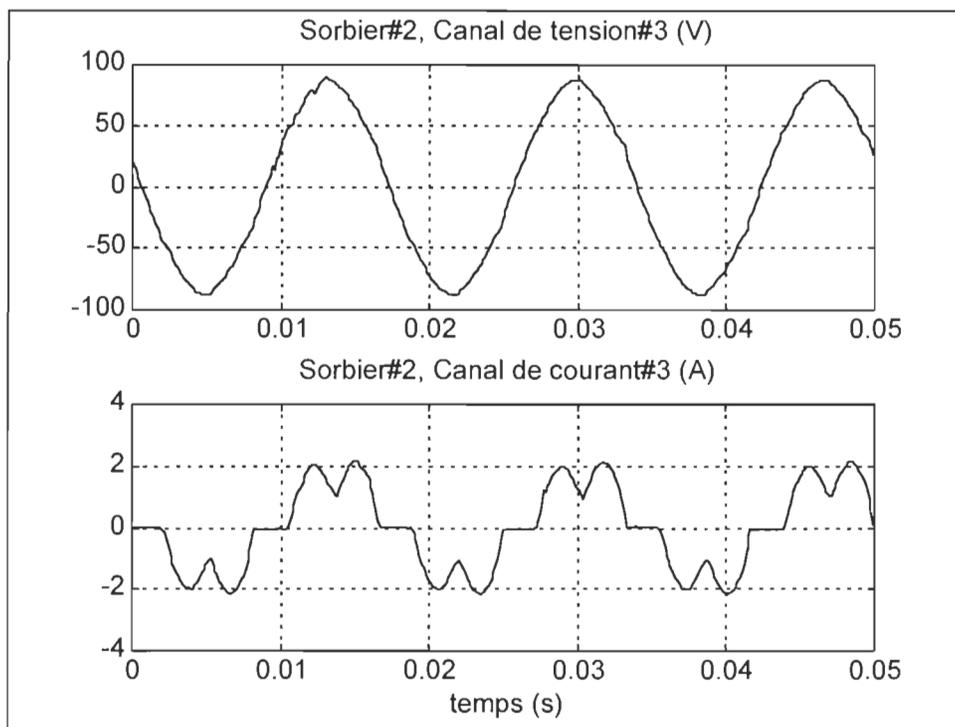


Figure 4-19 Enclenchement d'une batterie de condensateurs, tension et courant, phase C, charge non linéaire (voir figure 2-1)

4.4 Enclenchement d'une charge inductive triphasée

La charge étant principalement résistive triphasée en régime permanent (voir Figure 4-1), une charge inductive triphasée est enclenchée. Les valeurs des impédances de charge sont présentées à la section 2.3.3. Cet enclenchement simultané sur les trois phases provoque un état transitoire du courant de la charge linéaire. Cependant, la tension d'alimentation n'étant pas perturbée d'une façon apparente, la charge non linéaire ne subit pas d'effet d'un tel phénomène transitoire. Les signaux des tensions et des courants pour le système triphasé de la charge linéaire et de la charge non linéaire sont présentés aux figures 4-20 à 4-25. L'analyse harmonique et le calcul des résultats ne sont pas présentés dans cette section car ces calculs ne s'appliquent qu'à un signal périodique. Ce qui n'est pas le cas pour notre essai où nous nous intéressons qu'au régime transitoire créé par cet enclenchement. La tension triphasée mesurée est la tension d'alimentation des charges. Le courant triphasé mesuré est le courant total des charges (voir Figure 2-1 pour les points de mesure).

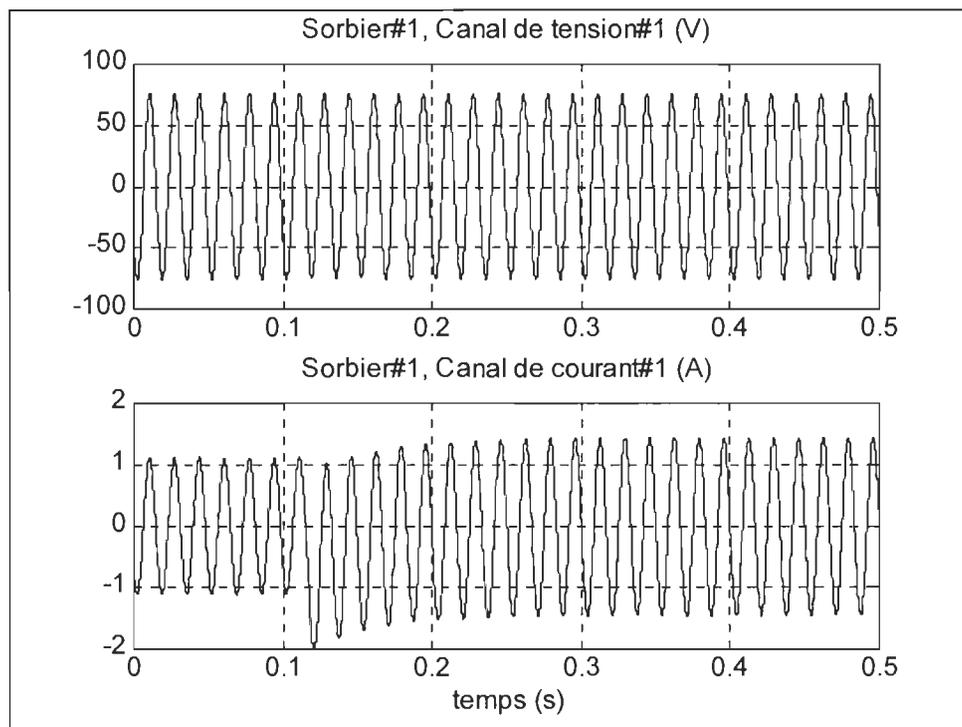


Figure 4-20 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase A, charge linéaire (voir figure 2-1)

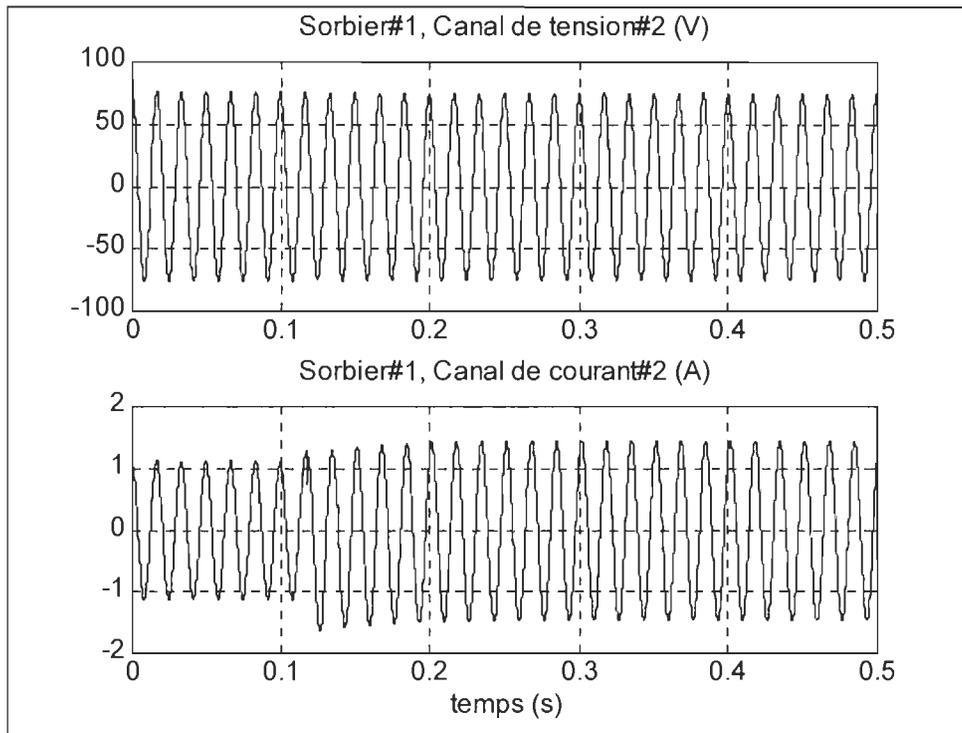


Figure 4-21 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase B, charge linéaire (voir figure 2-1)

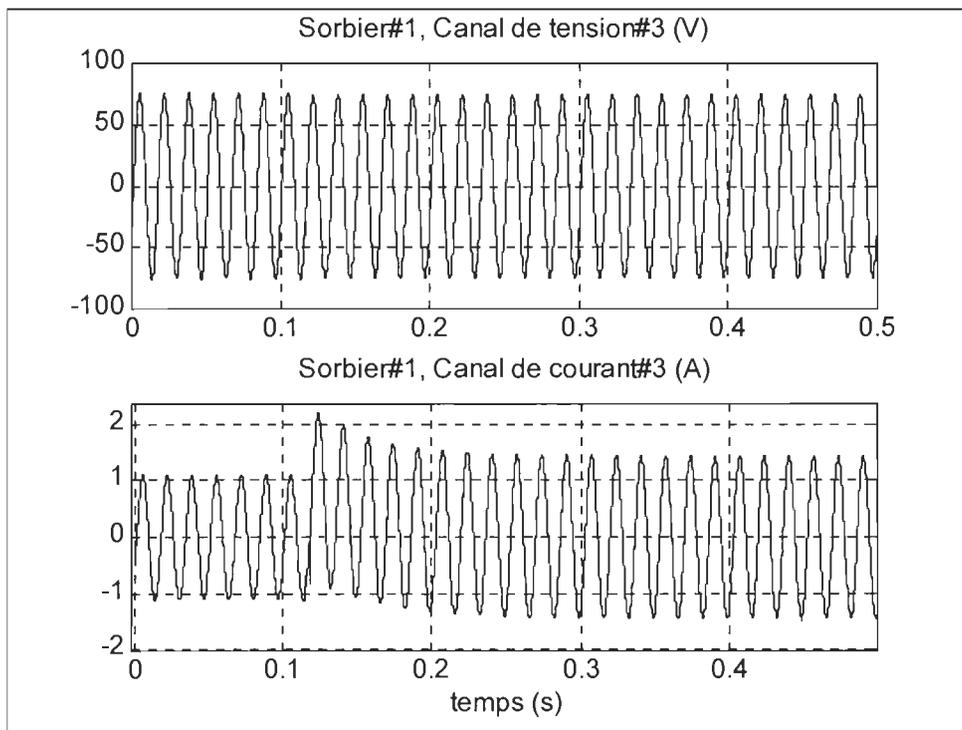


Figure 4-22 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase C, charge linéaire (voir figure 2-1)

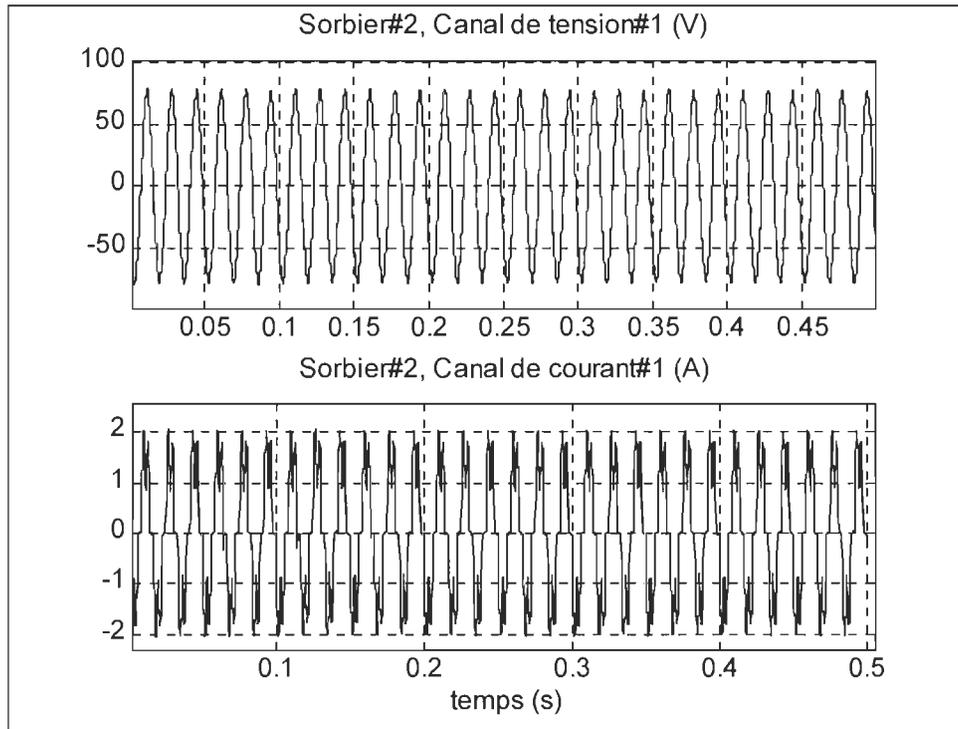


Figure 4-23 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase A, charge non linéaire (voir figure 2-1)

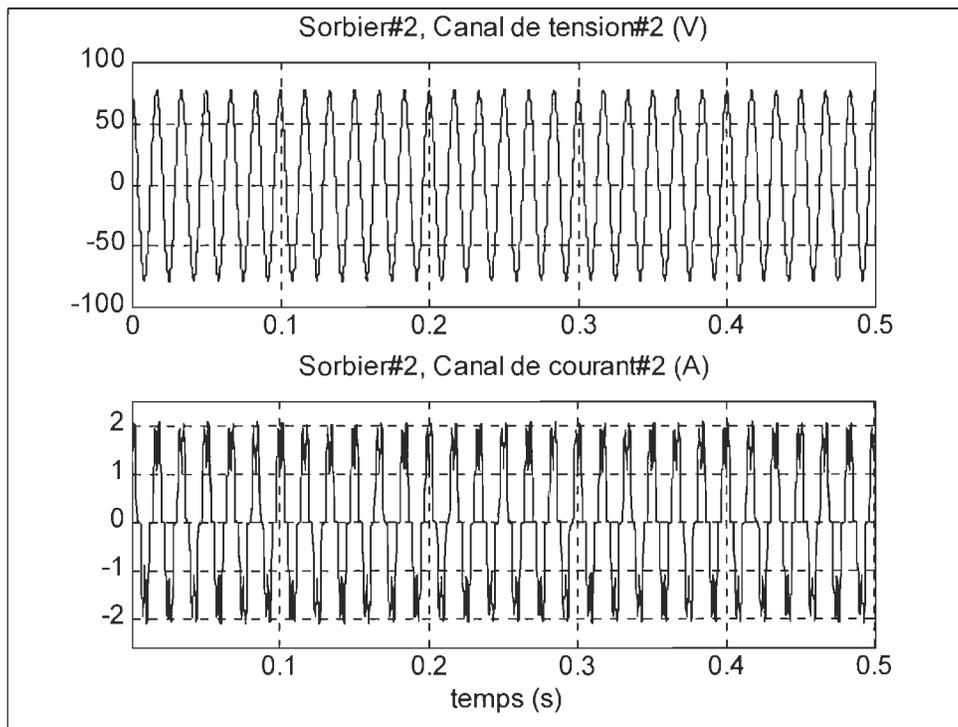


Figure 4-24 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase B, charge non linéaire (voir figure 2-1)

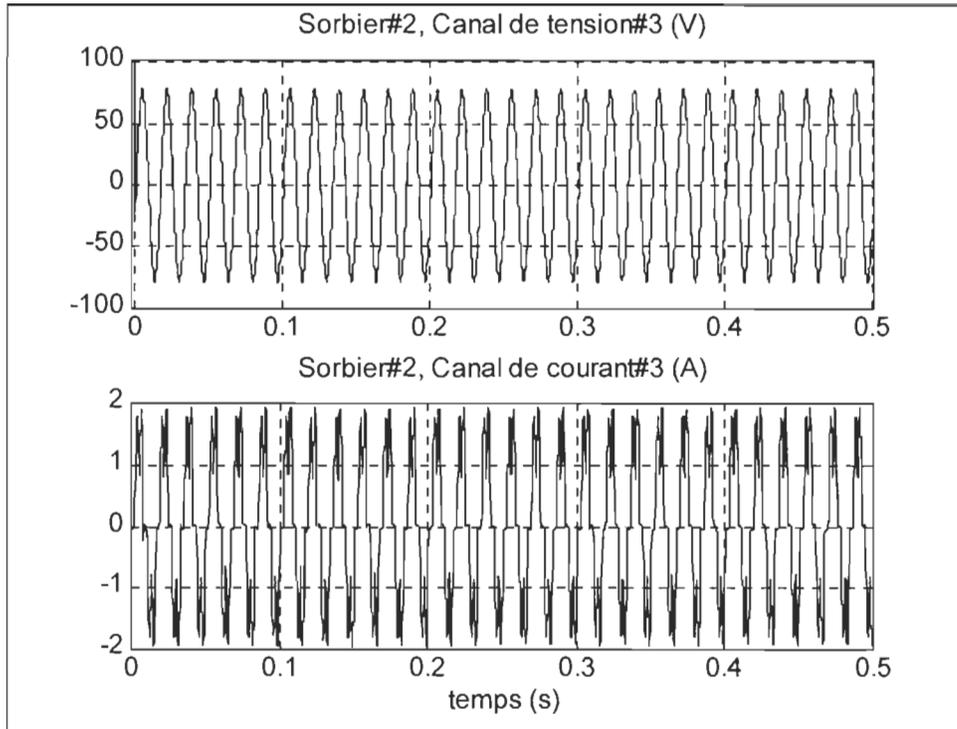


Figure 4-25 Enclenchement d'une charge inductive, tension et courant, phase C, charge non linéaire (voir figure 2-1)

4.5 Conclusion

Certains phénomènes ont été étudiés à l'aide du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP"). Les résultats sont présentés dans cette section et les comparaisons de ces résultats et de ceux obtenus en utilisant la librairie de simulation SIMUBEEP est présentée au chapitre 9 du présent document.

CHAPITRE 5

5. Logiciels de simulation en électronique de puissance

5.1 Introduction

Avec l'avènement des ordinateurs personnels et le développement rapide de ces calculateurs puissants, l'ingénieur a maintenant la possibilité d'étudier différents phénomènes d'une façon efficace en modélisant et simulant divers procédés. En électronique de puissance comme dans tous les autres domaines, des simulateurs puissants sont conçus et utilisés, permettant un moyen rapide d'analyse de phénomènes complexes. Ce chapitre ne fournit pas une liste exhaustive des simulateurs disponibles ni une explication détaillée des modèles et des algorithmes utilisés pour ces simulateurs. Ce chapitre se veut un survol des simulateurs principaux utilisés en électronique de puissance et dans le domaine de l'analyse des phénomènes liés à la production, la distribution et la consommation de l'énergie électrique.

5.2 Simulateurs en électronique de puissance

En électronique de puissance, plusieurs simulateurs ont été développés dans le but d'analyser et développer de nouvelles méthodes de conversion de l'énergie électrique. Ces simulateurs permettent, entre autre, de bien cerner les différents problèmes liés au développement de nouvelles technologies et les répercussions, sur l'environnement, de l'utilisation de ces technologies.

5.2.1 ATOSEC5 [5-1]

Développé par le Groupe de Recherche en Électronique Industrielle de l'Université du Québec à Trois-Rivières, ATOSEC5, grâce à son module ATOSECG, fut un des premiers simulateurs à permettre le développement de modèles en utilisant une interface graphique. À la base, ce logiciel modélise les interrupteurs de puissance en utilisant une méthode de commutation d'inductances au lieu d'une commutation de résistance tel qu'utilisaient la plupart des autres simulateurs. Il est, encore aujourd'hui, un outil puissant de simulation en électronique de puissance. Ce logiciel est disponible sous plate-forme PC ou station de travail. Plusieurs modèles de circuits utilisés en électronique de puissance font partie de sa bibliothèque de simulation et il est possible, en utilisant les éléments de base, de modéliser tout système à convertisseur de puissance et leur charge. De plus, les résultats obtenus par simulations en utilisant le simulateur ATOSEC5 peuvent être affichés graphiquement à l'écran et peuvent être aisément transférés dans l'environnement MATLAB afin d'opérer sur ces résultats, des traitements supplémentaires.

5.2.2 SABER [5-2]

Reconnu pour son algorithme de calcul appelé "CALAVERAS®" permettant, lors de la simulation d'un système à plusieurs constantes de temps, de découpler ce système dans le but de réduire le temps de calcul, SABER est une plate-forme de simulation générale orientée dans la simulation de circuits électriques. Son interface graphique permet, d'une façon aisée, de construire divers systèmes à étudier et d'en analyser les résultats. Un outil de calcul intégré permet d'opérer certains calculs sur les résultats obtenus par simulation. Quelques modèles de composants électriques sont inclus dans la librairie de base de SABER. Cependant, cette librairie est rudimentaire, quant à l'étude de systèmes en électronique de puissance. L'inconvénient de SABER réside dans le fait qu'il n'est disponible que pour un ordinateur de type station de travail et il est très dispendieux. Malgré ces désavantages, il demeure un outil puissant et rapide dans le domaine de la simulation numérique et permet l'étude de différents systèmes électriques.

5.2.3 SIMUPELS [6-1]

Développé par le Groupe de Recherche en Électronique Industrielle de l'Université du Québec à Trois-Rivières, SIMUPELS est une librairie de modèles de composants d'électronique de puissance développé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. L'environnement étant de forme graphique, l'utilisateur peut développer des systèmes d'étude en électronique de puissance d'une façon relativement aisée. Il a été conçu dans le but de faciliter la détermination des paramètres des composantes. Afin d'atteindre ce but, les modèles des composants de simulation proposés par SIMUPELS sont "masqués" de façon à faciliter la modification des paramètres internes des composants des différents modèles. L'utilisateur de SIMUPELS a la possibilité de modifier les modèles existants ou de créer de nouveaux modèles d'une façon relativement simple. Comme SIMUPELS est construit sous la plate-forme de simulation MATLAB/SIMULINK, l'utilisateur a accès à un grand nombre d'outils de calcul mathématique afin de traiter les résultats obtenus lors des simulations. La plate-forme MATLAB/SIMULINK est disponible en version PC et station de travail.

5.3 Simulateurs de réseaux électriques

Dans le domaine de la simulation des réseaux électriques, plusieurs simulateurs ont été développés. Certains permettent l'analyse d'écoulement de puissance tandis que d'autres simulateurs permettent l'analyse détaillée des phénomènes transitoires. Voici donc deux (2) des simulateurs les plus fréquemment employés.

5.3.1 ATP/EMTP [5-3]

ATP (Alternative Transients Program) et EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) sont les deux simulateurs de phénomènes transitoires les plus employés présentement. Ces simulateurs permettent l'analyse de phénomènes transitoires de systèmes relativement complexes tel un réseau électrique. Ils sont disponibles sous la plate-forme PC et station de travail. Le principal désavantage de ces simulateurs est qu'ils ne possèdent pas encore d'interface graphique intégrée pour la conception des systèmes à étudier. Dans le but de développer le système à étudier, l'utilisateur doit utiliser un éditeur de texte afin d'incorporer les codes de programmation. Ce travail est laborieux. Cependant, ils font partie des meilleurs simulateurs de phénomènes transitoires dans les réseaux de transport de distribution d'énergie.

5.3.2 EMTDC [5-4]

EMTDC (ElectroMagnetic Transients Direct Current program) est, en fait, une suite à ATP/EMTP. Bien que permettant la simulation des réseaux électriques à courant alternatif, il est spécialisé pour la simulation des réseaux de transport en courant continu. Il possède une interface graphique utilisée pour la description du système à étudier, la détermination des paramètres des modèles, de même que pour la simulation et l'analyse des résultats. Ce simulateur est très puissant mais il n'est disponible que pour un ordinateur de type station de travail. Il permet l'analyse des phénomènes de perturbations sur des réseaux électriques C.A. et C.C..

CHAPITRE 6

6. Développement du logiciel SIMUBEEP

6.1 Introduction

Ce chapitre fait état des travaux réalisés pour concevoir les modèles des différents éléments rencontrés dans un réseau de distribution d'énergie électrique. La librairie SIMUBEEP présentée à la Figure 6-1, utilisable sous SIMULINK® (MATLAB®) et présentée dans ce chapitre, a été conçue dans la perspective de simuler divers phénomènes liés aux perturbations présentes sur un réseau de distribution électrique. Cette librairie sera utilisée afin de valider certains résultats fournis par le BEEP ou afin de simuler certains phénomènes impossibles à étudier à l'aide du BEEP (essais destructifs,...). Afin de concevoir les différents systèmes, une librairie de certains éléments pour effectuer des simulations en électronique de puissance créée sous SIMULINK® et appelée SIMUPELS [6-1] est disponible et sera utilisée dans la mesure du possible (voir section 5.2.2).

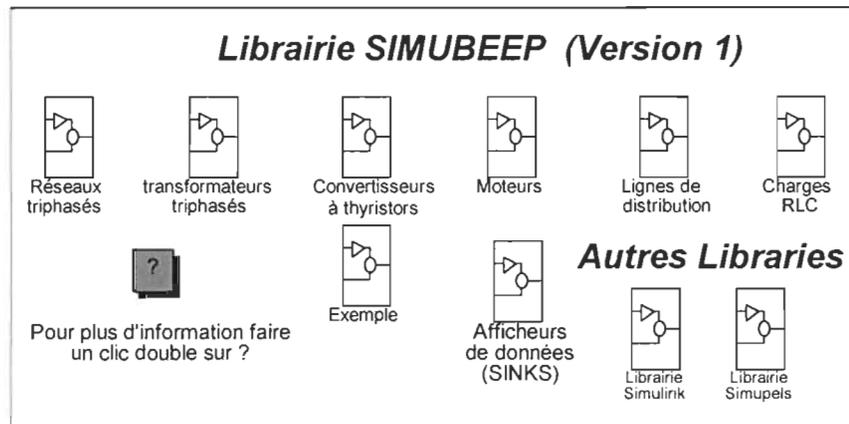


Figure 6-1 Librairie SIMUBEEP

6.2 Source triphasée

La Figure 6-2 présente le module de "réseaux triphasés" retrouvé dans l'interface de SIMUBEEP.

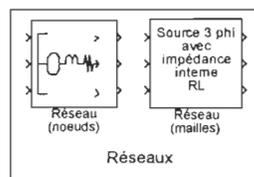


Figure 6-2 Réseaux de distribution

Dans le système à étudier, la source de tension représente le réseau de distribution et de transport d'énergie électrique en amont du système étudié de même que le système de génération d'énergie électrique. De ce fait, l'impédance interne représente la résistance et l'inductance équivalente de l'ensemble du réseau en amont du système étudié. Cette impédance est estimée à partir du rapport de court-circuit à la barre de puissance alimentant le réseau de distribution étudié. La source est modélisée comme une source de tension avec impédance interne inductive et résistive (Figure 6-3). Dans la librairie SIMUPELS, principalement deux types de sources sont disponibles. Le premier type est conçu selon la méthode des noeuds alors que le deuxième est conçu selon la méthode des mailles (Figure 6-3). Les deux types de sources sont équivalents.

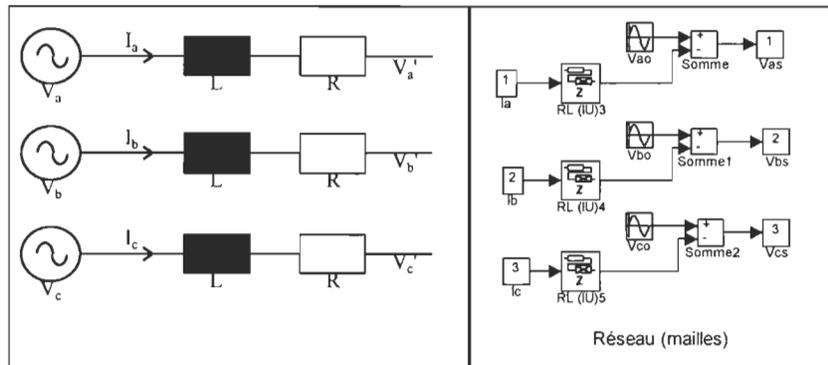


Figure 6-3 Modèle de la source triphasée avec impédance interne (méthode des mailles)

Les équations régissant le fonctionnement du modèle de source sont les suivantes (6-1) à (6-3).

$$V_a' = V_a - RI_a - L \frac{d(I_a)}{dt} \quad (6-1)$$

$$V_b' = V_b - RI_b - L \frac{d(I_b)}{dt} \quad (6-2)$$

$$V_c' = V_c - RI_c - L \frac{d(I_c)}{dt} \quad (6-3)$$

Les entrées de ce modèle sont dans l'ordre :

1. Courant consommé par la charge (fourni par la source), phase A
2. Courant consommé par la charge (fourni par la source), phase B
3. Courant consommé par la charge (fourni par la source), phase C

Les sorties de ce modèle sont dans l'ordre :

1. Tension fournie par la source, phase A
2. Tension fournie par la source, phase B
3. Tension fournie par la source, phase C

L'impédance interne est modélisée par le modèle RL (IU) de la Figure 6-4 et suivant les équations 6-1 à 6-3. Un schéma de principe est montré à la Figure 6-5.

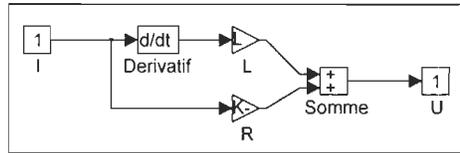


Figure 6-4 Impédance RL (IU)



Figure 6-5 Schéma de principe de RL (IU)

Ce modèle donne une représentation mathématique du comportement physique d'un tel élément. Les valeurs définies par l'utilisateur sont la valeur de l'inductance, la valeur de la résistance, la valeur de tension efficace ligne-ligne, la fréquence de la sinusoïde de la source et le déphasage du signal de la phase A, par rapport à une référence où la valeur est 0 à $t=0$.

Afin de définir l'impédance résistive du modèle de la source, on se sert du rapport X/R de l'impédance équivalente. En général, ce rapport varie entre 10 et 30 [1-7]. Pour la conception d'un système typique, une valeur de 15 pourra être utilisée. Il est à noter que la valeur de l'impédance résistive et inductive affectera grandement le type de transitoire lors de l'enclenchement d'une batterie de condensateurs ou du délestage d'une ligne du réseau. Il est à noter que cette impédance RL (IU) est utilisé dans tous les modèles comprenant une telle impédance (ligne de transmission, transformateurs et sources (réseaux)).

6.3 Ligne de distribution

La Figure 6-6 présente le module de "lignes de distribution" utilisé dans l'interface de SIMUBEPP.

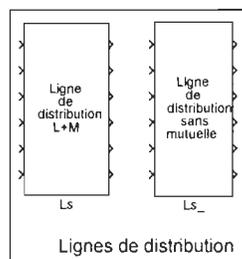


Figure 6-6 Module lignes de distribution

Deux modèles de ligne de distribution sont proposés (Figure 6-6). Pour le premier modèle de la ligne de distribution (Figure 6-7), les paramètres considérés sont l'impédance série de ligne (inductive et résistive) et l'impédance mutuelle (principalement inductive) alors que pour le second (Figure 6-8), la mutuelle a été négligée. Ce dernier modèle ne devrait être utilisé que dans le cas où l'on veut solutionner une boucle algébrique due à la ligne de transmission ou lorsque seulement l'information sur l'impédance inductive équivalente est disponible (voir la section 1.5.1.4). Il est à remarquer qu'il n'est pas fréquent de rencontrer une boucle algébrique due à la ligne de transmission. Pour les deux modèles conçus, l'effet capacitif entre lignes et entre une ligne et la terre est négligé. En effet, pour une ligne de moins de 50 km et à tension d'opération de moins de 40 kV, il est possible de négliger l'effet capacitif de la ligne de transmission [2-3]. Cependant, cet effet devrait être ajouté afin de fournir des résultats plus exacts pour le cas où une étude serait réalisée sur une ligne plus longue. Ces modèles de ligne de distribution font partie d'une première ébauche. En effet, un modèle de ligne de distribution utilisant le circuit équivalent en π devrait être conçu. La section 6-7 discute du modèle en π et de sa fonction de transfert ou de la méthode de conception d'un tel modèle. Le modèle en π ne fait pas encore partie de la librairie SIMUBEEP mais devrait y être ajouté. La référence [1-4] fait état de la modélisation du modèle en π en tenant compte de l'effet de la mutuelle.

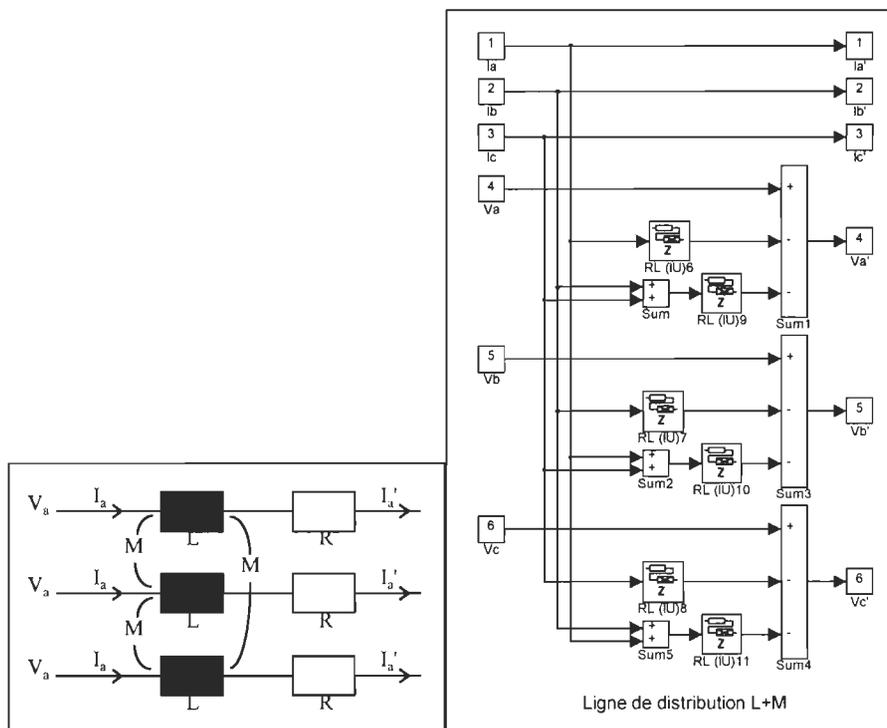


Figure 6-7 Modèle d'une ligne de distribution avec influence de la mutuelle

Ce modèle est défini par les équations suivantes (6-4 à 6-7).

$$i' = i \tag{6-4}$$

$$V_{a'} = V_a - R_s I_a - L_s \frac{d(I_a)}{dt} - M \left(\frac{d(I_b)}{dt} + \frac{d(I_c)}{dt} \right) \quad (6-5)$$

$$V_{b'} = V_b - R_s I_b - L_s \frac{d(I_b)}{dt} - M \left(\frac{d(I_c)}{dt} + \frac{d(I_a)}{dt} \right) \quad (6-6)$$

$$V_{c'} = V_c - R_s I_c - L_s \frac{d(I_c)}{dt} - M \left(\frac{d(I_a)}{dt} + \frac{d(I_b)}{dt} \right) \quad (6-7)$$

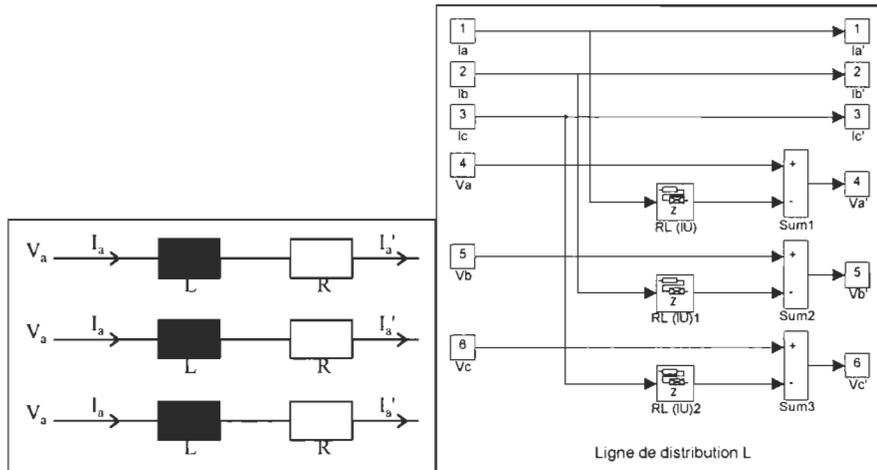


Figure 6-8 Modèle d'une ligne de distribution sans influence de la mutuelle

Ce modèle est défini par les équations suivantes (6-8 à 6-11).

$$i' = i \quad (6-8)$$

$$V_{a'} = V_a - R_s I_a - L_s \frac{d(I_a)}{dt} \quad (6-9)$$

$$V_{b'} = V_b - R_s I_b - L_s \frac{d(I_b)}{dt} \quad (6-10)$$

$$V_{c'} = V_c - R_s I_c - L_s \frac{d(I_c)}{dt} \quad (6-11)$$

Pour le modèle de la ligne de distribution, les phénomènes de type capacitifs (entre phases et entre ligne-terre) sont négligés. Les paramètres d'une ligne sont dépendants du type de matériau constituant la ligne de distribution de même que de la forme de la ligne (distance entre les câbles, diamètre du conducteur, ...). Les paramètres mesurés pour les lignes de distribution utilisées dans cette étude proviennent des références [1-1] et [1-7] alors que les équations nécessaires au calcul des variables proviennent de [1-5], [1-9], [2-1], [6-2] et [6-3].

Pour un conducteur de 30 km, la mutuelle entre deux conducteurs est de l'ordre de 11.46 mH et une inductance de l'ordre de 38.75 mH.

Pour le conducteur utilisé, l'impédance résistive c.a. à 20°C est de 0.17Ω/km.

$R=(0.17\Omega/m) \times (\text{distance}(\text{km}))$

Les entrées du modèle de la ligne de distribution sont :

Ia : Courant traversant la ligne de distribution, phase A

Ib : Courant traversant la ligne de distribution, phase B

Ic : Courant traversant la ligne de distribution, phase C

Va : Tension d'entrée de la ligne de distribution, phase A

Vb : Tension d'entrée de la ligne de distribution, phase B

Vc : Tension d'entrée de la ligne de distribution, phase C

Les sorties du modèle de la ligne de distribution sont :

Ia' : Courant traversant la ligne de distribution, phase A

Ib' : Courant traversant la ligne de distribution, phase B

Ic' : Courant traversant la ligne de distribution, phase C

Va' : Tension de sortie de la ligne de distribution, phase A

Vb' : Tension de sortie de la ligne de distribution, phase B

Vc' : Tension de sortie de la ligne de distribution, phase C

6.4 Transformateurs

La Figure 6-10 présente le module de "transformateurs triphasés" retrouvé dans l'interface de SIMUBEPP.

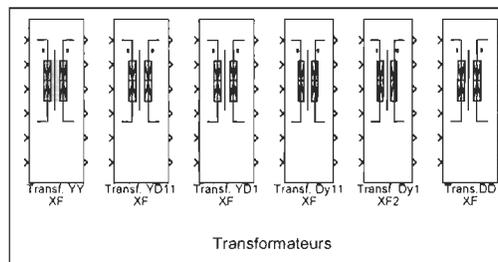


Figure 6-10 Module Transformateurs

Pour tous les modèles de transformateurs (Figure 6-10), nous utilisons une représentation par impédances équivalentes série. Ces impédances inductives et résistives sont rapportées au secondaire. Le gain n correspond au rapport de transformation primaire/secondaire. Les paramètres nécessaires aux calculs relatifs aux transformateurs sont : R_{cc} (rapport de court-circuit), S_{nom} (puissance apparente totale nominale du transformateur), $V_{primaire}$ (tension ligne-ligne efficace appliquée au primaire du transformateur) et $V_{secondaire}$ (tension ligne-ligne efficace appliquée au secondaire du

transformateur). De là, on peut tirer les valeurs du rapport de transformation et d'impédance interne rapportée au secondaire.

Pour un transformateur YY, on a :

$$n = \frac{V_{\text{primaire}}}{V_{\text{secondaire}}} \quad (6-18)$$

$$I_{\text{ph}} = \frac{S}{3 \frac{V_{\text{LL}}}{\sqrt{3}}} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{\text{LL}}} \quad (6-19)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{ph}}}{I_{\text{ph}}} = \frac{V_{\text{LL}}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}V_{\text{LL}}}{S} = \frac{V_{\text{LL}}^2}{S} \quad (6-20)$$

$$Z_{\text{L}} = \frac{R_{\text{cc}} \times (V_{\text{LL}})^2}{S_{\text{totale}}} \quad (6-21)$$

La valeur de la résistance interne est fixée à $Z_{\text{L}}/15$. Ce qui est une valeur typique pour les transformateurs faisant partie d'une ligne de distribution à moyenne tension [1-12]. Le principe utilisé pour la modélisation des transformateurs permet, peu importe le type de connexion, d'utiliser le même calcul des impédances, soient les équations 6-18 à 6-21.

Exemple de calcul :

Transformateur XF4 ($S_n=1500\text{kVA}$, $V_{\text{LLsecondaire}}=4160\text{V}$, $R_{\text{CC}}=12\%$)

$$Z_{\text{L}} = \omega L = \frac{0.12 * (4160)^2}{1500 * 10^3} = 1.384 (\Omega)$$

$$L_{\text{XF4}} = \frac{1.384}{2\pi 60} = 3.672(\text{mH})$$

$$R_{\text{XF4}} = \frac{Z_{\text{L}}}{15} = 92.3(\text{m}\Omega)$$

Les entrées des modèles des transformateurs sont dans l'ordre :

1. Courant du secondaire, phase A
2. Courant du secondaire, phase B
3. Courant du secondaire, phase C
4. Tension au primaire, phase A
5. Tension au primaire, phase B
6. Tension au primaire, phase C

Les sorties des modèles des transformateurs sont dans l'ordre :

1. Tension au secondaire, phase A
2. Tension au secondaire, phase B
3. Tension au secondaire, phase C

- 4. Courant du primaire, phase A
- 5. Courant du primaire, phase B
- 6. Courant du primaire, phase C

6.4.1 Connexion YΔ1

La particularité de ce modèle est que le primaire est couplé en Y alors que le secondaire est couplé en Δ. De plus, la tension du secondaire est en retard sur la tension au primaire. Les Figure 6-11 présente le modèle du transformateur à couplage YΔ1 selon la représentation sous SIMUBEEP et la Figure 6-12 présente le schéma de principe du transformateur à couplage YΔ1.

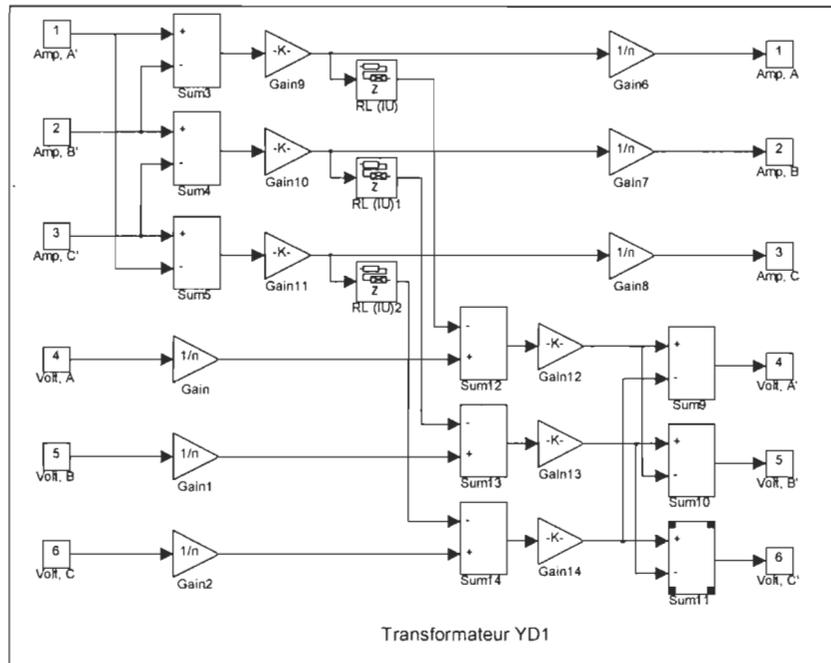


Figure 6-11 Modèle du transformateur à couplage YΔ1

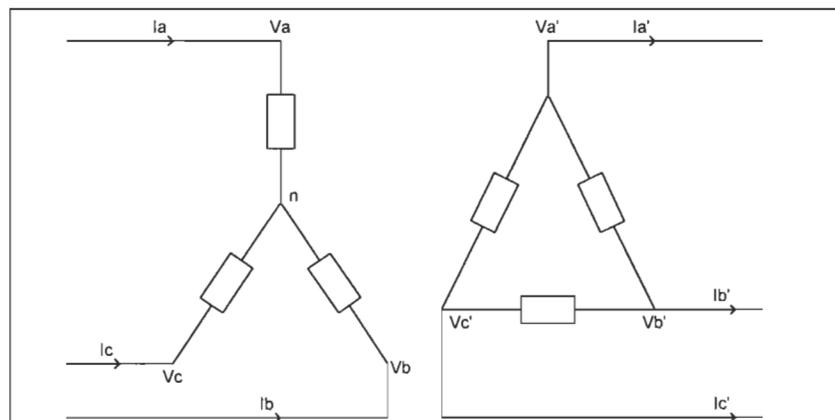


Figure 6-12 Schéma de principe du transformateur à couplage YΔ1

Les équations définissant le modèle de transformateur à couplage YΔ1 sont présentées aux équations 6-22 et 6-23.

$$\left. \begin{aligned} V_a' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{V_a}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_a' - I_b') \right) - \left(\frac{V_c}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_c' - I_a') \right) \right] \\ V_b' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{V_b}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_b' - I_c') \right) - \left(\frac{V_a}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_a' - I_b') \right) \right] \\ V_c' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{V_c}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_c' - I_a') \right) - \left(\frac{V_b}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_b' - I_c') \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (6-22)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{1}{n\sqrt{3}} (I_a' - I_b') \\ I_b &= \frac{1}{n\sqrt{3}} (I_b' - I_c') \\ I_c &= \frac{1}{n\sqrt{3}} (I_c' - I_a') \end{aligned} \right\} \quad (6-23)$$

6.4.2 Connexion YΔ11

La particularité de ce modèle est que le primaire est couplé en Y alors que le secondaire est couplé en Δ. De plus, la tension du secondaire est en avance sur la tension au primaire. La Figure 6-13 présente le modèle du transformateur à couplage YΔ11 selon la représentation sous SIMUBEEP et la Figure 6-14 présente le schéma de principe du transformateur à couplage YΔ11.

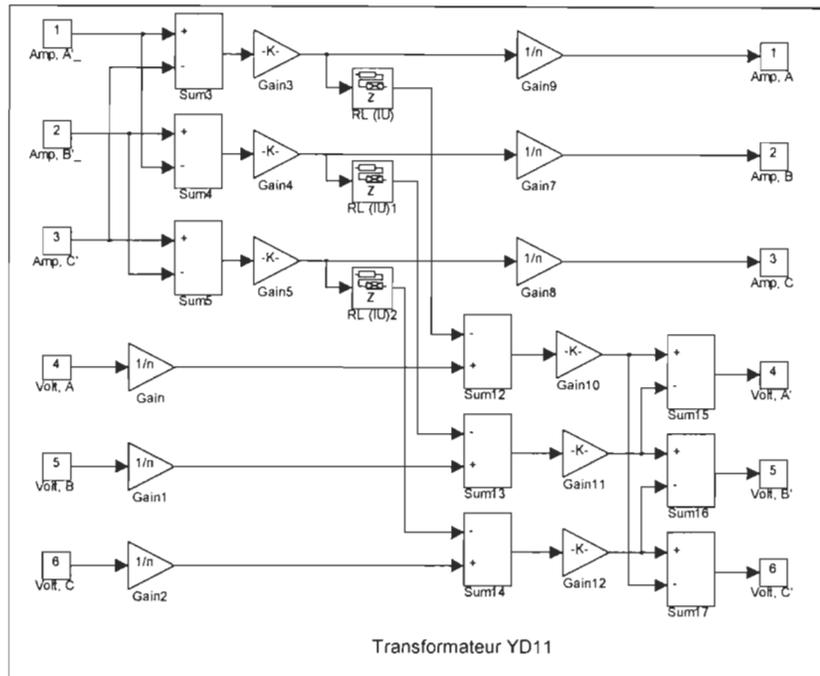


Figure 6-13 Modèle du transformateur à couplage YΔ11

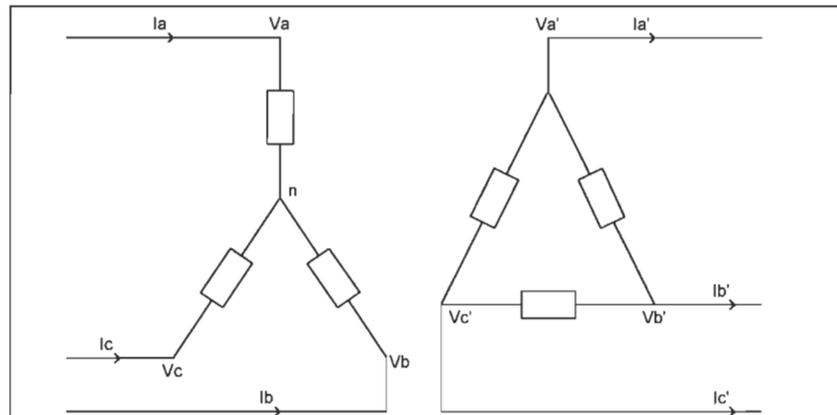


Figure 6-14 Schéma de principe du transformateur à couplage YΔ11

Les équations définissant le modèle de transformateur à couplage YΔ11 sont présentées aux équations 6-24 et 6-25.

$$\left. \begin{aligned}
 V_a' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{V_a}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_a' - I_c') \right) - \left(\frac{V_c}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_b' - I_a') \right) \right] \\
 V_b' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{V_b}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_b' - I_a') \right) - \left(\frac{V_a}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_c' - I_b') \right) \right] \\
 V_c' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{V_c}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_c' - I_b') \right) - \left(\frac{V_b}{n} - \frac{Z}{\sqrt{3}} (I_a' - I_c') \right) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (6-24)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{1}{n\sqrt{3}}(I_a' - I_c') \\ I_b &= \frac{1}{n\sqrt{3}}(I_b' - I_a') \\ I_c &= \frac{1}{n\sqrt{3}}(I_c' - I_b') \end{aligned} \right\} \quad (6-25)$$

6.4.3 Connexion ΔY1

La particularité de ce modèle est que le primaire est couplé en Δ alors que le secondaire est couplé en Y. De plus, la tension du secondaire est en retard sur la tension au primaire. La Figure 6-15 présente le modèle du transformateur à couplage ΔY1 selon la représentation sous SIMUBEEP et la Figure 6-16 présente le schéma de principe du transformateur à couplage ΔY1.

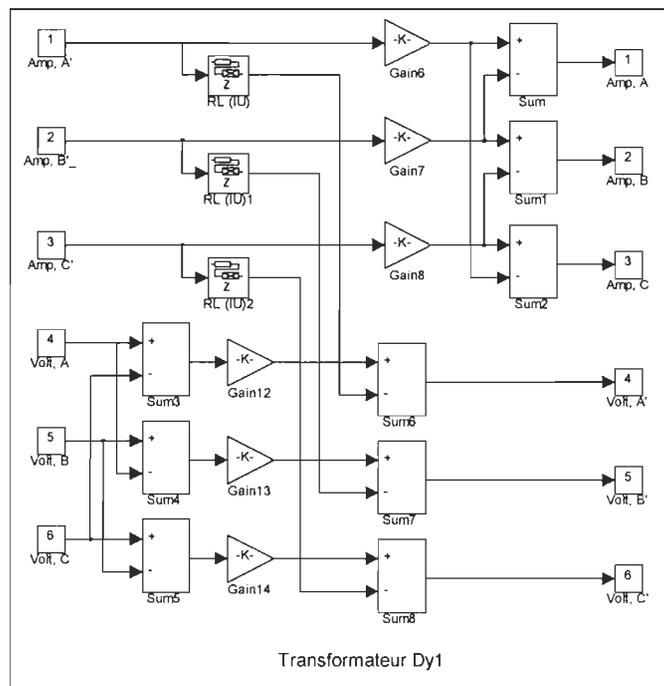


Figure 6-15 Modèle du transformateur à couplage ΔY1

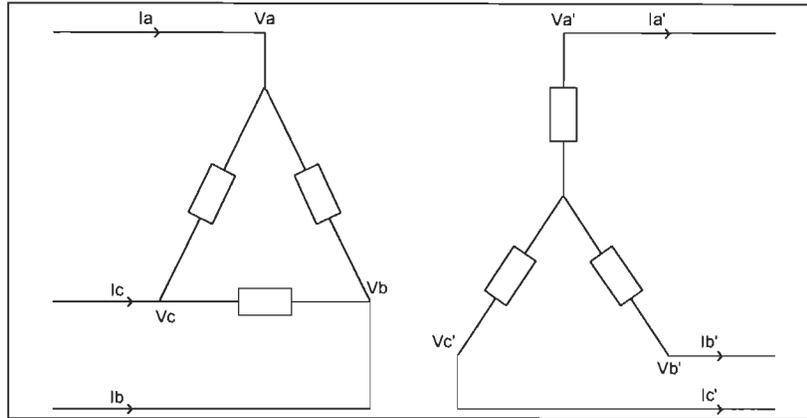


Figure 6-16 Schéma de principe du transformateur à couplage ΔY1

Les équations définissant le modèle de transformateur à couplage ΔY1 sont présentées aux équations 6-26 et 6-27.

$$\left. \begin{aligned} V_a' &= \frac{(V_a - V_c)}{n\sqrt{3}} - ZI_a' \\ V_b' &= \frac{(V_b - V_a)}{n\sqrt{3}} - ZI_b' \\ V_c' &= \frac{(V_c - V_b)}{n\sqrt{3}} - ZI_c' \end{aligned} \right\} \quad (6-26)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{(I_a' - I_b')}{n\sqrt{3}} \\ I_b &= \frac{(I_b' - I_c')}{n\sqrt{3}} \\ I_c &= \frac{(I_c' - I_a')}{n\sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \quad (6-27)$$

6.4.4 Connexion ΔY11

La particularité de ce modèle est que le primaire est couplé en Δ alors que le secondaire est couplé en Y. De plus, la tension du secondaire est en avance sur la tension au primaire. La Figure 6-17 présente le modèle du transformateur à couplage ΔY11 selon la représentation sous SIMUBEPP et la Figure 6-18 présente le schéma de principe du transformateur à couplage ΔY11.

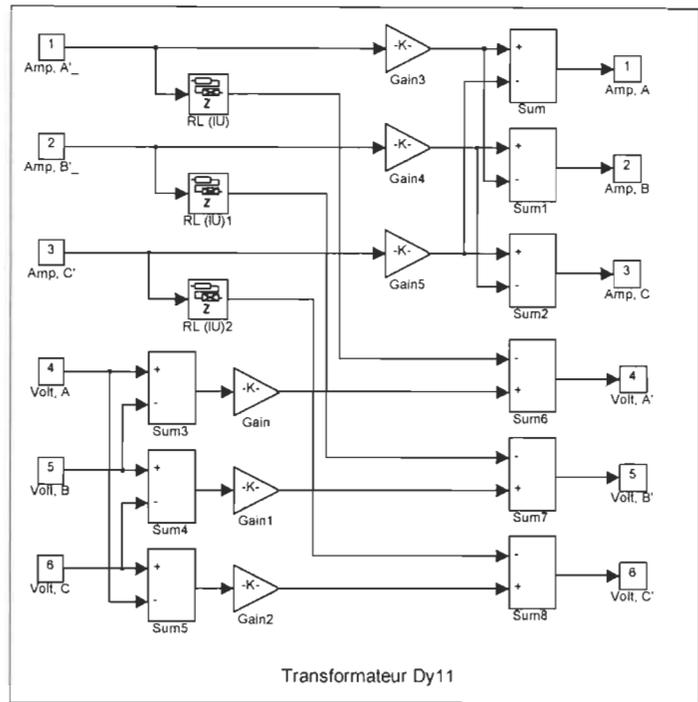


Figure 6-17 Modèle du transformateur à couplage $\Delta Y11$

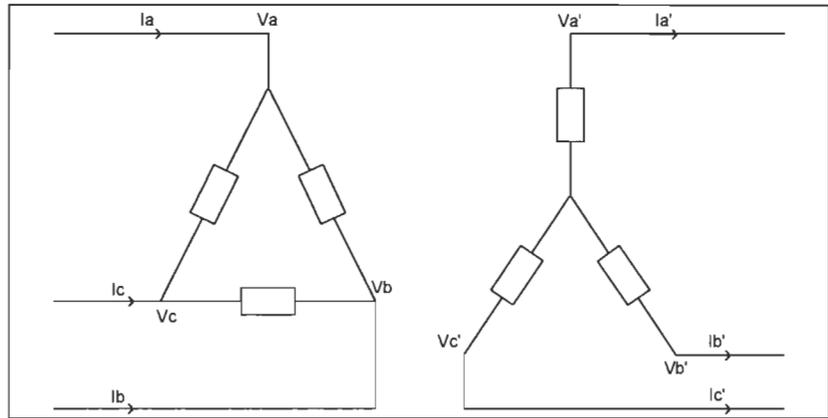


Figure 6-18 Schéma de principe du transformateur à couplage $\Delta Y11$

Les équations définissant le modèle de transformateur à couplage $\Delta Y11$ sont présentées aux équations 6-28 et 6-29.

$$\left. \begin{aligned} V_a' &= \frac{(V_a - V_b)}{n\sqrt{3}} - ZI_a' \\ V_b' &= \frac{(V_b - V_c)}{n\sqrt{3}} - ZI_b' \\ V_c' &= \frac{(V_c - V_a)}{n\sqrt{3}} - ZI_c' \end{aligned} \right\} \quad (6-28)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{(I_a' - I_c')}{n\sqrt{3}} \\ I_b &= \frac{(I_b' - I_a')}{n\sqrt{3}} \\ I_c &= \frac{(I_c' - I_b')}{n\sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \quad (6-29)$$

6.4.5 Connexion YY12

La particularité de ce modèle est que le primaire et le secondaire sont couplés en Y. La tension du secondaire est donc relativement en phase avec la tension du primaire. La Figure 6-19 présente le modèle du transformateur à couplage YY12 selon la représentation sous SIMUBEEP et la Figure 6-20 présente le schéma de principe du transformateur à couplage YY12.

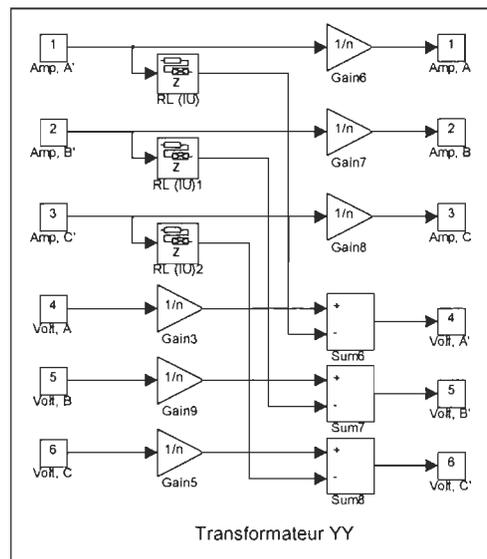


Figure 6-19 Modèle du transformateur à couplage YY12

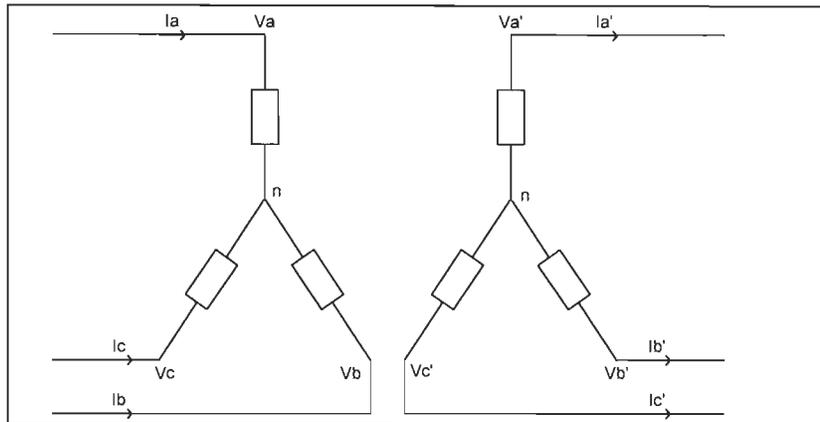


Figure 6-20 Schéma de principe du transformateur à couplage YY12

Les équations définissant le modèle de transformateur à couplage YY12 sont présentées aux équations 6-30 et 6-31.

$$\left. \begin{aligned} V_a' &= \frac{V_a}{n} - ZI_a' \\ V_b' &= \frac{V_b}{n} - ZI_b' \\ V_c' &= \frac{V_c}{n} - ZI_c' \end{aligned} \right\} \quad (6-30)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{I_a'}{n} \\ I_b &= \frac{I_b'}{n} \\ I_c &= \frac{I_c'}{n} \end{aligned} \right\} \quad (6-31)$$

6.4.6 Connexion $\Delta\Delta 12$

La particularité de ce modèle est que le primaire et le secondaire sont couplés en Δ . La tension du secondaire est donc relativement en phase avec la tension du primaire. La Figure 6-21 présente le modèle du transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$ selon la représentation sous SIMUBEPP et la Figure 6-22 présente le schéma de principe du transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$.

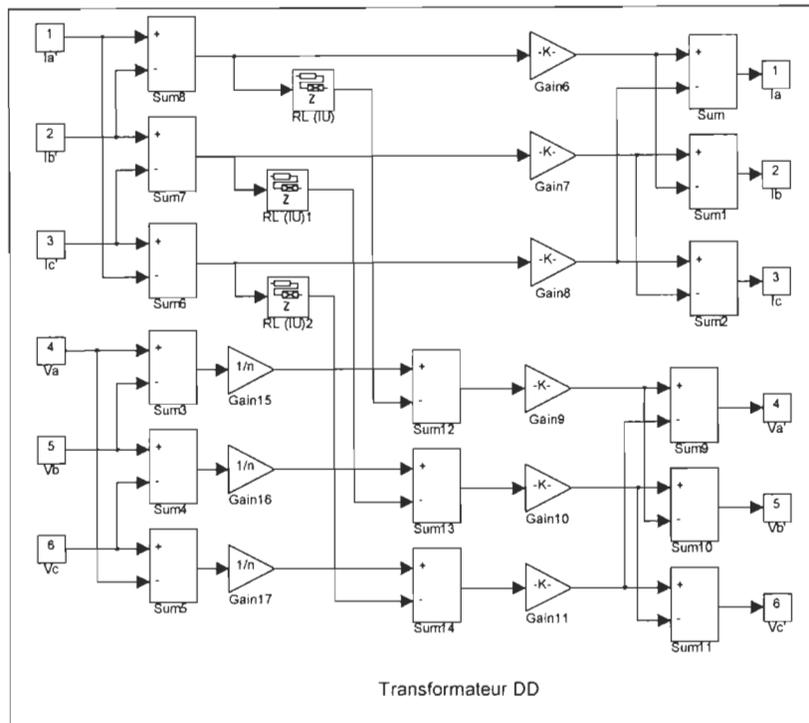


Figure 6-21 Modèle du transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$

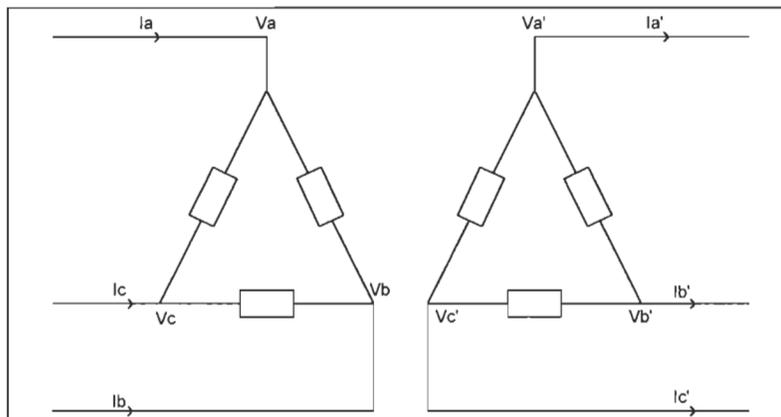


Figure 6-22 Schéma de principe du transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$

Les équations définissant le modèle de transformateur à couplage $\Delta\Delta 12$ sont présentées aux équations 6-32 et 6-33.

$$\left. \begin{aligned} V_a' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left[\left(\frac{V_a - V_b}{n} \right) - Z(I_a' - I_b') \right] - \left[\left(\frac{V_c - V_a}{n} \right) - Z(I_c' - I_a') \right] \right] \\ V_b' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left[\left(\frac{V_b - V_c}{n} \right) - Z(I_b' - I_c') \right] - \left[\left(\frac{V_a - V_b}{n} \right) - Z(I_a' - I_b') \right] \right] \\ V_c' &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left[\left(\frac{V_c - V_a}{n} \right) - Z(I_c' - I_a') \right] - \left[\left(\frac{V_b - V_c}{n} \right) - Z(I_b' - I_c') \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (6-32)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{1}{n\sqrt{3}} [(I_a' - I_b') - (I_c' - I_a')] \\ I_b &= \frac{1}{n\sqrt{3}} [(I_b' - I_c') - (I_a' - I_b')] \\ I_c &= \frac{1}{n\sqrt{3}} [(I_c' - I_a') - (I_b' - I_c')] \end{aligned} \right\} \quad (6-33)$$

6.5 Convertisseurs triphasés

La Figure 6-23 présente le module de "convertisseurs à thyristors" retrouvé dans l'interface de SIMUBEPP.

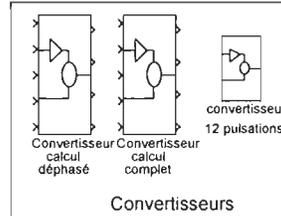


Figure 6-23 Module Convertisseurs à thyristors

Les modèles utilisés proviennent de la librairie de SIMUPELS. Le calcul de la tension c.c. de sortie pour un redresseur à six pulsations à six thyristors se fait selon l'équation (6-34) provenant de [6-4]:

$$V_{\text{moy}} = \frac{p}{\pi} V_{\text{max}} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cos\alpha \quad (6-34)$$

où p représente l'indice de pulsation.

L'amorçage de l'interrupteur de puissance est déterminé par l'intersection de la tension de commande 'Vcom' et une onde triangulaire d'amplitude unitaire. Une tension de commande zéro correspond à un angle de 0° alors que le maximum correspond à 180° .

Entrées du modèle du convertisseur :

Va : Tension d'alimentation du convertisseur, Phase A

Vb : Tension d'alimentation du convertisseur, Phase B

V_c : Tension d'alimentation du convertisseur, Phase C
 α : Angle d'amorçage
 I_{dc} : Courant traversant la charge du convertisseur

Sorties du modèle du convertisseur :

I_a : Courant du convertisseur, phase A
 I_b : Courant du convertisseur, phase B
 I_c : Courant du convertisseur, phase C
 V_{dc} : Tension d'alimentation de la charge du convertisseur

6.5.1 Convertisseur à 6 pulsations avec angle d'amorçage déphasé

La Figure 6-24 présente le module de "convertisseur calcul déphasé" retrouvé dans l'interface de SIMUBEPP.

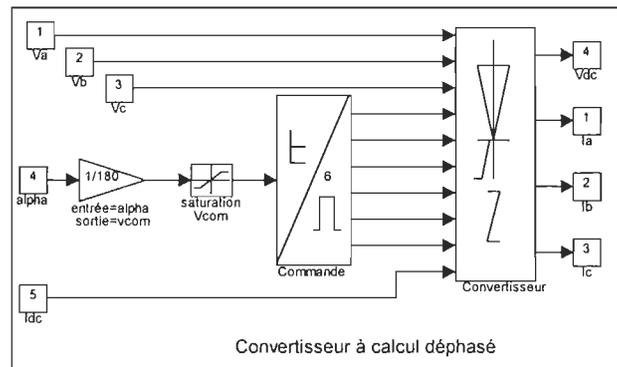


Figure 6-24 Ensemble convertisseur à six pulsations triphasé et commande

La différence entre ce modèle de convertisseur avec calcul déphasé et le modèle de convertisseur à six pulsations avec calcul complet réside dans le bloc de calcul de l'allumage (Figure 6-25 et Figure 6-27) où est effectué le calcul des instants de commutation des interrupteurs de puissance. Pour le modèle de l'allumage avec calcul déphasé, l'instant de commutation du premier interrupteur de puissance est calculé puis, pour le second interrupteur de puissance, cet instant est déphasé de 60° et ainsi de suite. Pour le cas où l'angle d'amorçage est constant, ce modèle est recommandé parce qu'il requiert moins de temps de calcul. Cependant, pour un système avec régulation où l'angle de retard à l'amorçage peut varier dans le temps, il n'est pas recommandé d'utiliser ce modèle puisqu'il permet de faire varier l'angle d'amorçage qu'une seule fois par période, donc par cycle de 60Hz. Le modèle de la commande utilisée pour le modèle du convertisseur à calcul déphasé est représenté à la Figure 6-25 alors que le modèle du convertisseur triphasé six pulsations à six thyristors est représenté à la Figure 6-26.

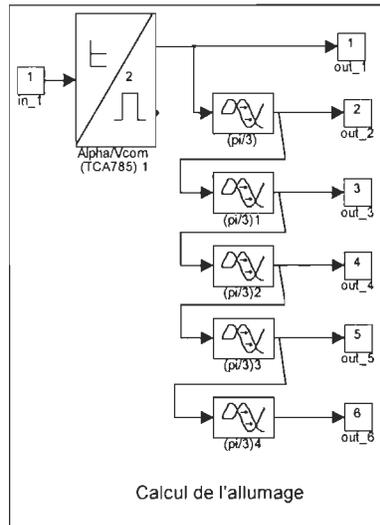


Figure 6-25 Modèle de la commande du convertisseur à six pulsations avec calcul déphasé

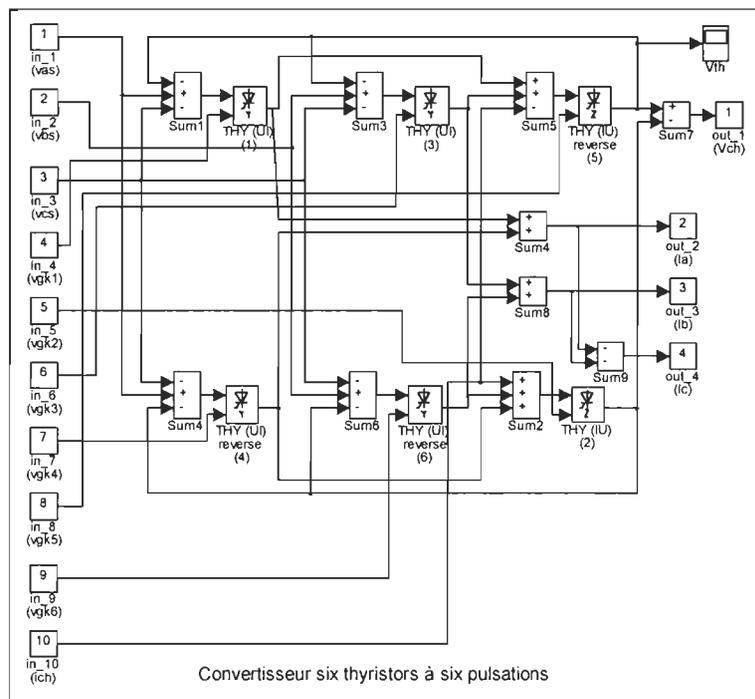


Figure 6-26 Modèle du convertisseur triphasé six pulsations à six thyristors

6.5.2 Convertisseur à six pulsations avec calcul complet

Pour le modèle avec calcul complet, l'instant de commutation est calculé pour chaque interrupteur de puissance. Il y a donc six éléments de calcul indépendants dans ce modèle de calcul de l'amorçage (Figure 6-27). Ce modèle permet une meilleure simulation d'un

ystème avec régulation mais ralenti énormément le temps de simulation de par l'augmentation du nombre de calculs requis. Le modèle du convertisseur demeure le même que celui présenté à la Figure 6-26.

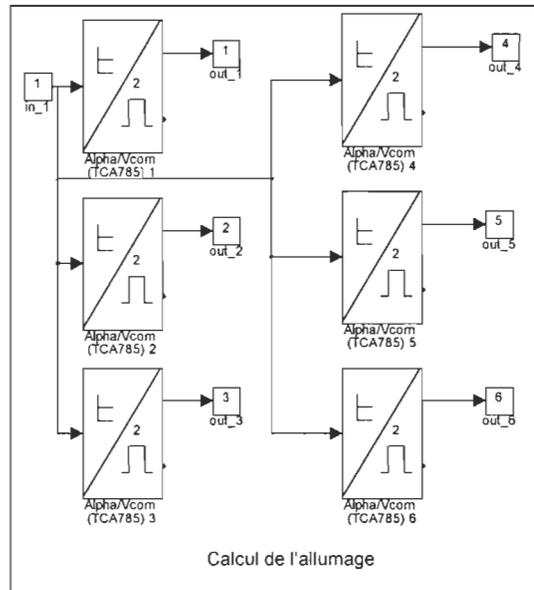


Figure 6-27 Modèle de la commande du convertisseur à 6 pulsations calcul complet

6.5.3 Convertisseur à 12 pulsations

Le convertisseur à 12 pulsations est composé de deux convertisseurs 6 pulsations. Son modèle est présenté à la Figure 6-28.

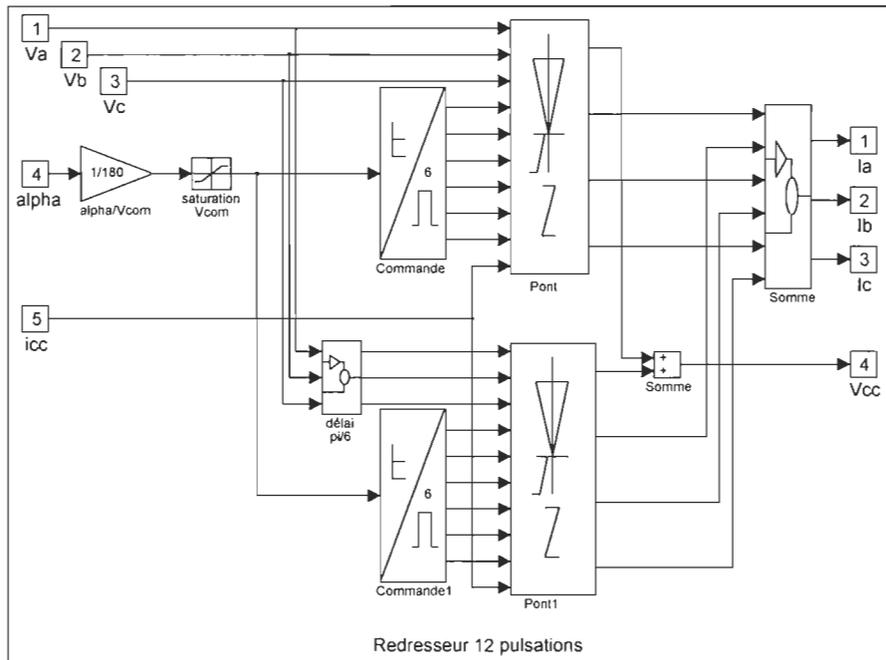


Figure 6-28 Convertisseur à 12 pulsations

6.6 Charges

Deux charges principales sont modélisées dans la librairie SIMUBEED. La première est un moteur c.c. utilisée comme charge pour un redresseur triphasé alors que la deuxième est une charge RLC parallèle triphasée

6.6.1 Moteur à courant continu (c.c.)

La Figure 6-29 présente le module de "Moteurs" retrouvé dans l'interface de SIMUBEED.

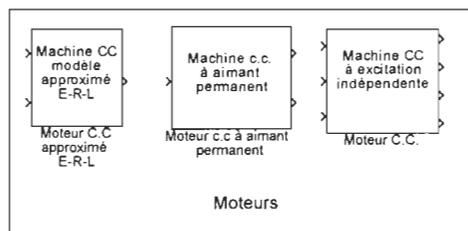


Figure 6-29 Module moteurs

6.6.1.1 Moteur à courant continu à excitation indépendante

Le modèle de la machine à courant continu à excitation indépendante est présenté à la Figure 6-30 selon la forme retrouvée dans l'environnement SIMUBEED.

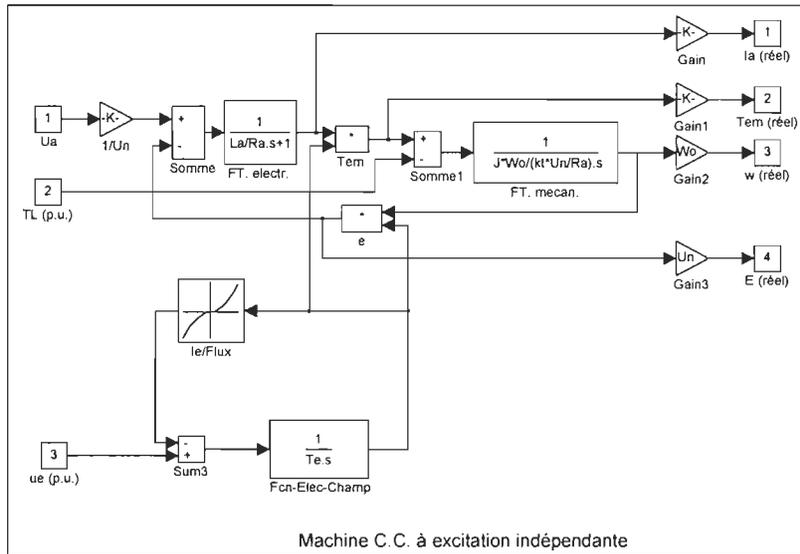


Figure 6-30 Modèle du moteur à courant continu à excitation indépendante

Entrées du modèle du moteur à courant continu :

Ua : Tension du circuit d'induit, en valeur réelle

TL : Couple de charge, en valeur p.u.

ue : Tension du circuit d'excitation, en valeur p.u.

Sorties du modèle du moteur à courant continu :

Ia : Courant du circuit d'induit, en valeur réelle

Tem : Couple produit par la machine, en valeur réelle

W : Vitesse de la machine, en valeur réelle

e : Fcem, Force contre électromotrice, en valeur réelle

Le modèle du moteur c.c. provient de la librairie SIMUPELS [6-1]. Il a été modifié de façon à permettre des entrées et sorties en valeur réelle : tension d'induit, courant d'induit, vitesse, fcem, T_{em} . Les entrées T_L et u_e sont demeurées en valeurs p.u.. Les équations 6-35 à 6-38 définissent le fonctionnement de ce modèle.

$$T_m = \frac{J\Omega_n}{M_n} \quad (6-35)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\Omega_n} \quad (6-36)$$

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \Rightarrow L_a = T_a R_a \quad (6-37)$$

$$M_n = \frac{k_t U_n}{R_a} = \frac{P_n}{\Omega_n} \Rightarrow k_t = \frac{P_n R_a}{U_n \Omega_n} = \frac{J\Omega_n}{T_m (U_n/R_a)} \quad (6-38)$$

6.6.1.2 Moteur à courant continu, modèle approximé E-R-L

Le modèle de la machine à courant continu simplifié par un modèle E-R-L est présenté à la Figure 6-31 selon la forme retrouvée dans l'environnement SIMUBEEP.

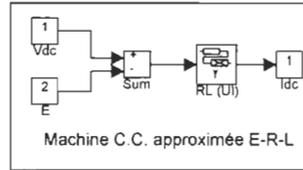


Figure 6-31 Moteur à courant continu (modèle E-R-L)

Ce modèle simule un moteur à courant continu par son impédance d'induit (R_a , L_a) et sa tension induite (E) qui est proportionnelle à la vitesse pour un flux inducteur constant. Les entrées de ce modèle sont : Tension c.c. d'alimentation et E (tension induite) alors que la sortie représente le courant d'induit. C'est un modèle qui requiert beaucoup moins de temps de calcul que le modèle complet du moteur c.c.. Il est suffisamment précis si l'étude ne porte pas sur les effets rencontrés au niveau du moteur mais utilise le moteur comme une charge quelconque en régime permanent.

6.6.1.3 Moteur à courant continu à aimant permanent

Ce modèle présenté à la Figure 6-32 représente un moteur à courant continu à aimant permanent. Le flux de l'excitation est donc unitaire (en p.u.) et fixe. C'est principalement le même modèle que celui présenté à la section 6.6.1.1 auquel on a soustrait le calcul du circuit inducteur.

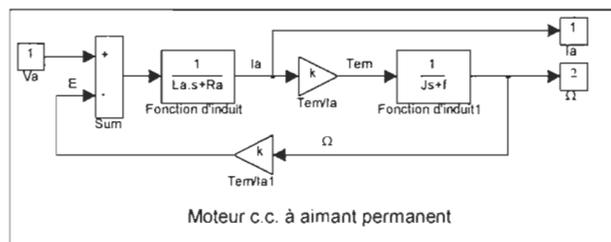


Figure 6-32 Moteur à courant continu à aimant permanent

6.6.2 Charge linéaire RLC (UI) parallèle

La Figure 6-33 présente le module de "Charges RLC " retrouvé dans l'interface de SIMUBEEP. La charge triphasé RLC est représentée à la Figure 6-35 par son modèle dans l'environnement SIMUBEEP, à la Figure 6-34 par son schéma de principe monophasé et à la Figure 6-36 par son schéma de principe triphasé.

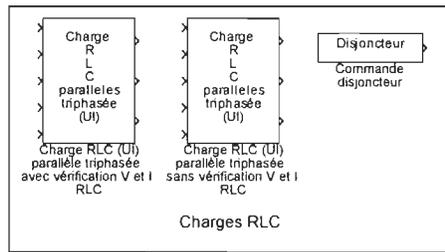


Figure 6-33 Module Charges RLC

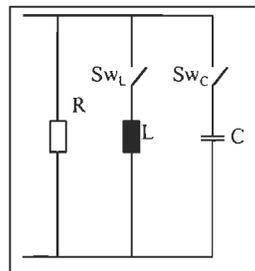


Figure 6-34 Schéma de principe monophasé de la charge RLC parallèle

La charge linéaire triphasée est principalement composée d'un bloc triphasé d'une résistance, d'une inductance et d'un condensateur en parallèles pour chaque phase (Figure 6-34 et Figure 6-36). Comme ces charges sont en parallèle, elles sont alimentées par la même tension et la somme du courant produit par chaque élément représente le courant total. Le modèle (Figure 6-35) comporte deux entrées supplémentaires ayant comme fonction la commande en enclenchement et en déclenchement des charges inductives et/ou capacitatives. Pour commander en enclenchement, une entrée égale à 1 est requise alors qu'une entrée égale à 0 correspond à un déclenchement. Le modèle du disjoncteur présent dans le module Charges RLC peut être utilisé pour commander les enclenchements et déclenchements des charges L et C.

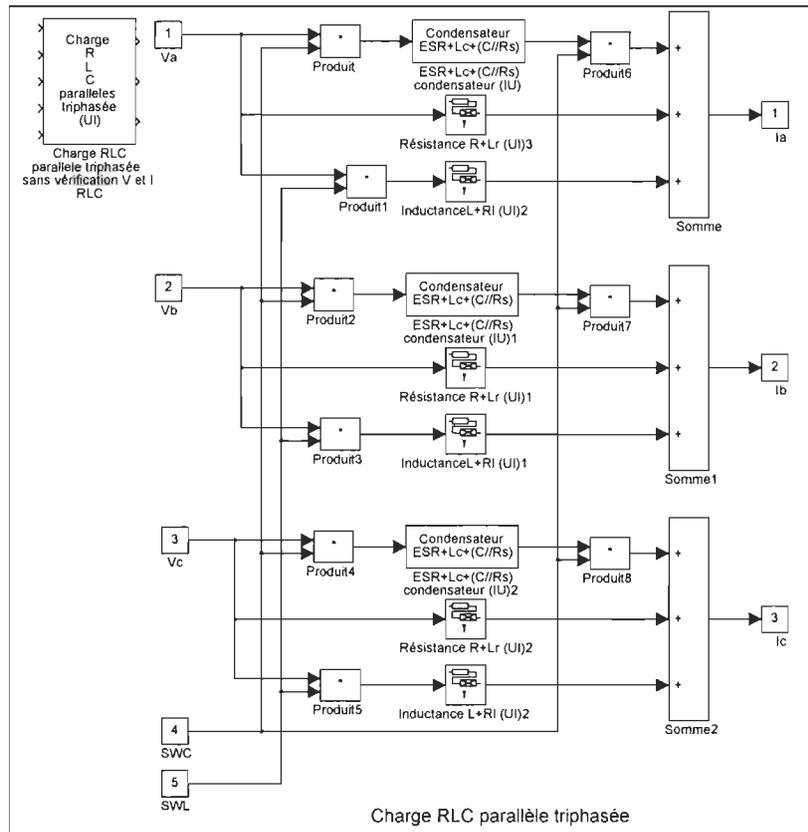


Figure 6-35 Modèle de la charge RLC parallèle triphasée

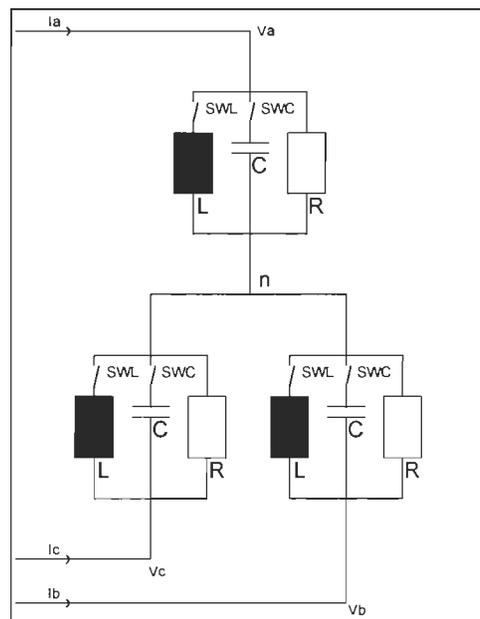


Figure 6-36 Schéma de principe de la charge RCL parallèle triphasée

Le fonctionnement de ce modèle (Figure 6-36) est présenté à l'équation 6-39.

$$\frac{I_{abc}(s)}{V_{abc}(s)} = \frac{1}{R} + sC + \frac{1}{sL} \quad (6-39)$$

Les entrées de la charge triphasée sont :

Va : Tension d'alimentation, phase A

Vb : Tension d'alimentation, phase B

Vc : Tension d'alimentation, phase C

SWC : Commande du disjoncteur de la charge capacitive

SWL : Commande du disjoncteur de la charge inductive

Les sorties de la charge triphasée sont :

Ia : Courant consommé par la charge, phase A

Ib : Courant consommé par la charge, phase B

Ic : Courant consommé par la charge, phase C

6.6.2.1 Modèle résistif et inductif

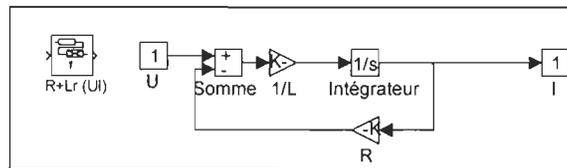


Figure 6-37 Modèle de la résistance et de l'inductance (modèle UI)

Ce modèle représenté à la Figure 6-37 sous son modèle retrouvé dans l'environnement SIMUBEEP est utilisé pour représenter l'inductance de charge et la résistance de charge. Pour l'inductance de charge, la résistance est définie comme étant la résistance du bobinage tandis que pour la résistance, l'inductance est une inductance parasite. Ce modèle est valable pour une entrée en tension et une sortie en courant.

6.6.2.2 Modèle capacitif

Le type de modèle capacitif utilisé est très important dans le cadre de la simulation. Premièrement parce que c'est un modèle qui utilise comme entrée une tension et comme sortie un courant. C'est donc principalement un modèle dérivatif. Ce modèle a tendance à provoquer des instabilités de calcul si les perturbations de tension ou l'enclenchement des condensateurs résultant en des $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ très grands.

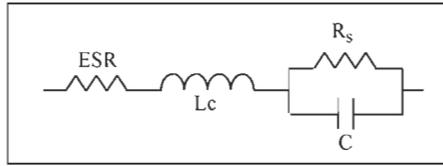


Figure 6-38 Schéma de principe du modèle du condensateur [1-4], [6-2], [6-6]

Le modèle (UI) présenté à la Figure 6-38 représente les phénomènes physiques liés à un condensateur. Le schéma de principe de ce modèle de condensateur est représenté à la Figure 6-38. La résistance ESR représente les pertes par échauffement. L'inductance L_c représente une inductance distribuée provenant des fils et des électrodes du condensateur. La résistance R_s représente la résistivité du diélectrique et du boîtier de même que les pertes dans le diélectrique. De plus, ce modèle a comme avantage de limiter les problèmes du point de vue numérique dû au fait que ce modèle de condensateur est principalement intégrateur ($1/s$) (voir équation 6-40) alors que le modèle capacitif pur a un modèle UI dérivatif (Cs). Le modèle de charge capacitive UI est présenté à Figure 6-39 selon sa représentation sous l'environnement SIMUBEPP.

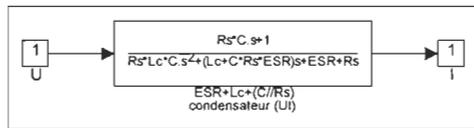


Figure 6-39 Modèle du condensateur (UI)

La fonction de transfert de ce système est :

$$\frac{I}{U} = \frac{sCR_s + 1}{s^2(L_cCR_s) + s(CR_sESR + L_c) + ESR + R_s} \quad (6-40)$$

$$\frac{I}{U} = \frac{s \frac{1}{L_c} + \frac{1}{L_cCR_s}}{s^2 + s\left(\frac{1}{CR_s} + \frac{ESR}{L_c}\right) + \frac{ESR}{L_cCR_s} + \frac{1}{L_cC}}$$

L'équation caractéristique de ce système est du deuxième ordre. La variable ESR étant l'impédance résistive parasite, elle sera très petite. De plus, l'impédance R_s étant l'impédance résistive parallèle parasite, sa valeur sera très élevée. Ceci nous permet de négliger le terme $\frac{ESR}{L_cCR_s}$ devant le terme $\frac{1}{L_cC}$. La fréquence de résonance ω_n est alors déterminée par :

$$\omega_n \cong \frac{1}{\sqrt{CL_c}} \quad (6-41)$$

alors que le coefficient d'amortissement ζ est défini par :

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_n} \left(\frac{1}{CR_s} + \frac{ESR}{L_c} \right) \quad (6-42)$$

Une autre façon de déterminer l'amortissement est de fixer le temps d'amortissement. La variable $\sigma = 2\zeta\omega_n$ représente le temps de la transitoire d'une équation du second ordre, soit 5τ où τ représente la constante de temps du système. σ , dans le cas étudié, est représenté par l'équation 6-43.

$$\sigma = \frac{1}{CR_s} + \frac{ESR}{L_c} \quad (6-43)$$

Il est alors possible, grâce à l'équation 6-43 de déterminer le temps nécessaire au système pour terminer le régime transitoire provoqué par l'enclenchement d'un condensateur. En observant la fréquence d'oscillation du système, il est possible de déterminer la valeur de la variable L_c . Connaissant ω_n et L_c et sachant que ESR doit être la plus faible possible et que R_s doit être la plus élevée possible et en utilisant l'équation 6-43, il est possible d'établir un compromis afin de déterminer les valeurs de R_s et de ESR. Il est important de prendre conscience que la valeur de l'impédance du réseau en amont (système de transmission, transformateurs et ligne de distribution) influenceront grandement la valeur équivalente de L_c et l'impédance résistive du même système en amont influencera la valeur équivalente de ESR. Ce qui résultera en une fréquence d'oscillation plus faible que celle déterminée utilisant l'équation 6-41 et en une atténuation plus faible que celle déterminée par l'équation 6-42 ou 6-43. Il est donc nécessaire d'avoir conscience de la grandeur de l'impédance équivalente du réseau lors de la détermination des paramètres du condensateur.

L'oscillation à l'enclenchement de la batterie de condensateurs est directement liée à l'impédance équivalente du ou des transformateur(s) en amont. Ce lien se caractérise par le fait que l'impédance équivalente du transformateur diminue en fonction de l'augmentation de sa puissance. Une impédance faible fera augmenter la fréquence d'oscillation et diminuera l'amortissement lors d'un enclenchement de condensateurs.

Concernant la méthode utilisée pour l'enclenchement de condensateurs, aucun standard n'est établi. Certaines batteries de condensateurs (surtout à moyenne tension) seront enclenchés dès que le besoin s'en fera sentir alors que pour certaines autres batteries de condensateurs, l'enclenchement des condensateurs se fera au passage par zéro de la tension aux bornes de la batterie de condensateurs. Cette dernière méthode élimine pratiquement l'effet d'oscillations du système mais peut apporter un autre problème. Bien que ce phénomène soit de courte durée, comme les condensateurs sont enclenchés au passage de la tension par zéro, le système se retrouve déséquilibré pour la période de temps séparant l'enclenchement du premier et du dernier condensateur. L'étude d'un tel phénomène n'est cependant pas étudié dans cette recherche. Le phénomène sur lequel

cette étude se concentre est le cas typique de l'enclenchement des trois condensateurs d'une même batterie simultanément.

Au niveau de la Charge RLC, pour l'utilisateur, il est nécessaire de spécifier les valeurs de R, L et les paramètres du condensateur C. Comme il est difficile d'obtenir des informations sur les paramètres parasites d'un condensateur typique d'un système de distribution, les valeurs de ESR, R_s et L_c , doivent être déterminées par l'utilisateur suite à une étude personnelle. Ils dépendent de l'impédance équivalente résistive et inductive du système alimentant la batterie de condensateurs.

Le second modèle de charge RLC (Figure 6-40) compris dans le module de charge RLC (Figure 6-33) est une variante du modèle décrit ci-haut. Ce modèle correspond à une batterie de condensateurs où les condensateurs sont enclenchés au passage par zéro de la tension à leurs bornes et déclenchés au passage à zéro du courant les traversant. Le compensateur statique est construit à partir de deux cylindres qui s'imbriquent l'un dans l'autre au moment de l'enclenchement. Le champ magnétique qui circule dans ces cylindres oblige les deux pièces à demeurer ensemble. Un déclenchement n'est possible que lorsque le courant passant dans le condensateur est près de zéro.

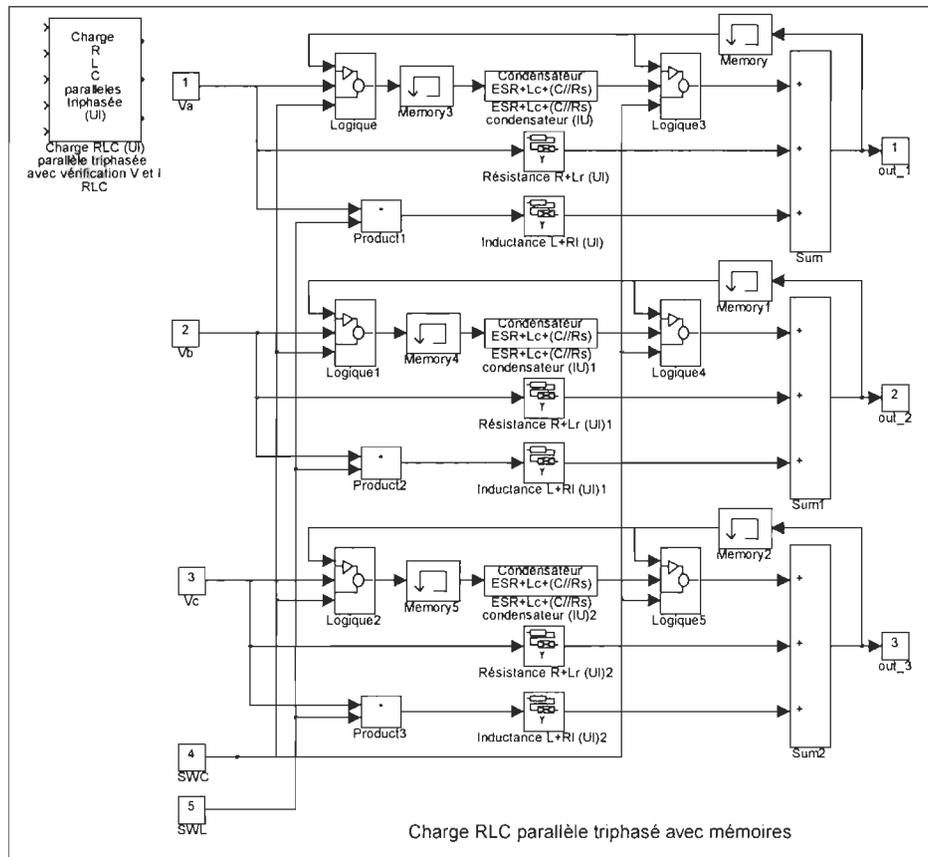


Figure 6-40 Modèle RLC avec logique de surveillance de la tension et du courant

C'est la raison d'existence, pour le modèle, du circuit logique présenté à la Figure 6-41 commandant l'ouverture et la fermeture du disjoncteur de condensateur. Le circuit ne permet l'enclenchement que si la tension aux bornes du condensateur passe par zéro et le déclenchement que si le courant du condensateur passe près de zéro. On remarque, dans chaque branche de condensateur, deux blocs de mémoire pour chacune des phases. Ces blocs servent à éliminer une boucle algébrique. La boucle algébrique est formée par le retour de courant dans le modèle de logique de déclenchement.

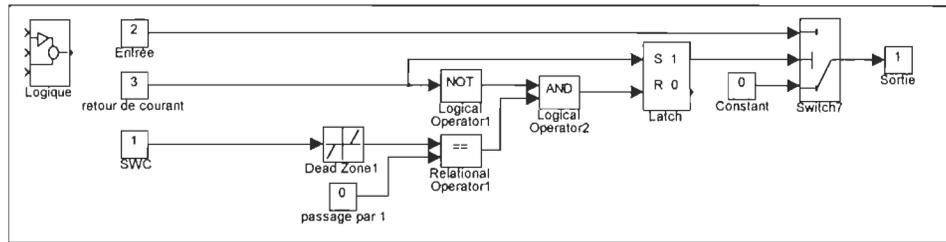


Figure 6-41 Bloc Logique pour surveillance d'enclenchement et déclenchement

6.7 Modèle en pi (π)

Le modèle du circuit équivalent en π de la ligne de distribution est présenté à Figure 6-42 par son schéma de principe monophasé.

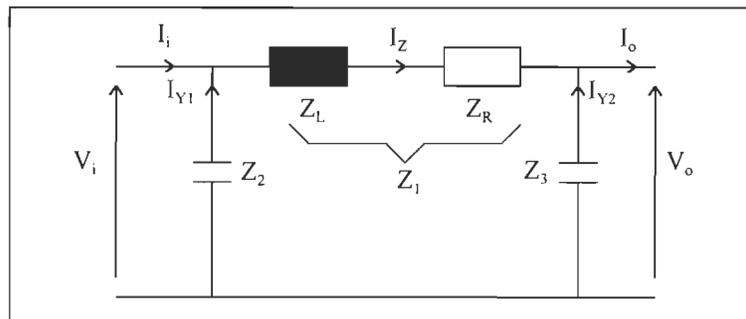


Figure 6-42 Modèle du circuit équivalent en π de la ligne de distribution

Afin de respecter la méthode utilisée pour la conception des différents modèles conçus dans la librairie SIMUBEEP, les entrées de ce modèle seront : Courants de sortie triphasés (I_o) et les tensions d'entrée triphasées (V_i) alors que les sorties seront les courants d'entrée (I_i) et les tensions de sortie (V_o). Sachant cela, les équations du système sont tels que présentées aux équations 6-44 et 6-45.

$$V_o = \left(\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} \right) V_i - \left(\frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \right) I_o \quad (6-44)$$

$$I_o = \left(\frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3} \right) V_i + \left(\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} \right) I_o \quad (6-45)$$

où :

$$Z_2=Z_3=2/Y$$

La modélisation de la ligne de distribution suivant ce modèle permet, entre autre, de modéliser des lignes suffisamment longues tout en gardant une bonne précision lors de l'étude en fréquence.

6.8 Conclusion

Une librairie, appelée SIMUBEEP composée des modèles d'éléments faisant partie d'un réseau de distribution d'énergie électrique a été conçue dans le but d'étudier différents phénomènes. Cette librairie est fonctionnelle et les éléments représentés sont simplifiés de façon à limiter la taille des équations d'un système donné et, de ce fait, limiter le temps de calcul nécessaire à l'obtention de résultats significatifs. Les éléments modélisés sont :

- Source représentant le système en amont du réseau étudié
- Différents types de connexion de transformateurs
- La ligne de transmission avec et sans influence de la mutuelle
- Des charges inductives et résistives comprenant une batterie de condensateurs
- Différents types de moteurs à courant continu
- Différents types de convertisseurs triphasés

CHAPITRE 7

7. Méthode itérative de simulation globale

7.1 Introduction

Un système représentant un réseau avec ses transformateurs, ses lignes de distribution et ses consommateurs avec des convertisseurs de puissance devient très complexe et lourd pour la simulation par un micro ordinateur. De plus, dans le cas de la simulation d'un réseau de distribution, afin de vérifier l'interaction entre les consommateurs, il est nécessaire de simuler le système globalement.

Une méthode itérative de simulation globale a donc été développée dans le but de diminuer le temps de calcul pour la simulation d'un système à multi-convertisseurs de puissance. Cette méthode proposée par M. Tou et Al. [7-1], avait principalement été étudiée dans le but de diminuer le nombre de variables d'état dans le cas de simulation de systèmes à multi-convertisseurs dans l'environnement ATOSEC5 [7-2].

En général, les éléments conçus dans la librairie SIMUBEEP peuvent être séparés en deux catégories de constante de temps différentes. L'élément convertisseur possède une constante de temps très faible obligeant à utiliser un pas de calcul très petit lors d'une simulation. Les autres éléments, tant qu'on ne fasse pas intervenir de phénomènes transitoires tel que l'enclenchement de condensateur, ont des constantes de temps beaucoup plus grandes. Lorsqu'un système global est simulé, le pas de calcul maximal sera déterminé par la plus faible constante de temps. La méthode présentée dans ce chapitre propose une façon de diviser un système global en sous-systèmes. Elle permet de simuler indépendamment deux sous-systèmes en utilisant, pour chacun, des pas de calcul différents et en échangeant de l'information entre ces sous-systèmes d'une façon itérative et séquentielle.

7.2 Méthode itérative de simulation globale

Une méthode de simulation a été développée dans le but de réduire le temps de calcul d'un système requérant un temps de calcul important. Il s'agit d'une méthode itérative. Comme on sait que la plus faible constante de temps retrouvée parmi les modèles de la librairie SIMUBEEP se retrouve au niveau du convertisseur, on sépare le système total en deux sous-systèmes. Le premier sous-système comprendra tout le système sans convertisseur(s) et le second sous-système comprendra le (ou les) convertisseur(s) utilisé(s). Un exemple de simulation suit pour une meilleure compréhension. Le code des fichiers de programmation MATLAB et les figures relatives aux modèles des systèmes sous SIMULINK [7-3] sont fournis à l'annexe D.

La méthode consiste principalement à collecter certains résultats obtenus de la simulation du premier sous-système et à les injecter comme entrées pour la simulation du second système. Certains résultats obtenus à partir de la simulation du second sous-système seront injectés comme

nouvelles entrées pour une seconde itération et ainsi de suite, jusqu'à l'obtention de résultats valables. Les résultats sont considérés valables lorsque l'erreur entre les résultats de deux itérations est inférieure à un seuil défini. La Figure 7-1 représente cette méthode de simulation par son organigramme.

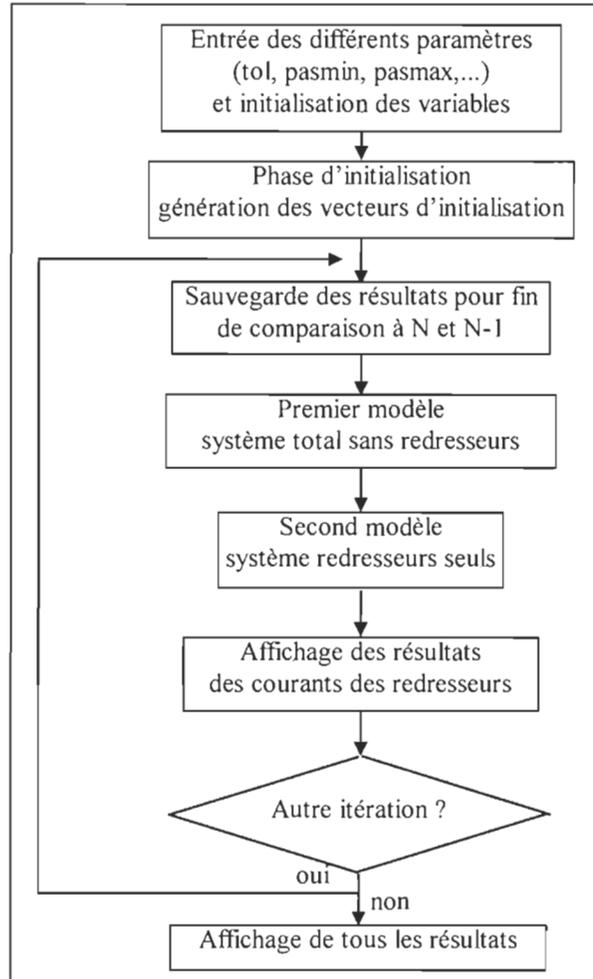


Figure 7-1 Organigramme de la méthode itérative de simulation globale

La méthode de simulation globale classique utilise un algorithme de calcul classique afin de déterminer, par itération, une valeur à partir de la valeur précédente en utilisant un pas de calcul soit fixe, soit variable. On peut définir cette méthode selon les équations 7-1 et 7-2.

Soit un système défini par :

$$\left. \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{Y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{array} \right\} \quad (7-1)$$

où \mathbf{x} représente les variables d'état, \mathbf{u} représente la ou les entrées et \mathbf{Y} représente la sortie.

Alors, la détermination des valeurs d'état peut être décrite sous la forme de l'équation 7-2.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{x}_2^{(\text{ancien})}) \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{u}_2, \mathbf{x}_1^{(\text{ancien})}) \end{aligned} \right\} [t_0, t_1] \quad (7-2)$$

f_1 et f_2 dépendent du type d'algorithme utilisé.

La méthode proposée utilise, elle aussi, un algorithme de calcul classique pour la détermination des valeurs des états telle que présenté aux équations 7-2 et 7-3. La différence pour la méthode utilisée réside dans le fait que le système est divisé en sous-systèmes qui sont simulés d'une façon indépendante et séquentielle. À la fin de la simulation du premier sous-système, certains résultats recueillis à tous les pas de calculs de la simulation seront utilisés pour constituer des entrées à la simulation du second sous-système. À la fin de la simulation du second sous-système, certains résultats recueillis à tous les pas de calculs de la simulation seront utilisés pour constituer des entrées à une nouvelle simulation du premier sous-système. Cette séquence de simulations se répète jusqu'à ce que l'erreur entre les résultats obtenus et ceux obtenus lors de l'itération précédente est inférieure à un certain seuil. Chaque séquence de simulation représente une itération. La méthode est appelée globale ("méthode itérative de simulation globale") parce que chacun des sous-systèmes est simulé seul et sur toute la période de temps requise en utilisant un algorithme de calcul classique. À l'intérieur d'une itération, aucune interaction directe n'est nécessaire entre les deux sous-systèmes. L'équation 7-3 présente la méthode sous sa forme mathématique.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Y}_1^{(\text{nouveau})} &= \mathbf{F}_1(\mathbf{u}_1, \mathbf{Y}_2^{(\text{ancien})}) \\ \mathbf{Y}_2^{(\text{nouveau})} &= \mathbf{F}_2(\mathbf{u}_2, \mathbf{Y}_1^{(\text{nouveau})}) \end{aligned} \right\} [t_0, t_1] \quad (7-3)$$

Y_1 représente le vecteur des résultats du premier sous-système alors que Y_2 représente le vecteur des résultats du deuxième sous-système. Ces vecteurs sont aussi appelés les variables de couplage entre les deux sous-systèmes. u_1 et u_2 représentent respectivement les entrées du premier et du deuxième sous-système. La période de temps définie par l'intervalle de temps $[t_0, t_1]$ est la période de temps totale de la simulation. Elle ne représente pas le pas de calcul.

7.3 Exemple d'application de la méthode

Le réseau étudié à titre d'exemple d'application de la méthode itérative de simulation globale est représenté à la Figure 7-2. Il s'agit d'un réseau de distribution fournissant l'énergie à trois consommateurs par l'intermédiaire de transformateurs et de lignes de distribution. Les consommateurs alimentés par le réseau de distribution sont de deux types. Le premier type représente une charge non linéaire, soit un redresseur triphasé alimentant une charge résistive et inductive. Le second type représente une charge linéaire, soit une charge triphasée résistive et inductive. Les lignes de distributions sont de longueurs différentes et tiennent compte de l'effet résistif, inductif et mutuel de la ligne triphasée.

7.3.1 Méthodologie

Le but de cette exemple est de démontrer la possibilité de simuler un système divisé en sous-systèmes par itérations dans le but de diminuer le temps de calcul total tout en conservant des résultats qui sont identiques à une simulation où un système complet est simulé d'une façon globale et suivant une méthode classique. L'exemple fait état d'une simulation où, dans un premier temps, un système complet a été simulé suivant la méthode itérative de simulation globale et, dans un deuxième temps, la méthode de simulation globale classique a été appliquée à ce système. Les Figure 7-2 et Figure 7-3 représentent le schéma de principe unifilaire du système total ainsi que la déclaration des variables. Les Figure 7-4 et Figure 7-5 représentent le système total divisé en deux sous-systèmes soient respectivement le premier sous-système et le second sous-système.

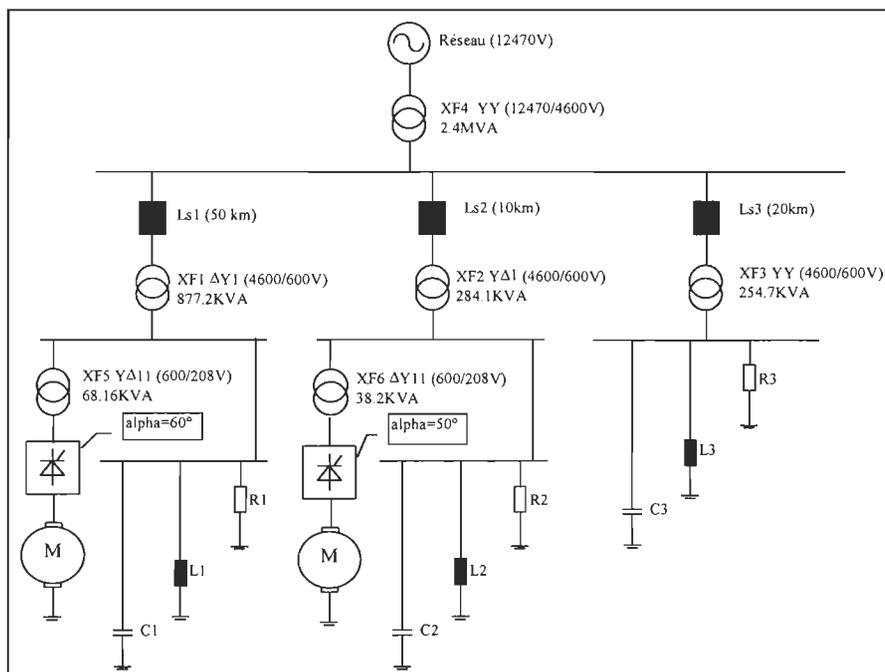


Figure 7-2 Schéma unifilaire du système étudié

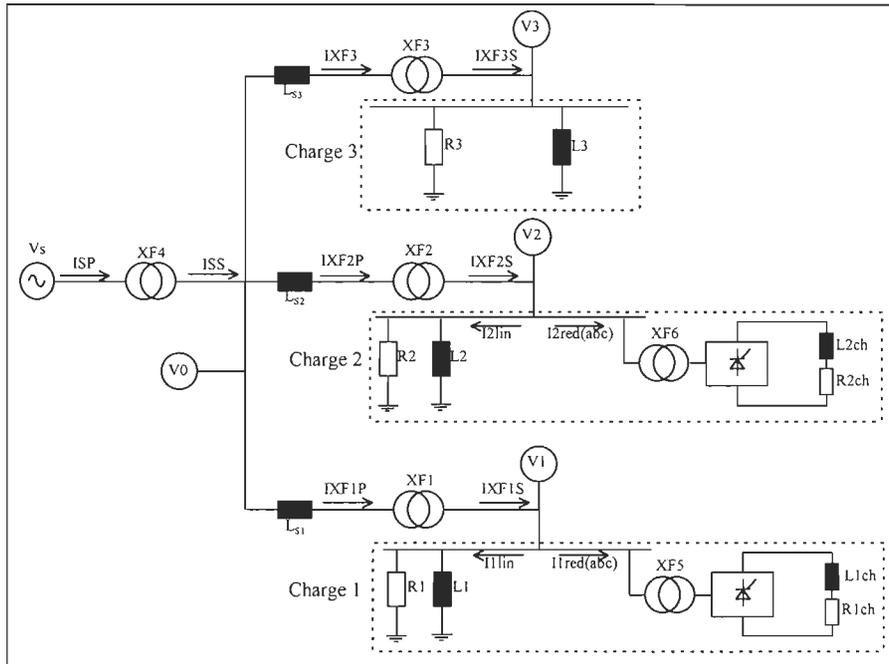


Figure 7-3 Schéma unifilaire du système total étudié et présentation des variables

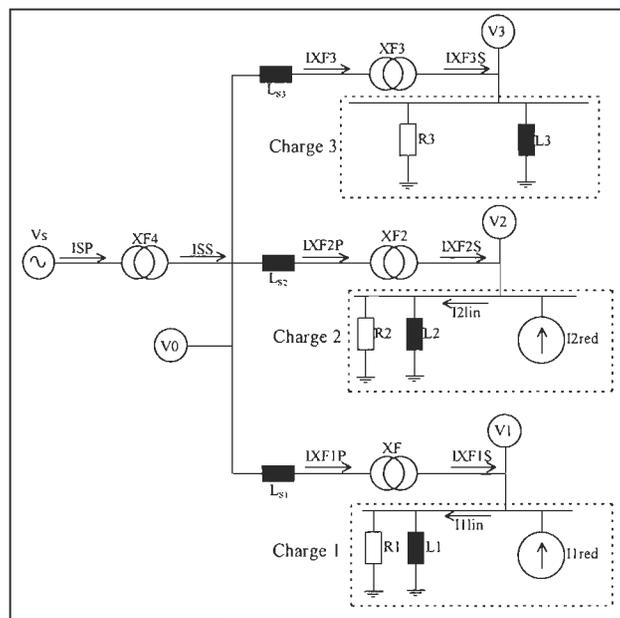


Figure 7-4 Schéma unifilaire du système itératif simulé (1er sous-système)

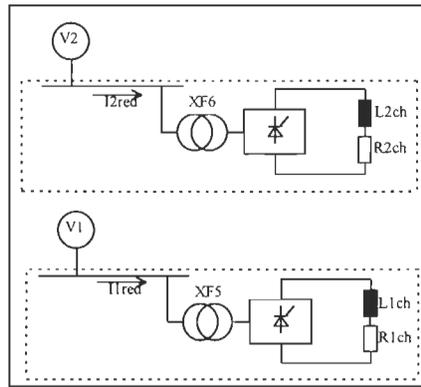


Figure 7-5 Schéma unifilaire du système itératif à simuler (2e sous-système)

La méthode itérative de simulation globale a comme objectif premier de diminuer le temps de simulation requis pour un système tel que décrit à la Figure 7-1. Le système global est divisé en deux sous-systèmes. Le premier sous-système comprend l'ensemble du réseau en remplaçant les convertisseurs de puissance par des sources de courant triphasées non linéaires équivalentes. Le second sous-système comprend les convertisseurs de puissance avec ses charges et ses transformateurs alimentés par des sources de tensions équivalentes. Le premier sous-système (Figure 7-4) est utilisé pour calculer les sources de tension équivalentes appliquées comme entrées au deuxième sous-système (Figure 7-5) alors que le deuxième sous-système est utilisé pour calculer les sources de courant non linéaires équivalentes utilisées comme entrées au premier sous-système.

La simulation par itération comporte principalement 4 étapes. Il est bon de noter que différents paramètres comme le temps total de simulation, le pas de calcul minimum et maximum en plus de la tolérance devront être préalablement définis par l'utilisateur et qu'il est possible de définir des paramètres différents pour chaque sous-système à simuler.

7.3.1.1 Première étape - initialisation

La première étape est une étape d'initialisation. L'initialisation permet d'injecter dans l'espace de travail (workspace) des vecteurs de valeur nulle ou non nulle (près des valeurs prévues) pour initialiser les variables utilisées par la méthode itérative et échangées entre les sous-systèmes. Pour l'exemple étudié, des vecteurs de valeur nulle ont été utilisés pour les tensions d'alimentation des transformateurs des convertisseurs de puissance (V1 et V2) (Figure 7-5) et pour les courants consommés par les redresseurs de puissance (i1red et i2red) (Figure 7-4). Le programme permet deux types d'utilisations: soit une utilisation manuelle ou soit automatique. Pour l'utilisation manuelle, à la fin de chaque itération, les résultats des courants de redresseurs (I1red et I2red) de même que les tensions d'alimentation des redresseurs (V1 et V2) sont affichées et l'utilisateur a le choix de poursuivre ou non pour une autre itération. Pour le mode automatique, l'utilisateur peut définir préalablement le nombre total d'itérations totales à effectuer.

7.3.1.2 Deuxième étape - simulation du premier sous-système

L'étape suivant l'initialisation représente la simulation du premier sous-système. Pendant cette étape, le premier sous-système est simulé suivant l'algorithme de calcul spécifié et les paramètres définis par l'utilisateur. Dans le cas de l'exemple étudié, l'algorithme de calcul utilisé est GEAR. Le premier sous-système est composé du système total dans lequel on a remplacé les convertisseurs par des sources de courant non linéaire triphasées (Figure 7-4). Pour la première itération, les valeurs des sources de courants non linéaires équivalentes ont été définies pendant la phase d'initialisation. Le but de cette étape est de calculer, en plus de tous les signaux intéressants, les tensions d'alimentation des transformateurs des convertisseurs de puissance. Ces tensions serviront d'alimentation pour la simulation du second sous-système (Figure 7-5) présenté à la section 7.3.1.3. Les variables échangées du premier sous-système vers le second sous-système sont les tensions d'alimentations des transformateurs des redresseurs, soit $V1$ et $V2$. (voir Figure 7-4)

7.3.1.3 Troisième étape - simulation du second sous-système

La troisième étape est la simulation du second sous-système (Figure 7-5). Ce sous-système comprend les convertisseurs de puissance et leur transformateur respectif. Les entrées de ce sous-système sont les tensions équivalentes calculées à la section 7.3.1.2 tandis que les sorties sont les courants consommés par les transformateurs des convertisseurs de puissance. À la fin de cette étape, si une prochaine itération doit être accomplie, ces courants seront utilisés comme sources de courant non linéaire équivalentes au premier sous-système lors de la prochaine itération. Alors, le programme retourne à l'étape décrite en 7.3.1.2. Les variables échangées du second sous-système vers le premier sous-système sont les courants consommés par les transformateur des redresseurs, soit $I1red$ et $I2red$.

7.3.1.4 Quatrième étape - étape finale

Cette étape sert principalement à afficher les différents résultats obtenus par la simulation globale avec itération et à effectuer le traitement des résultats obtenus.

7.3.2 Caractéristiques du système étudié

Le système étudié est décrit d'une façon globale aux Figure 7-2 et Figure 7-3 et les sous-systèmes employés pour la méthode itérative sont représentés aux Figure 7-4 et Figure 7-5. Le tableau 7-1 affiche les valeurs des paramètres des éléments formant le système étudié.

Tableau 7-1 Paramètres affectées aux différentes variables (Figure 7-2)

Transformateurs	Puissance nominale (kVA)	Tensions ligne à ligne primaire/secondaire (V)
XF1	1107.3	4160/600
XF2	486.33	4160/600
XF3	135.1	4160/600
XF4	5186	12470/4160
XF5	540	600/208
XF6	270.2	600/208
Source	Tension ligne à ligne (V)	
Vs	12470	
Lignes de distribution	Longueur (km)	
Ls1	50	
Ls2	10	
Ls3	20	
Charges	Valeur	
L1	7.58 mH	
R1	6.65 Ω	
L1ch	0.183 mH	
R1ch	0.161 Ω	

7.3.3 Simulation

Dans un premier temps, afin de démontrer l'avantage de la méthode itérative sur la méthode de simulation globale classique, trois simulations ont été effectuées afin de comparer les résultats. Ces simulations ont toutes été effectuées suivant les mêmes paramètres (pas de calcul, tolérance,...) et pour la même période de temps, soit 2/60 secondes. Voici la description des trois simulations réalisées :

- Première simulation : deux itérations ont été effectuées et les résultats ont été sauvegardés pour fin de comparaison.
- Deuxième simulation : trois itérations ont été effectuées et les résultats ont été sauvegardés pour fin de comparaison.
- Troisième simulation : le système a été simulé globalement (aucun sous-système). Les résultats de cette simulation ont été sauvegardés pour fins de comparaison.

Pour cet exemple, le micro ordinateur utilisé est un compatible IBM avec processeur pentium 133 MHz et 16 Mo de mémoire vive. Pour chacune des simulations, le temps d'utilisation du microprocesseur a été évalué par le logiciel MATLAB, de façon à comparer les temps d'exécution des trois simulations.

Afin de réaliser la simulation par itérations, on doit tout d'abord déterminer le nombre d'itérations requises afin d'obtenir des résultats respectant l'erreur maximale acceptable. On a

donc comparé les résultats pour une et deux itérations de façon à évaluer l'erreur. L'évaluation de cette erreur nous permet de déterminer s'il y a besoin d'effectuer une deuxième itération. Si l'erreur ne respecte pas les critères établis (1%), on peut conclure qu'il est préférable d'effectuer, pour ce système, deux itérations plutôt qu'une itération. On a ensuite simulé le système pour trois itérations pour vérifier s'il est nécessaire d'effectuer la troisième itération. L'erreur entre les résultats de la deuxième et de la troisième itération respectant la limite fixée, ceci nous permet de conclure qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer la troisième itération puisque les résultats sont pratiquement les mêmes avec seulement deux itérations.

On compare ensuite les résultats obtenus par la méthode à deux itérations et les résultats obtenus par la méthode globale classique. De cette façon, on s'assure de la validité de la méthode sur l'exactitude des résultats comparativement à ceux obtenus par simulation globale classique.

7.3.4 Résultats de simulation

7.3.4.1 Comparaison des résultats pour deux itérations et trois itérations

Afin de déterminer combien d'itérations sont nécessaires pour obtenir des résultats qui respectent la marge d'erreur définie, on a tout d'abord simulé le système pour deux itérations. Les résultats sont comparés à une simulation où trois itérations ont été effectuées. Pour chacune des courbes qui suivent, quatre graphiques sont présentés. Les trois premières courbes correspondent aux signaux calculés pour la phase A, B et C respectivement. Les signaux calculés avec deux itérations et avec trois itérations sont superposées sur les trois premières courbes de chaque figure. La quatrième courbe représente la différence entre les résultats obtenus pour la deuxième itération et pour la troisième itération pour la phase A. Afin de limiter l'espace utilisé par la présentation des résultats, seulement les variables présentant les erreurs les plus grandes sont présentées ici. Les résultats sont présentés aux Figure 7-6 à Figure 7-9.

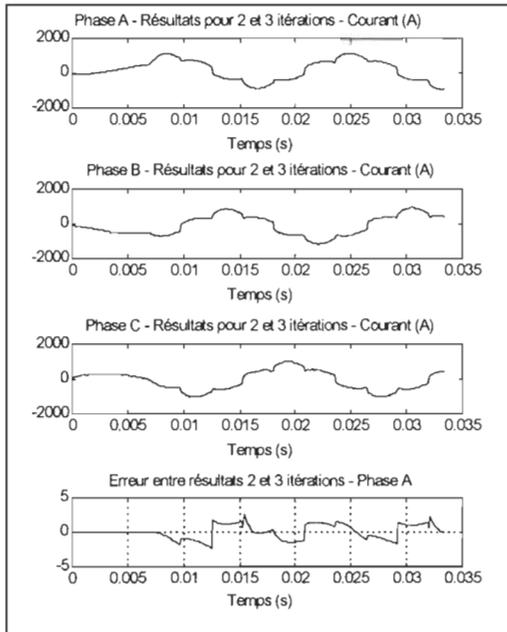


Figure 7-6 ixf1s-Courant au secondaire du transformateur XF1

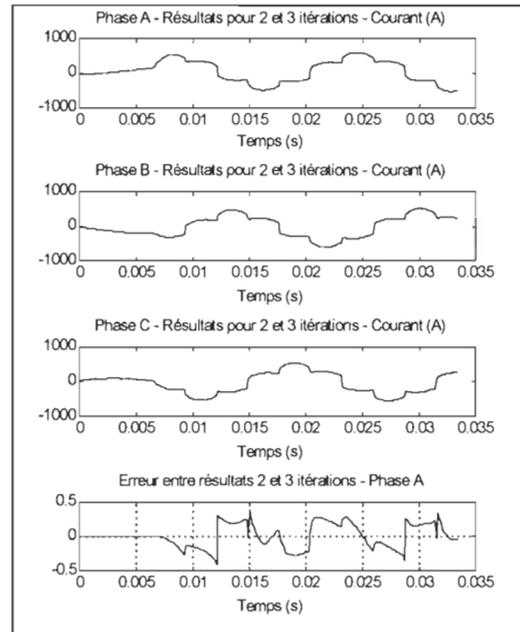


Figure 7-7 ixf2s-Courant au secondaire du transformateur XF2

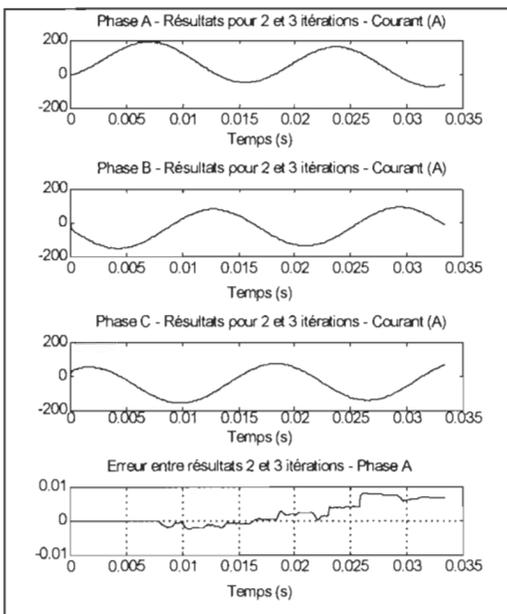


Figure 7-8 ixf3s-Courant au secondaire du transformateur XF3

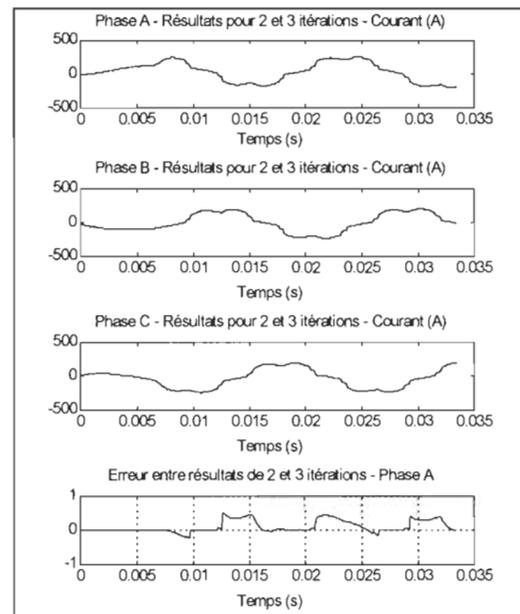


Figure 7-9 iss-Courant au secondaire du transformateur XF4

7.3.4.2 Comparaison des résultats pour deux itérations et simulation globale

Après avoir défini le nombre d'itérations nécessaires pour l'obtention de résultats valables, on doit vérifier l'exactitude de ces résultats. Afin de valider la justesse des résultats obtenus par la méthode itérative de simulation globale, on compare ceux-ci aux résultats obtenus par la méthode

de simulation globale classique. On simule donc le système total sans tenir compte de la méthode itérative. En évaluant l'erreur pour chacun des signaux entre les résultats donnés par la méthode de simulation globale classique et la méthode itérative de simulation globale, il est possible d'évaluer la validité de la méthode proposée pour ce type de simulation. Afin de limiter l'espace occupé par l'affichage des résultats, seulement les résultats présentant la plus grande erreur sont présentés. Les résultats sont présentés aux Figure 7-10 à Figure 7-13.

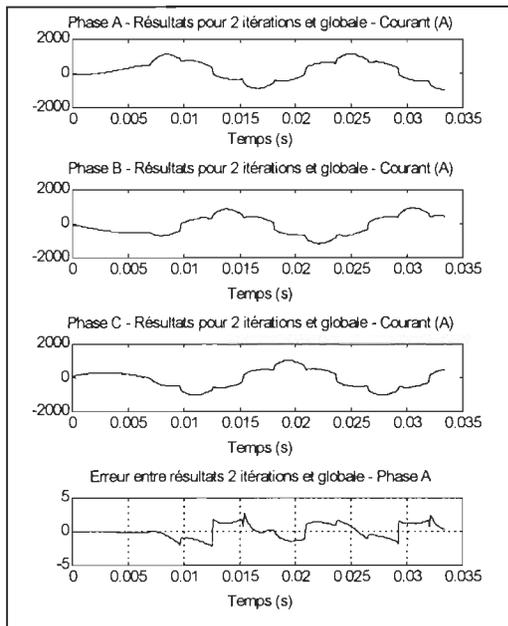


Figure 7-10 ixfls-Courant au secondaire du transformateur XF1

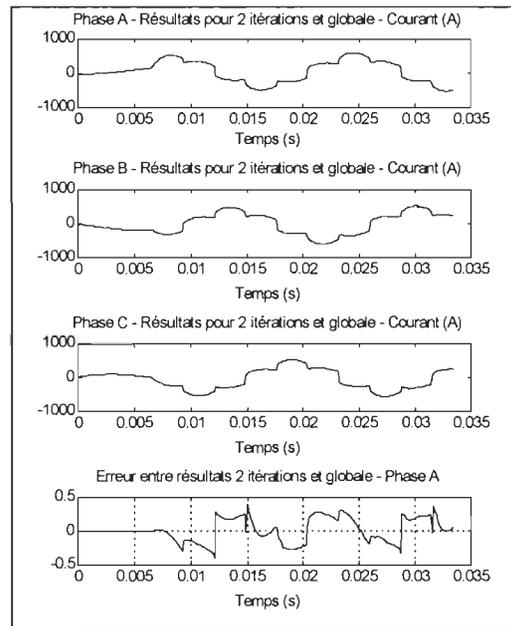


Figure 7-11 ixf2s-Courant au secondaire du transformateur XF2

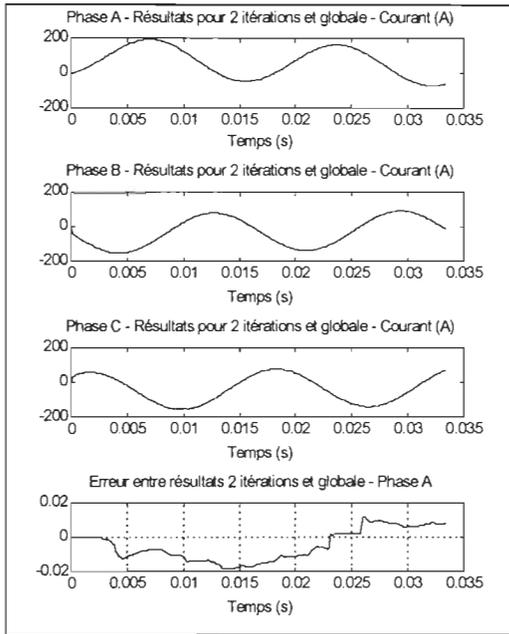


Figure 7-12 ixf3s-Courant au secondaire du transformateur XF3

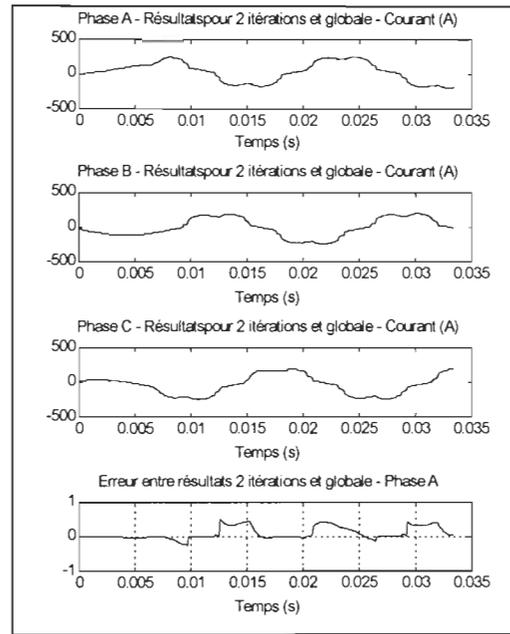


Figure 7-13 iss-Courant au secondaire du transformateur XF4

7.3.4.3 Simulation sur plusieurs cycles

Dans le but de vérifier la convergence des résultats en régime permanent, il est nécessaire de simuler le système pour une période de temps plus longue. Précédemment, la simulation portait sur 2 cycles de 60 Hz, soit 2/60 secondes. Afin de vérifier si, en régime permanent, la méthode fournit des résultats qui demeurent dans la marge d'erreur prévue, on simule le système total sur une période de temps plus étendue. Suivant l'exemple proposé, la simulation a été réalisée sur une période de 10 cycles de 60Hz, soit 10/60 secondes. Le système est tout d'abord simulé suivant la méthode itérative de simulation globale avec deux itérations, puis, selon la méthode de simulation globale classique. De cette façon, il est possible d'évaluer l'erreur en régime permanent de la méthode itérative par rapport à la méthode classique. Les résultats présentés ici sont sommaires par soucis d'économie d'espace. Seulement les résultats critiques sont présentés. Les résultats présentés aux Figure 7-14 à Figure 7-17 montrent les signaux calculés par les deux méthodes de même que la différence pour chaque signal pour la phase A.

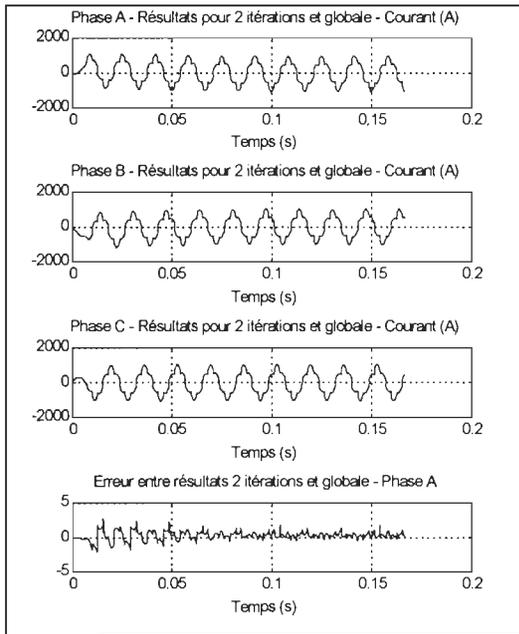


Figure 7-14 Courant au secondaire du transformateur XF1

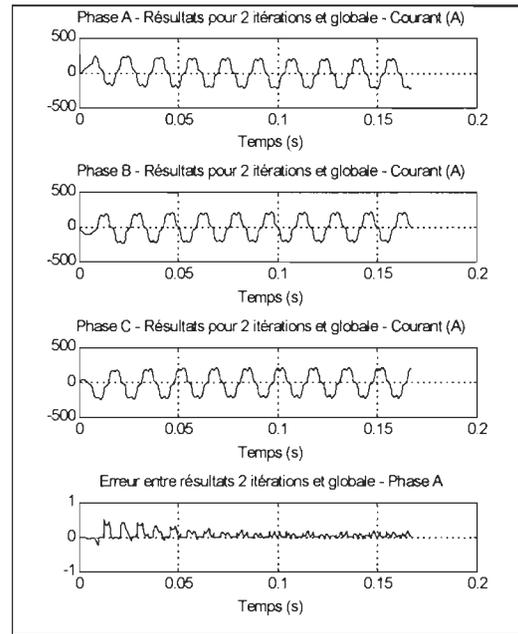


Figure 7-15 Courant au secondaire du transformateur XF2

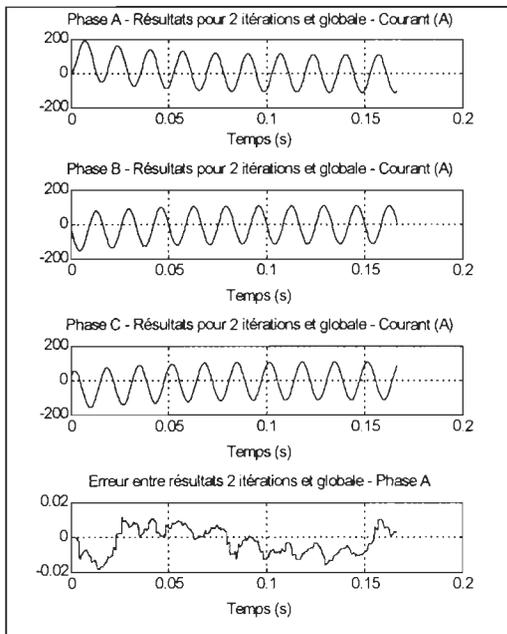


Figure 7-16 Courant au secondaire du transformateur XF3

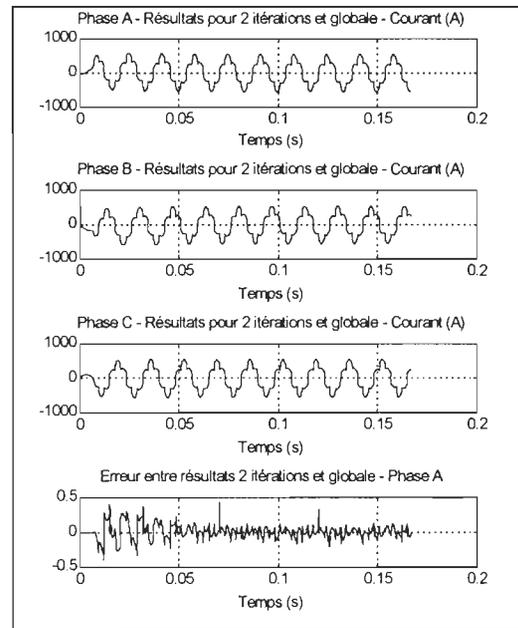


Figure 7-17 Courant au secondaire du transformateur XF4

7.3.4.4 Temps de calcul

Les résultats les plus importants suite à ces simulations sont les temps de calcul des différentes méthodes évaluées. Le tableau 7-2 fait état de ces résultats.

Tableau 7-2 Résultats obtenus pour le temps d'utilisation du CPU

Type de simulation	nombre d'itérations	temps simulé (s)	Temps d'utilisation du CPU
Globale classique	N/A	2/60	29min. 50s.
Itérative	2	2/60	7min. 54 s.
Itérative	3	2/60	11min. 40s.
Globale classique	N/A	10/60	1h. 57min. 30s.
Itérative	2	10/60	46 min. 50s.

Suite à ces résultats, on peut remarquer que l'économie du temps d'utilisation du CPU pour une simulation par la méthode itérative est non négligeable. Le gain en temps d'utilisation du CPU pour la simulation à trois itérations est de 60.89% par rapport à celui requis par la méthode de simulation globale classique et ce gain passe à 73.52% pour la méthode à deux itérations pour une simulation sur une période de 2/60 seconde.

7.4 Conclusion

Le but de l'utilisation de la méthode itérative de simulation globale étant de diminuer le temps de calcul pour un système modélisant un réseau de distribution d'énergie électrique a été réalisé. Les données recueillies montrent que la méthode est fonctionnelle pour ce type de simulation. Le gain en temps observé par la méthode itérative de simulation globale par rapport à la méthode de simulation globale classique est de 60.15 % pour une simulation sur une période de 10/60 seconde. Cependant, pour une simulation où un phénomène transitoire du type d'un enclenchement de condensateur est étudié, cette méthode itérative de simulation globale n'est plus valide pour un pas de calcul constant. La constante de temps du phénomène transitoire étant souvent inférieure à la constante de temps minimale des composants du système. Il faudra alors prévoir le pas de calcul minimum en fonction de la constante de temps du phénomène étudié.

CHAPITRE 8

8. Simulation du BEEP : Étude de divers phénomènes

8.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents résultats relatifs à la simulation de phénomènes transitoires pouvant être présents sur un réseau de distribution d'énergie électrique. Les modèles de simulation employés proviennent de la librairie SIMUBEEP présentée au chapitre 6.

La simulation du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP") en utilisant les valeurs présentées au chapitre 2 n'est pas présenté ici. Les résultats obtenus lors d'essais de simulation n'étant pas concluants. La principale raison attribuée au mauvais fonctionnement de la simulation du BEEP est attribuée à une mauvaise évaluation des paramètres du banc d'essai. Ces paramètres devront ultérieurement être déterminés par une série de tests en court-circuit et en circuit ouvert. Cependant, dans un souci de présenter des résultats pour fins de comparaisons, un système équivalent a été simulé. Celui-ci permettra de comparer, à tout le moins qualitativement, les résultats obtenus par essais en utilisant le BEEP et par simulation, utilisant la librairie SIMUBEEP. Dans un désir d'offrir une comparaison qualitative des résultats, les transformateurs simulés, tout comme ceux du BEEP, sont de même puissance. Le système simulé a une source de puissance infinie de tension 12470V ligne à ligne débitant l'énergie à travers un transformateur principal abaissant la tension à 4160 V ligne à ligne à deux charges alimentées par des transformateurs abaissant la tension à 600 V ligne à ligne. Les connexions des transformateurs sont les mêmes que celles qu'on peut retrouver pour le banc d'essai soit :

Transformateur primaire à connexion $\Delta\Delta$

Transformateur de distribution de la charge linéaire à connexion YY

Transformateur de distribution de la charge non linéaire à connexion YY

La figure 8-1 présente le schéma du montage utilisé pour la simulation utilisant SIMUBEEP et les essais utilisant le BEEP.

Les phénomènes simulés sont :

- Enclenchement et déclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs (SWC)
- Enclenchement d'une charge inductive triphasée (SWL)

En plus de ces phénomènes ayant été étudiés en utilisant le BEEP, la simulation porte sur les phénomènes suivants :

- Chute de la tension du réseau de 30% pour une période de 0.08 seconde (4.8 cycles)
- Hausse de la tension du réseau de 30% pour une période de 0.08 seconde (4.8 cycles)

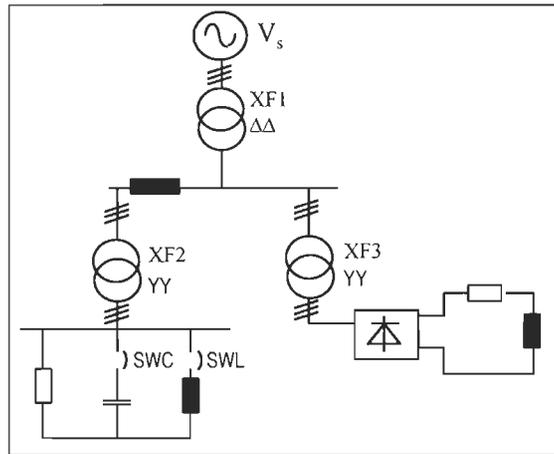


Figure 8-1 Schéma unifilaire du montage utilisé pour le BEEP et SIMUBEEP

8.2 Enclenchement et déclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs (compensateur statique) (enclenchement de SWC, voir figure 8.1)

Le fichier de simulation sous l'environnement SIMULINK est présenté à la figure 8-2. Les résultats sont présentés aux figures 8-3 à 8-7. La principale caractéristique de ce phénomène est l'oscillation du courant de charge linéaire qui est transposée à sa tension par son impédance. Cette oscillation est propagée par l'impédance du transformateur principal mais atténuée dû à l'impédance de la ligne de distribution jusqu'à la charge non linéaire. On peut donc observer une faible perturbation du courant traversant la charge non linéaire. Pour cette simulation, la charge linéaire est résistive et inductive avant l'enclenchement des condensateurs.

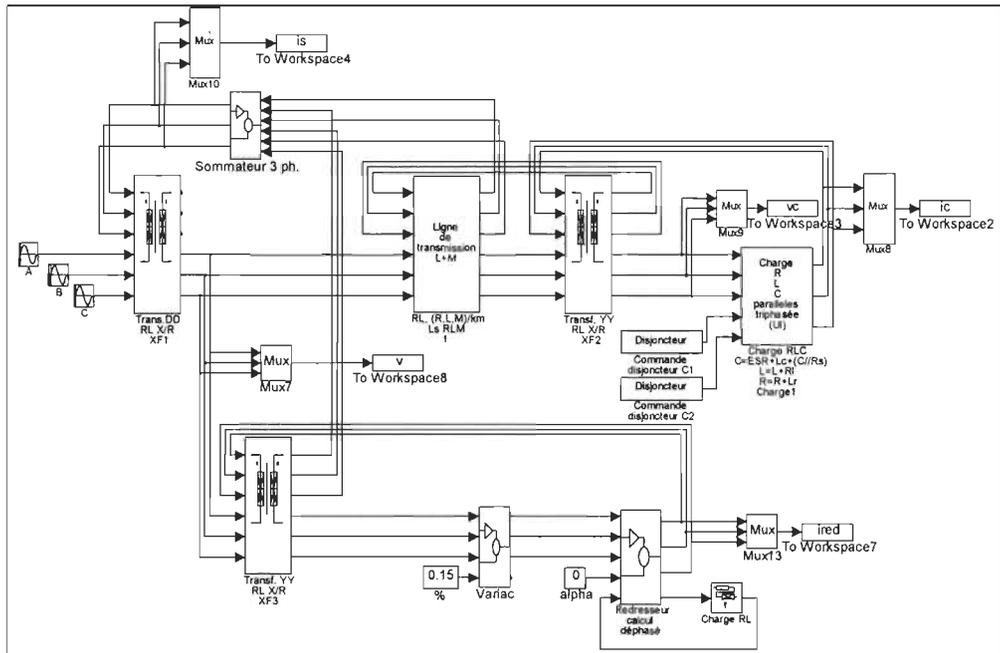


Figure 8-2 Schéma du montage de simulation de disjonction d'une batterie triphasée de condensateurs

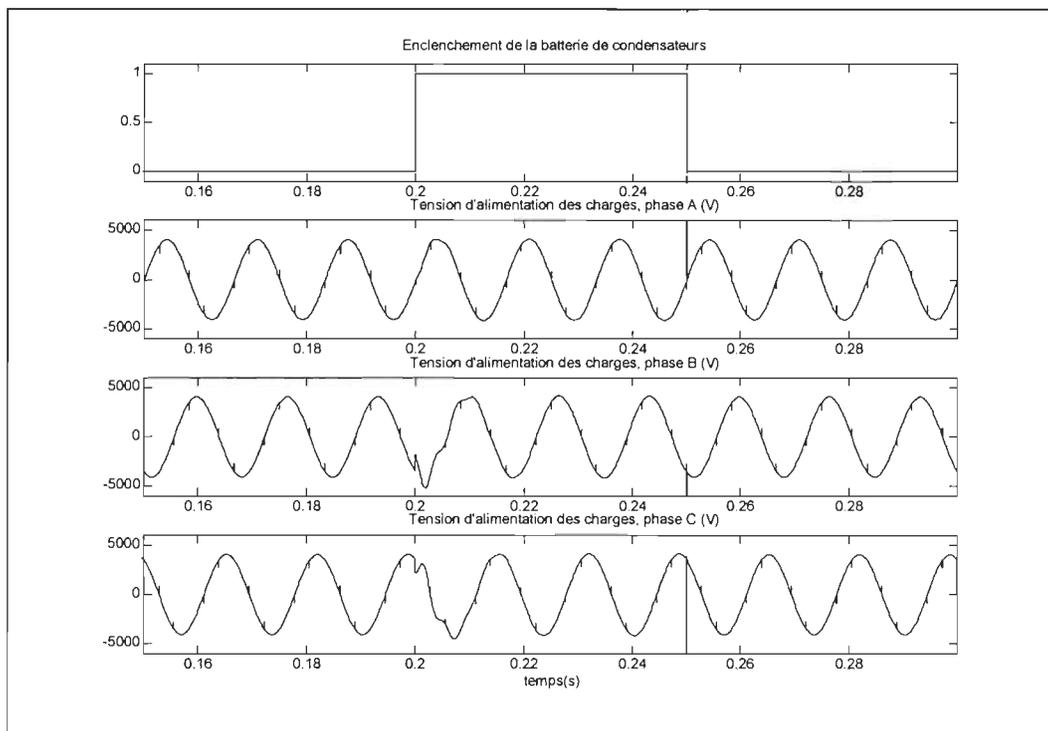


Figure 8-3 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, tension au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

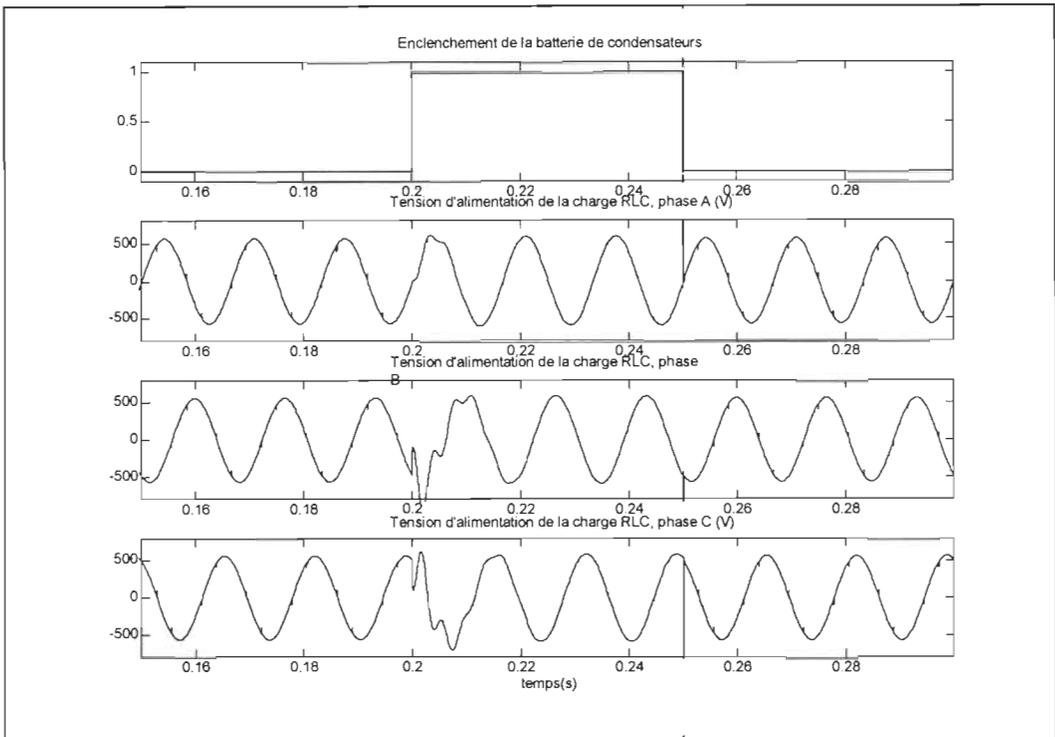


Figure 8-4 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, tension au secondaire du transformateur de distribution de la charge linéaire XF2 (voir figure 8-1)

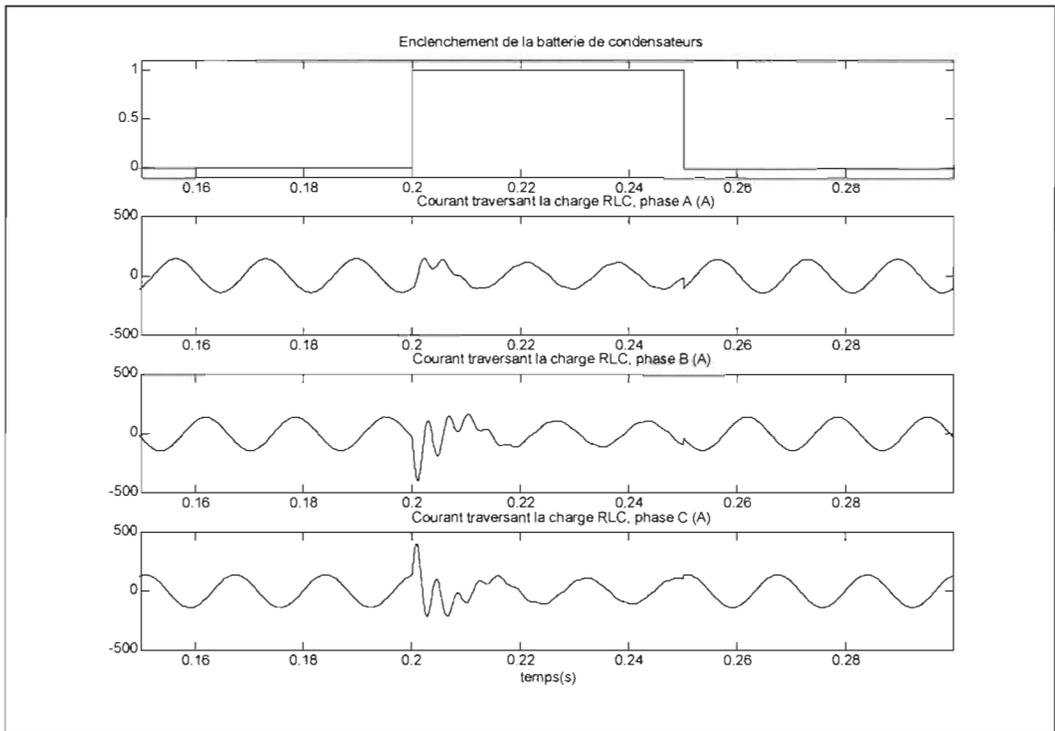


Figure 8-5 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, courant traversant la charge linéaire (voir figure 8-1)

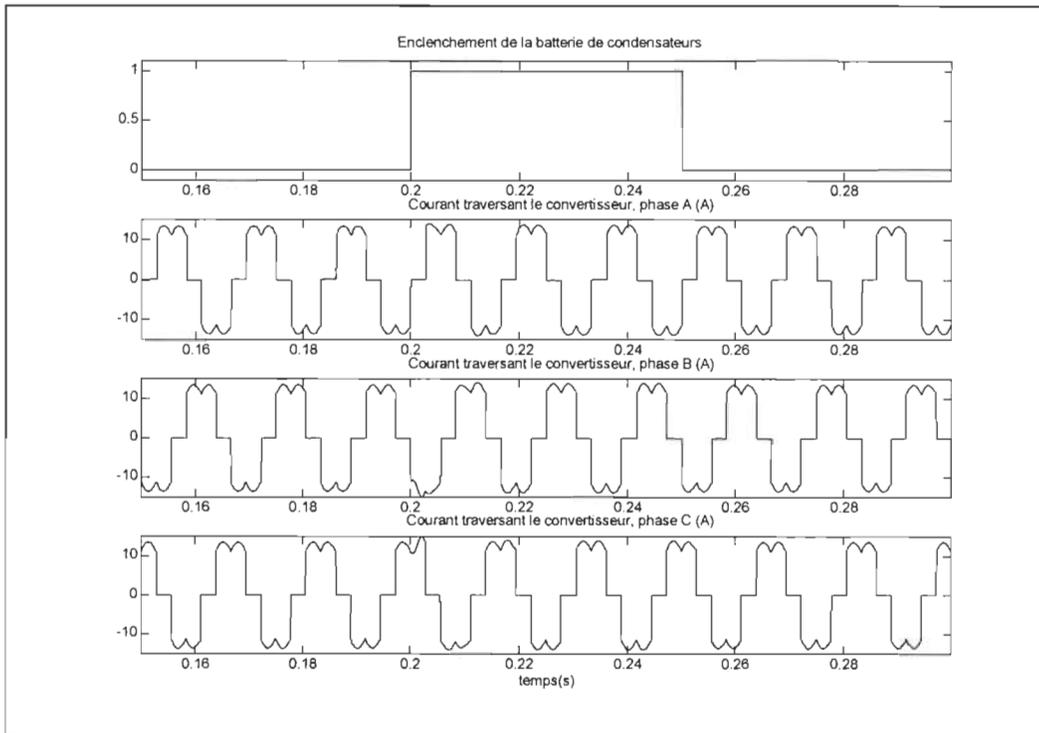


Figure 8-6 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, courant traversant la charge non linéaire (voir figure 8-1)

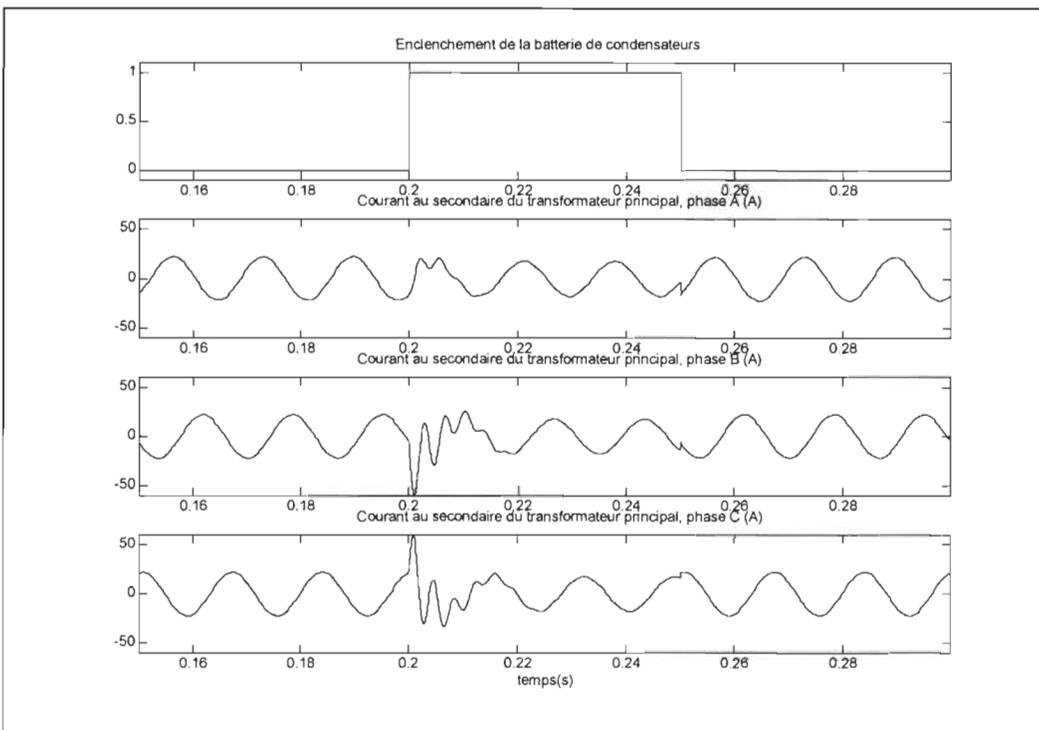


Figure 8-7 Enclenchement et déclenchement d'une batterie de condensateurs, courant au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

8.3 Enclenchement d'une charge inductive triphasée (enclenchement de SWL, voir figure 8-1)

La charge étant principalement résistive, l'interrupteur SWL (figure 8-1) est enclenché. La charge devient donc résistive et inductive. Le fichier de simulation sous l'environnement SIMULINK est présenté à la figure 8-9. Les résultats sont présentés aux figures 8-10 à 8-13. La principale caractéristique liée à ce phénomène est une dissymétrie temporaire des courants traversant la charge linéaire (figure 8-12). Aucune perturbation notable n'est observée à la charge non linéaire sinon une faible chute du courant la traversant (figure 8-13). L'impédance équivalente de la charge linéaire étant diminuée par l'inductance enclenchée, le courant de la charge linéaire augmente en amplitude (figure 8-12). L'augmentation du courant de la charge linéaire provoque une faible chute de tension au transformateur principal (figure 8-10). La charge non-linéaire étant alimentée par une tension un peu plus faible, le courant la traversant (figure 8-13) est diminué de la même façon.

Explication de la dissymétrie du courant de la charge linéaire

La dissymétrie de courant est un phénomène fréquemment rencontré dans un système inductif où on exerce des variations brusques de certains paramètres tel la tension d'alimentation. Cette dissymétrie du courant est peut être expliquée par l'équation 8-1 et la figure 8-8.

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \tag{8-1}$$

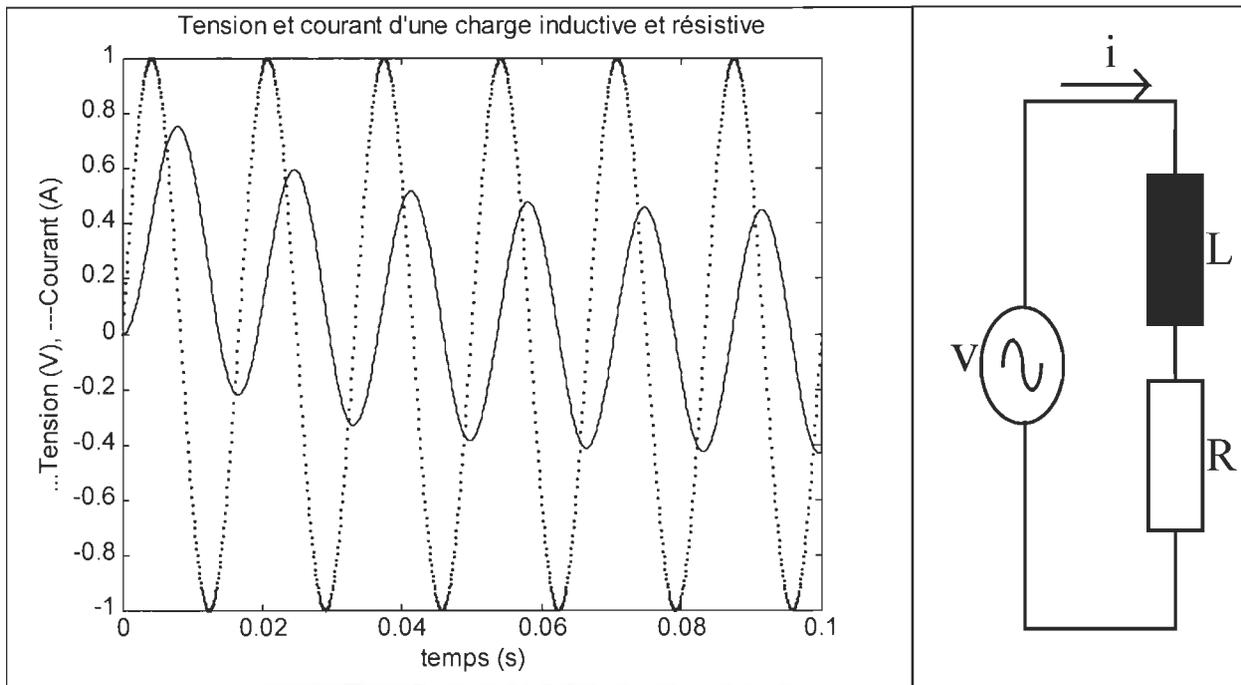


Figure 8-8 Schéma de montage, courant et tension d'une charge RL

La tension d'alimentation étant définie par $v(t)=Asin(\omega t)$, le courant sera défini par $Bcos(\omega t-\alpha)$. La composante continue du signal de courant au moment de l'alimentation dépend de l'angle électrique (ωt) de la tension au moment de l'alimentation de la charge. Pour un système triphasé, les signaux de tension d'alimentation sont déphasés de 120° . La composante continue de chacune des phase ne sera donc pas la même. La constante de temps du phénomène transitoire est proportionnelle à la valeur de la résistance du circuit et inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance du circuit.

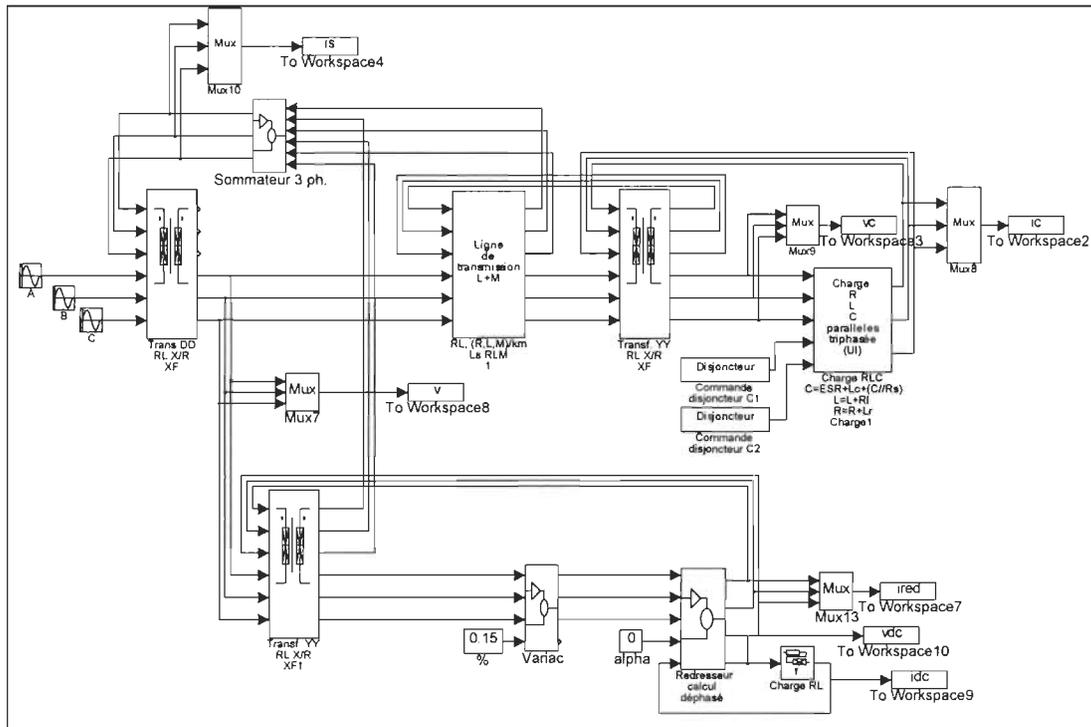


Figure 8-9 Schéma du montage de simulation de disjonction d'une charge inductive triphasée

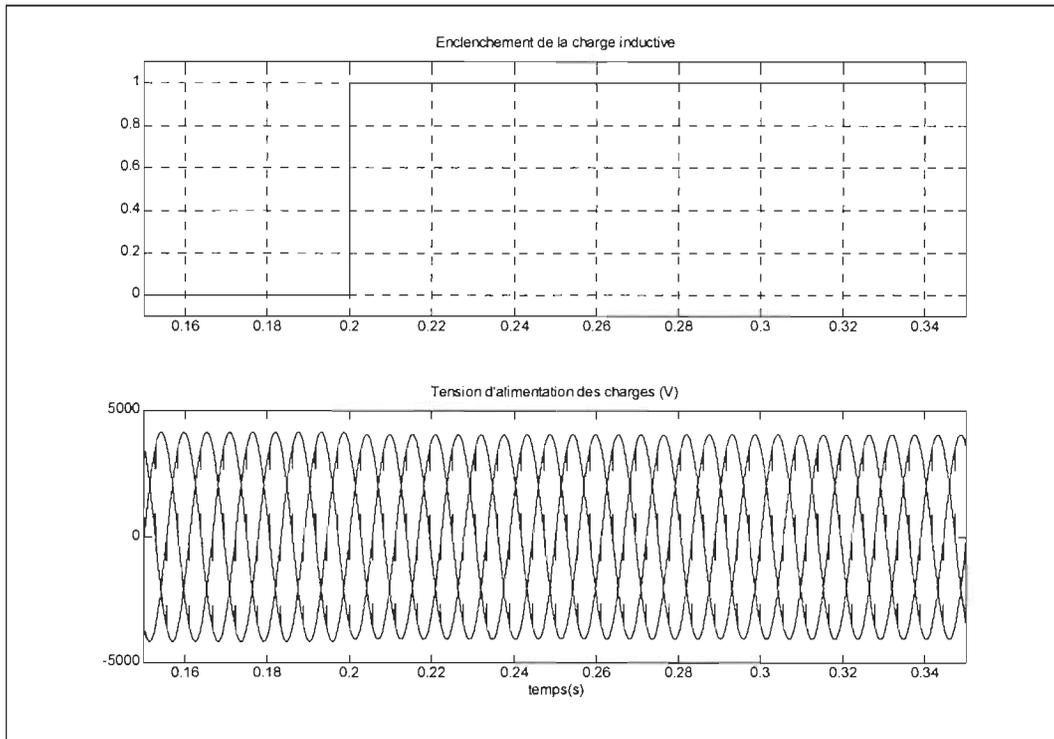


Figure 8-10 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, tension au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

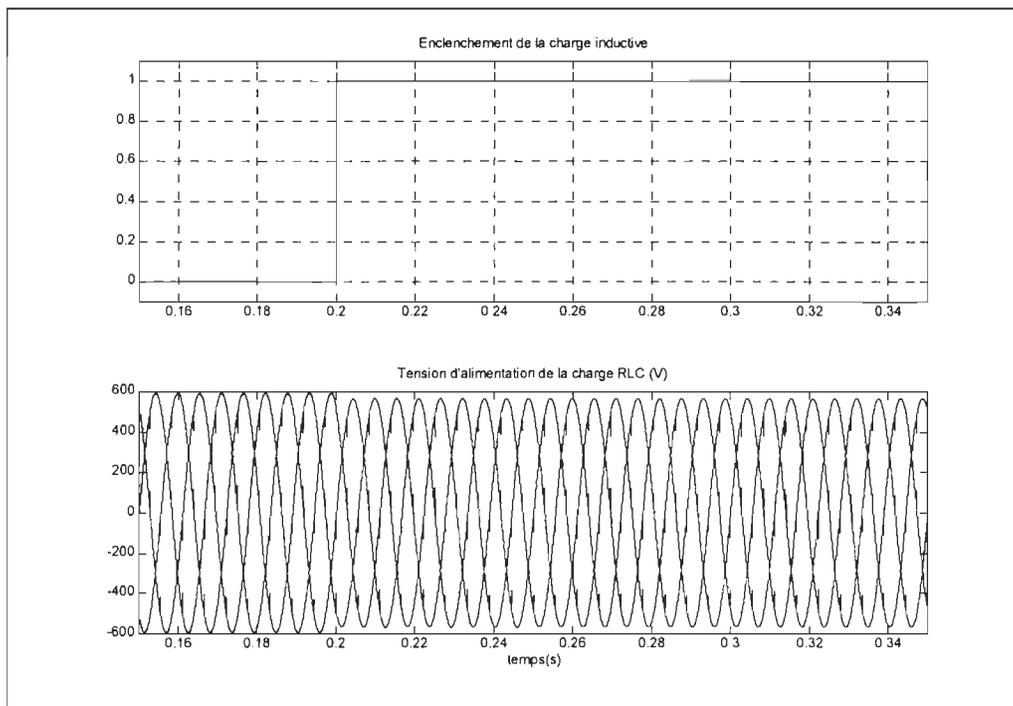


Figure 8-11 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, tension d'alimentation de la charge linéaire XF2 (voir figure 8-1)

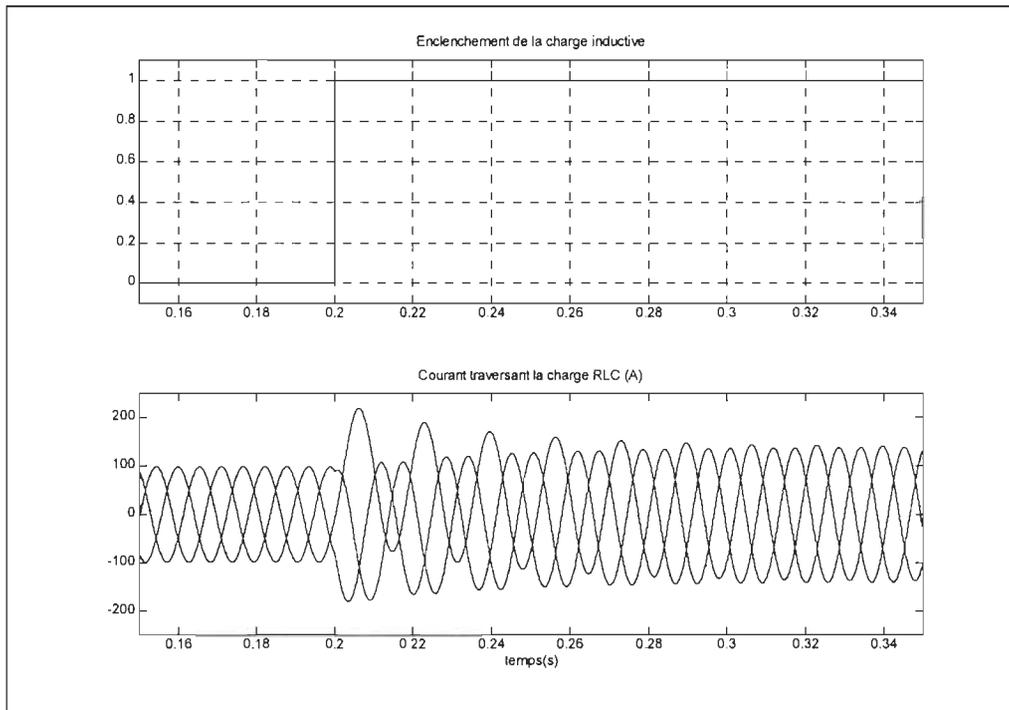


Figure 8-12 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, courant traversant la charge linéaire (voir figure 8-1)

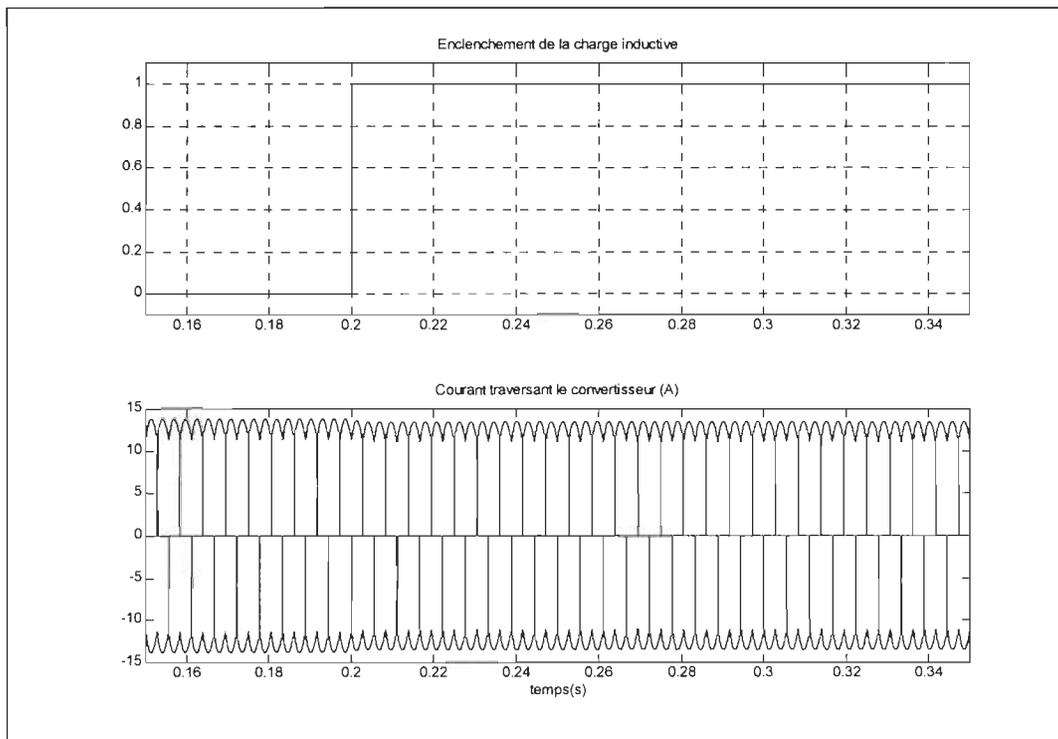


Figure 8-13 Enclenchement d'une charge inductive triphasée, courant traversant la charge non linéaire (voir figure 8-1)

8.4 Chute de la tension du réseau Vs (voir la figure 8-1)

Cette simulation rapporte les résultats d'une chute de la tension triphasée du réseau de 30% pour une période de 0.08 seconde. La charge linéaire est inductive et résistive. Le fichier de simulation sous l'environnement SIMULINK est présenté à la figure 8-14. Les résultats sont présentés aux figures 8-15 à 8-19. La principale caractéristique liée à ce phénomène est la dissymétrie temporaire des courants de la charge linéaire. Cette dissymétrie s'explique par le fait que, au moment de la perturbation, l'amplitude instantanée du tension d'alimentation de chaque phase de la charge linéaire ne soit pas de même amplitude. Comme le courant d'une inductance est une fonction de l'intégration du courant la traversant, le courant, au moment de la perturbation, ne sera pas le même pour les trois charges puisque la tension d'alimentation n'est pas la même d'une charge à l'autre. Aucune perturbation notable peut être observée à la charge non linéaire sinon une chute de sa tension d'alimentation et du courant la traversant. Ceci est due à sa caractéristique qui n'est pas fortement inductive. Le phénomène de dissymétrie des courants de la charge linéaire est expliqué à la section 8.3.

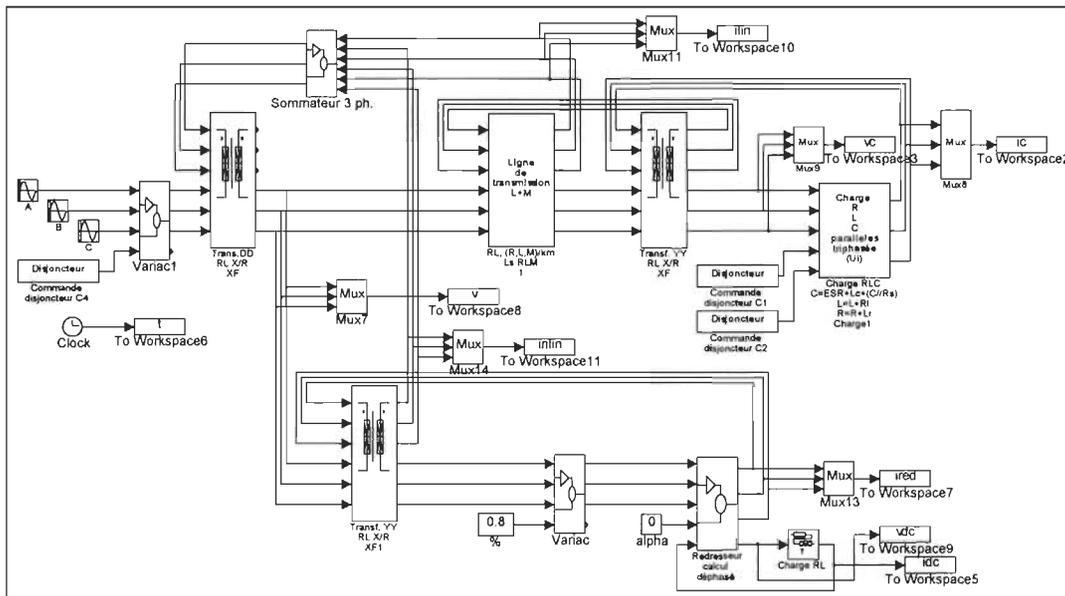


Figure 8-14 Schéma du montage de simulation de chute de la tension du réseau

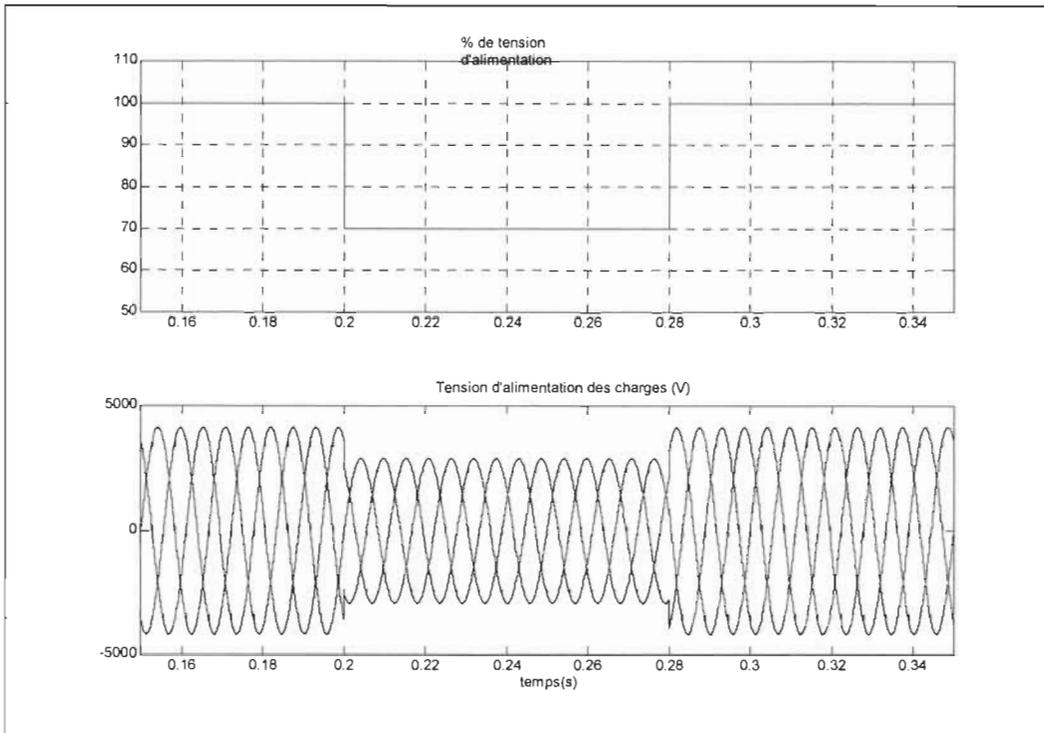


Figure 8-15 Chute de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

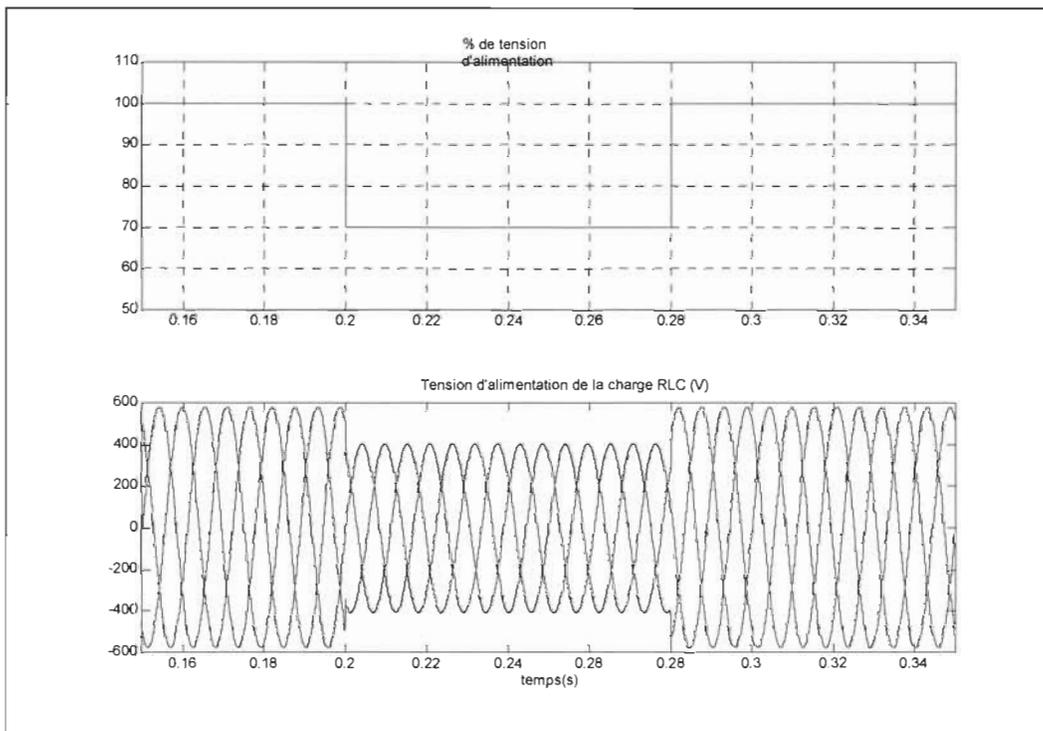


Figure 8-16 Chute de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur de distribution de la charge linéaire XF2 (voir figure 8-1)

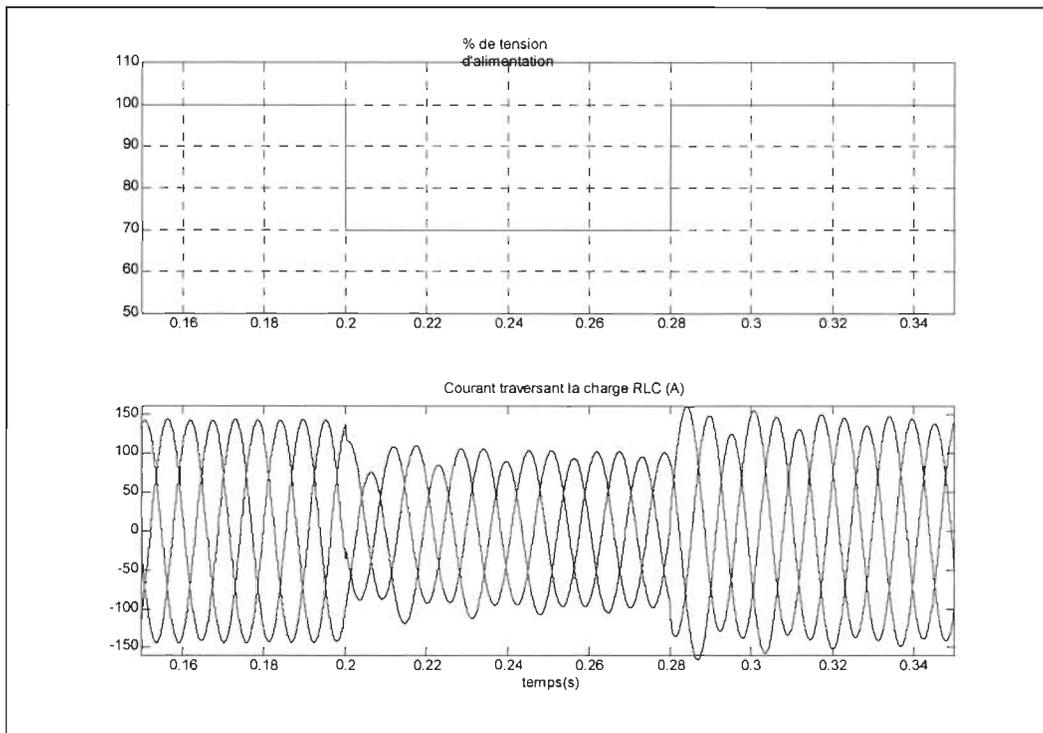


Figure 8-17 Chute de la tension du réseau, courant traversant la charge linéaire (voir figure 8-1)

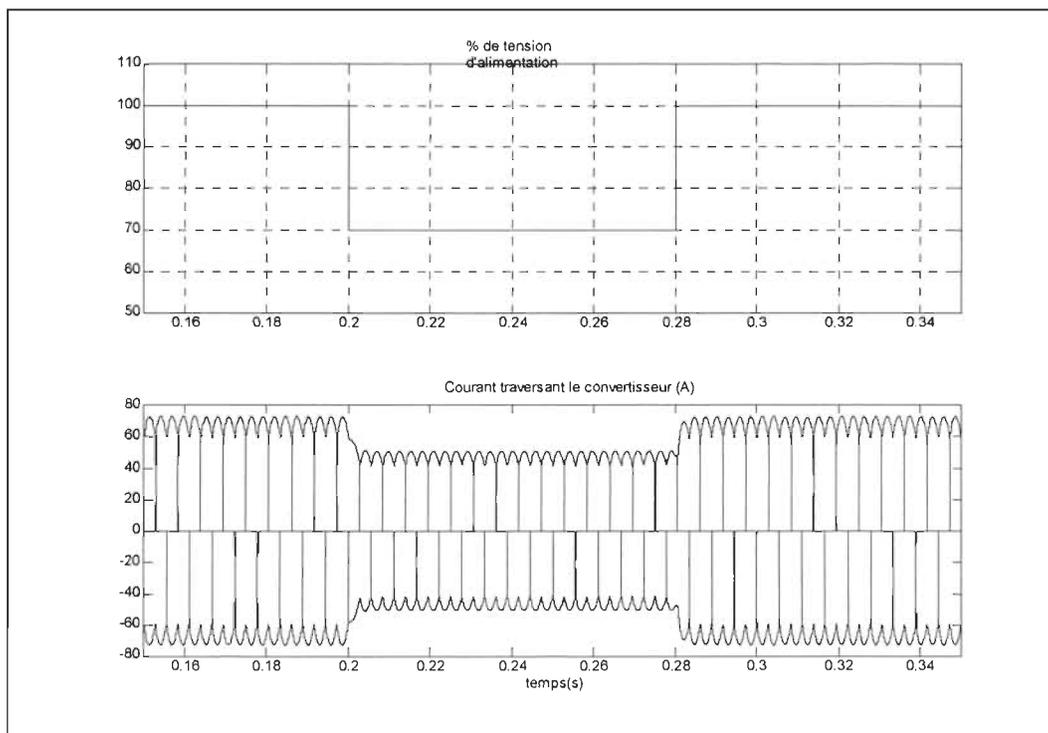


Figure 8-18 Chute de la tension du réseau, courant traversant la charge non linéaire (voir figure 8-1)

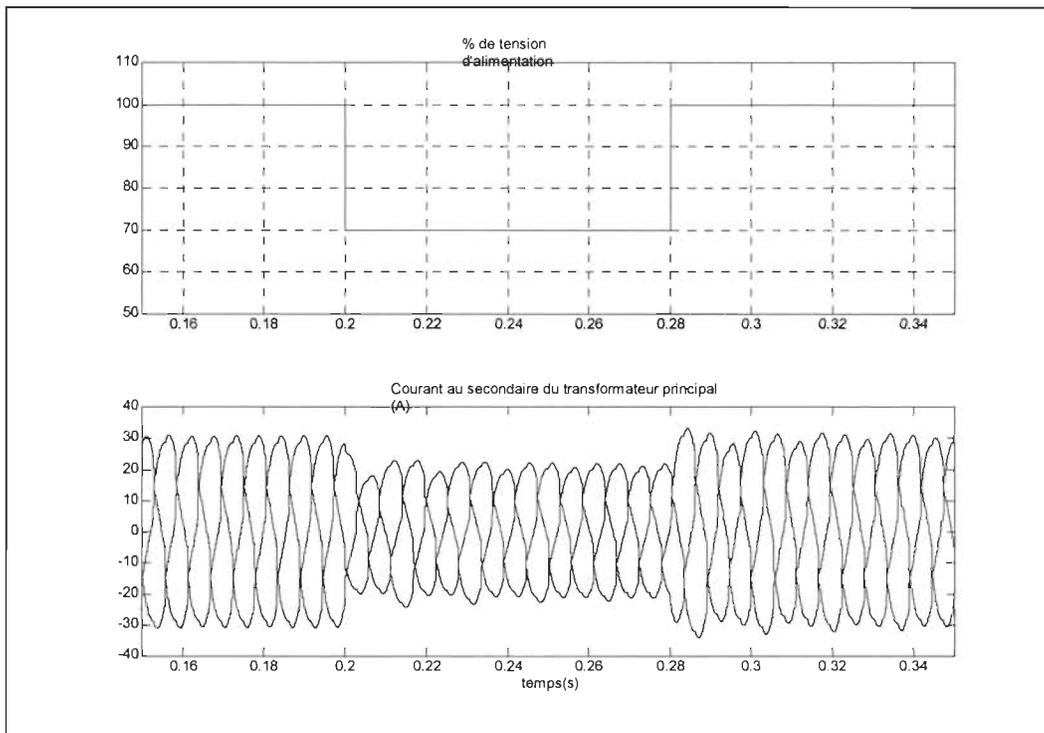


Figure 8-19 Chute de la tension du réseau, courant au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

8.5 Hausse de la tension du réseau V_s (voir figure 8-1)

Cette simulation rapporte les résultats d'une hausse de la tension du réseau de 30% pour une période de 0.08 seconde. La charge linéaire est principalement résistive et inductive. Le fichier de simulation sous l'environnement SIMULINK est présenté à la figure 8-20. Les résultats sont présentés aux figures 8-21 à 8-25. La principale caractéristique liée à ce phénomène est non symétrie temporaire des courants de la charge linéaire. Aucune perturbation notable peut être observée à la charge non linéaire sinon une hausse de sa tension d'alimentation et du courant la traversant. Ceci est due à sa caractéristique qui n'est pas fortement inductive. Le phénomène de dissymétrie des courants de la charge linéaire est expliqué à la section 8.3. Pour cette simulation, la charge linéaire est résistive et inductive.

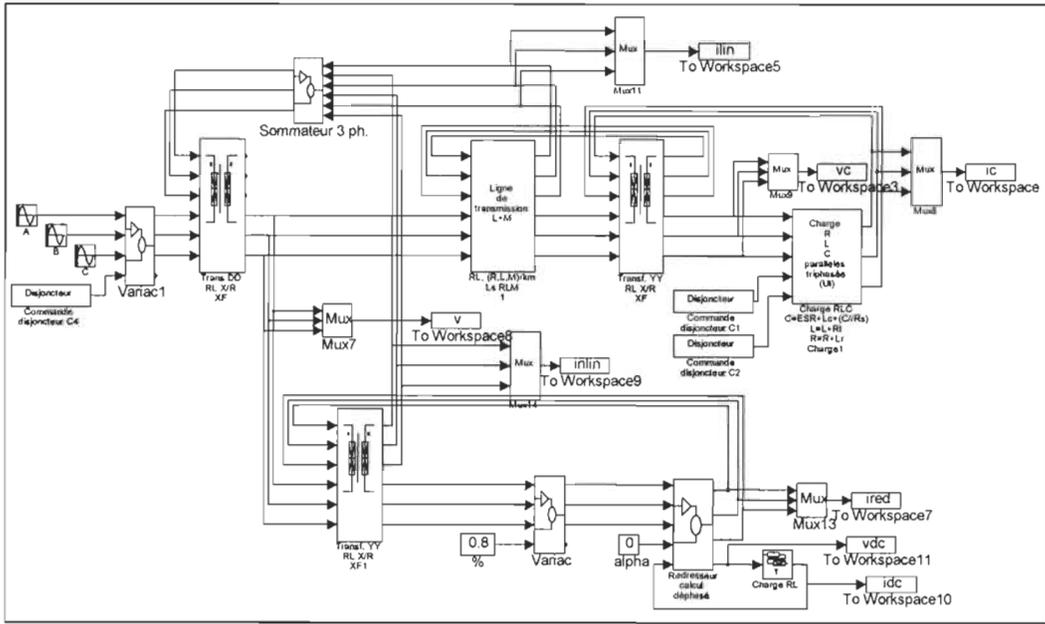


Figure 8-20 Schéma du montage de simulation de chute de la tension du réseau

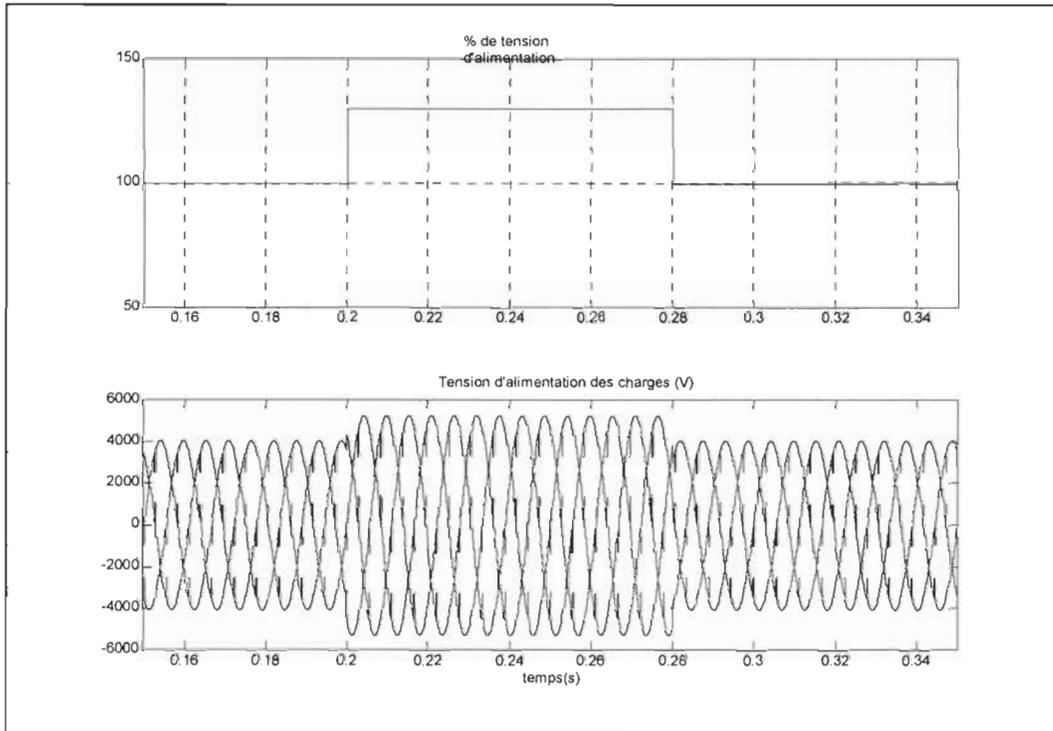


Figure 8-21 Hausse de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

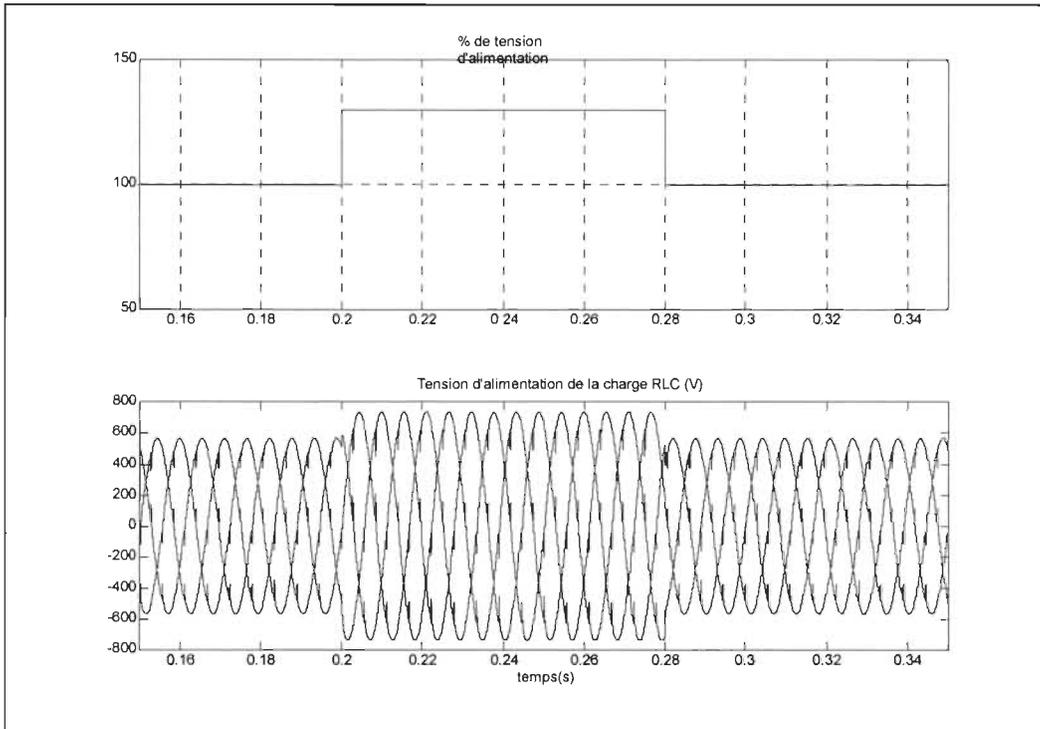


Figure 8-22 Hausse de la tension du réseau, tension au secondaire du transformateur de distribution de la charge linéaire XF2 (voir figure 8-1)

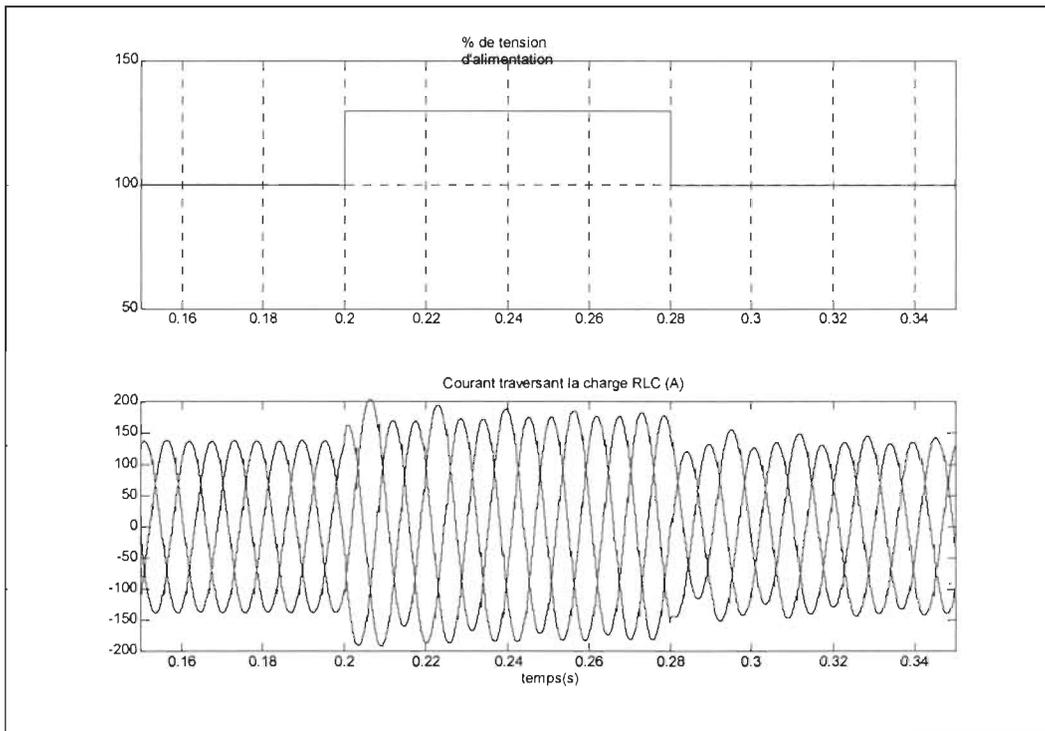


Figure 8-23 Hausse de la tension du réseau, courant traversant la charge linéaire (voir figure 8-1)

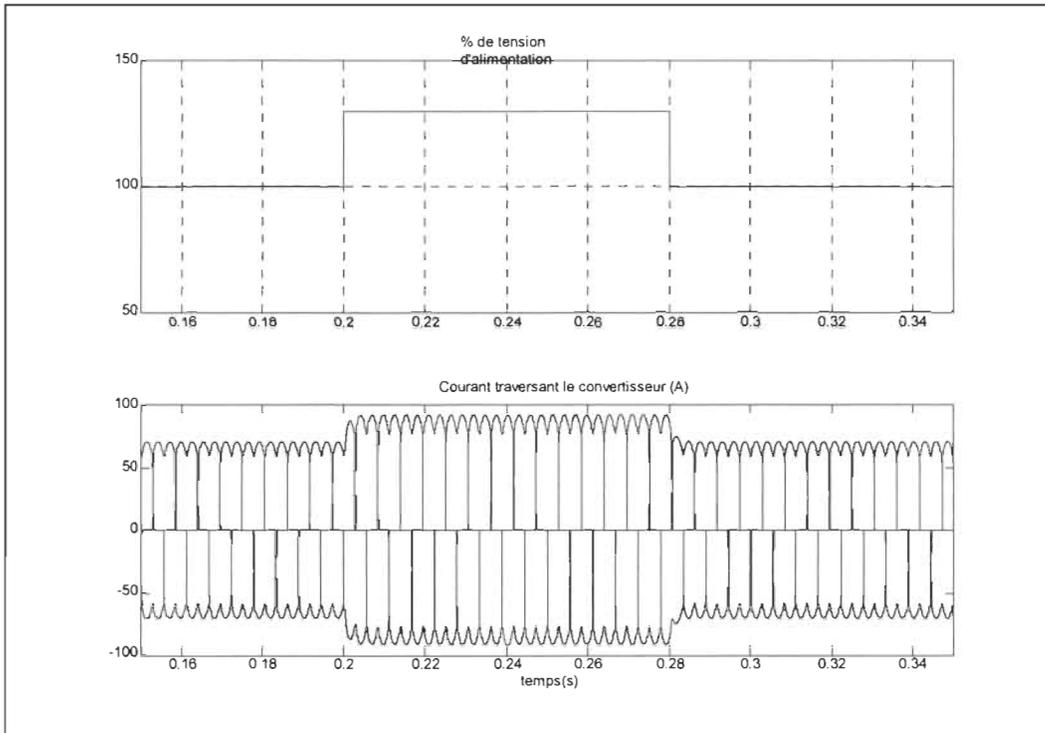


Figure 8-24 Hausse de la tension du réseau, courant traversant la charge non linéaire (voir figure 8-1)

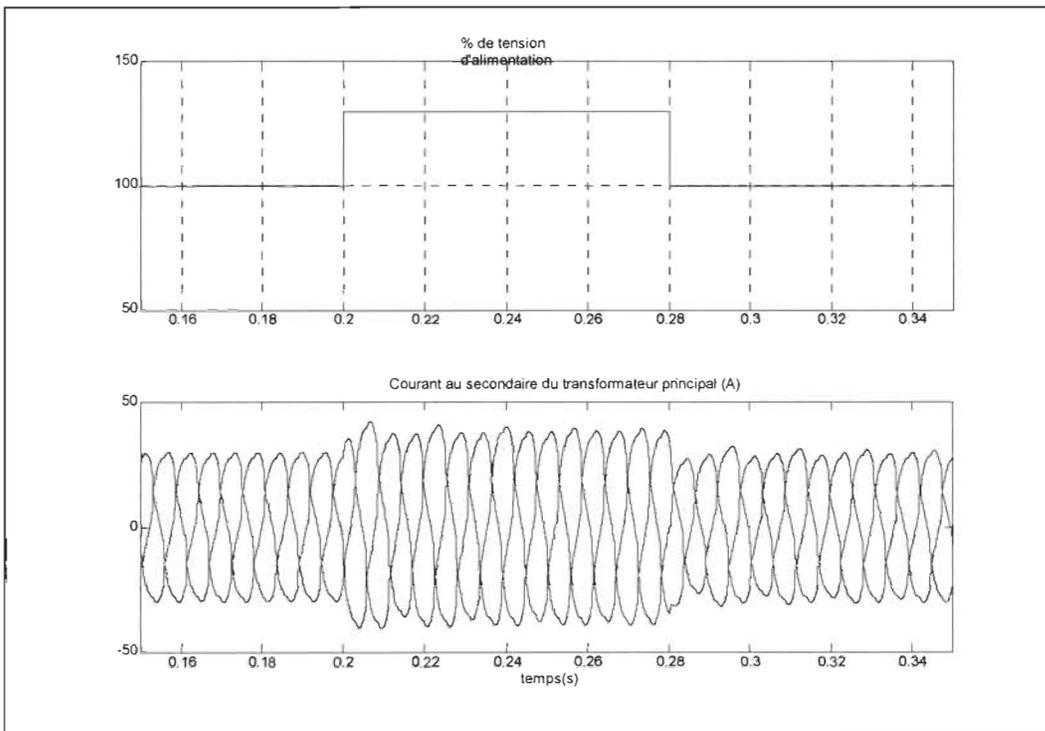


Figure 8-25 Hausse de la tension du réseau, courant au secondaire du transformateur principal XF1 (voir figure 8-1)

8.6 Conclusion

Le présent chapitre présente les résultats obtenus par la simulation de certains phénomènes typiques d'un réseau de distribution de l'énergie électrique en utilisant la librairie de SIMUlation du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations SIMUBEEP. La comparaison de certains des résultats présentés dans ce chapitre avec les résultats obtenus par des essais à l'aide du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations et d'une discussion sur les autres résultats obtenus est présenté au chapitre 9 du présent document.

CHAPITRE 9

9. Analyse des résultats expérimentaux et de simulation

9.1 Introduction

Dans une première étape, afin de valider les résultats obtenus par simulation et les résultats obtenus par des essais effectués sur le Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP"), une comparaison de certains résultats est présentée. Deux phénomènes distincts ont été reproduits lors d'essais sur le BEEP et par simulation. Il s'agit de :

- Enclenchement d'une batterie de condensateurs
- Enclenchement d'une charge triphasée inductive

Les résultats obtenus par la reproduction de ces phénomènes seront comparés et une discussion s'en suivra.

Dans une seconde étape, les résultats obtenus par simulation pour la reproduction de deux autres phénomènes, soient :

- Chute de la tension du réseau
- Hausse de la tension du réseau

seront discutés.

Enfin, une conclusion permettra de faire le point sur ces essais et de formuler les améliorations à apporter à la librairie de simulation SIMUBEEP et au BEEP.

9.2 Comparaison des résultats

Les résultats comparés sont ceux présentés, pour l'enclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs, aux sections 4.3 et 8.2 et pour l'enclenchement d'une charge inductive triphasée aux sections 4.4 et 8.3 de ce document.

9.2.1 Enclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs

L'enclenchement de batteries de condensateurs utilisés comme compensateurs statiques est un phénomène fréquent et connu dans un réseau de transport et de distribution électrique. Les caractéristiques propres d'un tel phénomène sont l'amplitude des oscillations provoquées (pourcentage de dépassement), la fréquence de ces oscillations et le temps d'amortissement du phénomène.

En comparant les résultats obtenus par essai sur le BEEP et par simulation en utilisant la librairie SIMUBEEP, nous pouvons porter un certain jugement sur le fonctionnement des

deux outils d'étude développés et de suggérer certains correctifs ou modifications souhaitables à apporter.

Tel que rapporté au chapitre 8, le système simulé à l'aide de SIMEBEEP ne représente le BEEP que d'une façon qualitative. Le système utilisé pour la simulation ne respecte pas quantitativement les paramètres évalués pour le BEEP. C'est pourquoi, afin de comparer les résultats, une comparaison qualitative est préférée à une comparaison stricte du point de vue quantitatif.

En observant les tensions et les courants de la charge linéaire obtenus par essais à l'aide du BEEP (figures 4-13 à 4-15), on peut remarquer que le dépassement moyen en courant est de l'ordre de 400% que ce soit pour l'essai à l'aide du BEEP ou la simulation à l'aide de SIMUBEEP. Par ailleurs, en analysant les résultats présentés à ces mêmes figures, on peut constater que, pour le BEEP, on peut compter environ 5 oscillations par demi-cycle alors que le nombre d'oscillations par demi-cycle des résultats obtenus par SIMUBEEP est de l'ordre de 3. Le temps d'amortissement pour les résultats provenant du BEEP est évalué à environ un demi-cycle alors que les résultats obtenus à l'aide de SIMUBEEP nous présentent un temps d'amortissement d'environ un cycle. Les résultats présentés nous permettent d'observer un effet de l'enclenchement de la batterie de condensateurs sur le courant de la charge non linéaire. Cet effet est relativement semblable pour les résultats obtenus par simulation et par essai.

Tel que présenté au chapitre 6, l'influence des paramètres parasites influencent grandement la fréquence d'oscillation du phénomène et le temps d'amortissement du phénomène. La puissance des transformateurs définissant l'impédance équivalente de ceux-ci influence, elle aussi, les caractéristiques propres d'un tel phénomène. C'est pourquoi nous pensons qu'une étude approfondie des batteries de condensateurs afin de déterminer les paramètres parasites d'une telle batterie de condensateurs en plus de tests en court-circuit et en circuit ouvert du BEEP permettront de rapprocher les résultats obtenus par le BEEP et la librairie SIMBEEP dans l'étude d'enclenchement d'une batterie triphasée de condensateurs.

9.2.2 Enclenchement d'une charge inductive triphasée

L'enclenchement d'une charge inductive peut survenir à tout moment sur un réseau de distribution électrique. Un moteur, par exemple, est perçu par le réseau comme étant une charge principalement inductive. L'enclenchement d'une telle charge a comme effet de modifier l'allure du courant donc de la tension pour une période de temps finie. Cette période dépend de la valeur de l'impédance de la charge inductive par rapport à l'impédance équivalente du réseau lui fournissant l'énergie.

En comparant les résultats obtenus par essai en utilisant le BEEP et par simulation en utilisant la librairie SIMUBEEP, nous pouvons apporter certaines conclusions sur le

fonctionnement des deux outils d'étude développés et de suggérer certains correctifs ou modifications souhaitables à apporter.

En observant les résultats obtenus par un essai en utilisant le BEEP (figures 4-19 à 4-21), on peut remarquer que l'enclenchement de la charge inductive produit une dissymétrie du courant si on compare les trois phases du système. Ceci est dû à la période de charge de ces inductances. La période pendant laquelle le système est en charge dépend de la constante de temps du système total. On peut remarquer le même type de dissymétrie du courant pour le système simulé (figure 8-10). De plus, le pourcentage d'augmentation de l'amplitude du courant pour la phase ayant la plus grande augmentation en amplitude est similaire. Pour les résultats provenant du BEEP, l'amplitude maximale instantanée passe d'un peu plus de 1 ampère à près de 2 ampères après l'enclenchement. Pour les résultats provenant de SIMUBEEP, l'amplitude maximale instantanée passe d'un peu moins de 150 ampères à près de 300 ampères après l'enclenchement. Donc, pour les deux moyens utilisés, les résultats nous montrent une augmentation de l'amplitude maximale instantanée de près de 100% dû à l'enclenchement de la charge inductive. Que ce soit en utilisant le BEEP ou la librairie SIMUBEEP, on peut remarquer que ce phénomène n'a pratiquement pas d'effet sur la charge non linéaire.

9.3 Chute et hausse de la tension du réseau

La chute et la hausse de la tension du réseau n'a pas pu être observée à l'aide du BEEP. Les équipements nécessaires pour réaliser une chute ou une hausse de la tension du réseau de l'ordre de 30% pour une période de 3 à 5 cycles ne sont pas disponibles. C'est pourquoi l'étude de ces phénomènes ne peut être réalisé que par simulation. Cependant, avec l'achat de deux sources de puissance, la Chaire de recherche industrielle pourra très prochainement effectuer des phénomènes de ce type sur le BEEP.

Les résultats de ces simulations sont présentés aux figures 8-13 à 8-17 pour la chute de la tension du réseau et aux figures 8-19 à 8-23 pour la hausse de la tension du réseau. Pour ces deux simulations, on peut remarquer une dissymétrie des courants de la charge qui s'étend sur une période déterminée par la constante de temps du système total. Pour ces deux simulations, la puissance transmise à la charge non linéaire a été fixée à 80% afin de vérifier l'effet d'un tel type de phénomène sur la charge non linéaire. Cependant, aucun effet particulier ne peut être observé, outre l'augmentation ou la diminution de courant résultant de l'augmentation ou de la diminution de la tension du réseau. Ceci est principalement dû au fait que le système non linéaire est faiblement inductif. Par conséquent, aucune dissymétrie particulière de son courant est observée.

9.4 Conclusion

Quelques résultats obtenus en utilisant le banc d'essai BEEP et la librairie de simulation SIMUBEEP ont été présentés. Les résultats sont qualitativement comparables et correspondent aux phénomènes attendus. Quelques modifications ou améliorations au BEEP et à SIMUBEEP peuvent être réalisées. Ces modifications et améliorations sont présentés dans la conclusion générale de ce document.

Conclusions générales

Il est bon, à cette étape, de rappeler les buts de ce travail de maîtrise qui sont présentés dans le titre du présent document : Étude et simulation des perturbations dans un réseau de distribution électrique; conception d'un banc d'essai et mise au point de deux systèmes d'acquisition.

Le travail réalisé a donc été divisé principalement en trois parties distinctes. La première partie du travail a été consacrée à la modification et à la validation d'un Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations "BEEP". Ce banc d'essai modélise un réseau de distribution 25 kV avec ses transformateurs, lignes de distribution et charges permettant de réaliser différentes études liées aux perturbations d'un réseau de distribution et à la propagation de ces perturbations à travers le réseau modélisé. Cette partie est développée au chapitre 2 de ce document.

La deuxième partie du travail réalisé a été consacrée à la mise au point de systèmes d'acquisition de données afin de quantifier les phénomènes étudiés sur le banc d'essai. Le développement du logiciel nécessaire à la commande d'un de ces appareils de même que les logiciels nécessaires au traitement des données ont été réalisés. Cette partie a été développée au chapitre 3 de ce document.

La troisième partie du travail a été consacrée au développement d'une librairie de simulation appelée SIMUBEEP et développée dans l'environnement SIMULINK/MATLAB modélisant les principaux éléments d'un réseau de distribution et de consommation. SIMUBEEP a été développé dans le but de valider les résultats fournis par le banc d'essai BEEP et dans le but d'étudier différents phénomènes difficiles à recréer en utilisant ce même banc d'essai. Le développement de la librairie de simulation a été présentée au chapitre 6 de ce document. De plus, une méthode itérative de simulation globale a été appliquée afin de tenter de réduire les temps de calcul inhérents à la simulation d'un système à multi-convertisseurs de puissance. Cette méthode fut présentée au chapitre 7 de ce document.

Finalement, à l'aide du banc d'essai BEEP, différents essais ont été effectués et à l'aide de la librairie de simulation SIMUBEEP différentes simulations ont été réalisées dans le but de vérifier la fonctionnalité des outils d'étude. Ces manipulations ont été présentées respectivement aux chapitres 4 et 8 de ce document. Une comparaison des résultats a été présentée au chapitre 9.

Comme nous avons pu le voir dans ce document, une étude basée sur les réseaux de distribution nous a permis de développer un outil de simulation des réseaux de distribution de l'énergie électrique. Cet outil est utilisé dans le but d'étudier les perturbations et leur propagation dans le réseau de distribution. Cette librairie de simulation appuie le développement d'un banc d'essai qui permet d'atteindre les buts concernant l'étude des perturbations sur un réseau de distribution de l'énergie électrique. La comparaison de résultats de perturbations sur le Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("BEEP") et à l'aide de la librairie de SIMULATION du Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations ("SIMUBEEP") nous permet d'affirmer que ces deux outils développés sont fonctionnels et que les résultats provenant de ces outils sont similaires. Afin d'obtenir et d'étudier

les résultats d'essais en utilisant le BEEP, deux systèmes d'acquisition de données ont été mis au point. Le traitement de ces données permet d'obtenir l'information nécessaire à l'évaluation de la qualité de l'énergie électrique afin d'analyser différents phénomènes.

Nous avons développé au cours de ce travail, les outils qui permettent l'étude des perturbations. Cependant, il est encore possible d'améliorer ces outils. Une liste des améliorations à apporter est essentielle dans le but de perfectionner ces outils.

À notre avis, les améliorations suivantes peuvent être apportées aux outils que nous avons mis au point :

1. BEEP

- Estimer avec plus de précision les paramètres de divers éléments du système
- Utiliser une des sources programmables de la Chaire de recherche afin d'évaluer l'effet des hausses et chutes de tensions momentanées du réseau en plus d'autres phénomènes intéressants.
- Un moteur c.a. pourra être ajouter au BEEP comme troisième charge afin d'évaluer l'effet du démarrage d'une telle charge sur le réseau de distribution. Encore là, la puissance de l'entraînement devrait être du même ordre de grandeur que celle de la charge RLC linéaire.
- Évaluer la possibilité de concevoir la ligne de distribution selon le circuit équivalent en π .
- Les transformateurs du BEEP doivent être remplacés par des transformateurs ayant une puissance qui permettra de rencontrer la contrainte de proportionnalité des composants. De plus, la puissance de ces transformateurs devra respecter l'ordre de grandeur de leur charge. Ceci permettant aux perturbations de s'établir selon une fréquence d'oscillation typique et avec un coefficient d'amortissement typique.
- Un moteur c.a. pourra être ajouter au BEEP comme troisième charge afin d'évaluer l'effet du démarrage d'une telle charge sur le réseau de distribution. Encore là, la puissance de l'entraînement devrait être du même ordre de grandeur que celle de la charge RLC linéaire.
- Concevoir un dispositif pour permettre l'application et l'évaluation de la chute ou de la hausse de la tension du réseau.

2. SIMUBEEP

- Concevoir le modèle de la ligne de distribution selon le modèle en π en conservant l'effet de la mutuelle.
- Concevoir un modèle de transformateur en utilisant le circuit équivalent présenté à la figure 1-7 en ajoutant la saturation du transformateur.
- Évaluer différents types de compensateurs statiques de façon à déterminer les valeurs des composants parasites inclus dans le modèle développé ou faire la conception d'un autre modèle de représentation des compensateurs statiques.
- Développer un modèle macroscopique du convertisseur de puissance afin de diminuer le temps de calcul requis pour une simulation.

3. Systèmes d'acquisition

- Développer une technique pour définir de façon flexible les critères de déclenchement afin de ne pas être limité à des dépassement de seuils.

Avec ces modifications en place, le système d'étude des perturbations sur un réseau de distribution électrique sera plus fonctionnel en permettant l'étude de phénomènes variés et en fournissant des résultats plus précis. La poursuite de l'étude des perturbations en utilisant ces outils est souhaitable dans un contexte de recherche de la qualité de l'énergie électrique de distribution.

Bibliographie

- [1-1] "B.41.11, NORMES DE DISTRIBUTION RÉSEAU AÉRIEN", Hydro-Québec, août 1992, pp. 2-2000 page 1, pp.5-2010, pp. 5-3000 pages 1 à 3.
- [1-2] Charles A. Gross, "Power System Analysis", John Wiley & Sons, 1986, Chp. 4.
- [1-3] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Second Edition, John Wiley & Sons, 1991, Chp. 11.
- [1-4] J. Arrillage, D. A. Bradley and P. S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, 1985, Chp. 9.
- [1-5] Richard C. Dorf, "The Electrical Engineering Handbook", CRC Press, 1993, Chp. 58.
- [1-6] G. T. Heydt, "Electric Power Quality", Stars in circle publications, 1991, Chp.4.
- [1-7] M. Bélanger, E. Le Courtois, "Évaluation des caractéristiques de propagation des perturbations sur un réseau de distribution moyenne tension", Rapport de recherche 6F/95, Chaire de recherche industrielle Hydro-Québec-CRSNG sur les Procédés Efficaces Electrothermiques, U.Q.T.R., 20 novembre 1995, pp.11-12.
- [1-8] William D. Stevenson, Jr., "Elements of Power System Analysis", Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 1982, Chp. 3 et 5.
- [1-9] Rakosh Das Begamudre, "Extra High Voltage AC Transmission Engineering", John Wiley & Sons, 1986, Chp. 4.
- [1-10] Westinghouse, "Electrical Transmission and Distribution Handbook", Fourth Edition, 1950, Chp. 5.
- [1-11] "THE IEEE RED BOOK, Recommended Practices for Electric Power Distribution for Industrial Plants", IEEE, 1976, Chp.8.
- [1-12] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Second Edition, John Wiley & Sons, 1991, Chp. 13.
- [1-13] J. Arrillage, D. A. Bradley, P. S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, 1985, Chp. 5.
- [1-14] Richard C. Dorf, "The Electrical Engineering Handbook", CRC Press, 1993, Chp. 1.

- [2-1] Michel Bélanger, et Al. , "A test-bench for investigations on the power quality issues in the utility system", Groupe de recherche en électronique industrielle, CPEE, UQTR, 1994.
- [2-2] W. D. Stevenson,jr., "Elements of Power System Analysis", McGraw Hill, Fourth Edition, 1982, pp.37-65.
- [2-3] "ATP Rule Book", Canadian/American User Group, 1987, pp. 4D-5.
- [2-4] Westinghouse, "Electrical Transmission and Distribution Handbook", Fourth Edition, 1950, Chp. 9.
- [2-5] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.3, August 1991, pp. 975-976.
- [3-1] Michel Bélanger, "VIORNE système d'acquisition numérique, livret d'instructions", SEIDEL inc., février 1995.
- [3-2] Michel Bélanger, Dany Miller, "SORBIER, guide de l'usager", SEIDEL inc, 22 avril 1996.
- [3-3] Eric Le Courtois, "Rapport de recherche 2F/95, Manuel de l'utilisateur du système Banc d'Essai pour l'Étude des Perturbations (BEEP)", CPEE, 13 octobre 1995.
- [3-4] The Math Works Inc, "MATLAB High-Performance Numeric Computation and Visualization Software, User's manual", The Math Works Inc., South Natick, USA, 1992.
- [5-1] Venkatachari Rajagopalan, Pierre Croisetière, Mohamed Tou, "ATOSEC5 SIMULATION SOFTWARE USER MANUAL", Université du Québec à Trois-Rivières, Groupe de Recherche en Électronique Industrielle, march 1994.
- [5-2] Analogy Inc., "Saber® Simulator, Introduction to the Saber Simulator", Analogy Inc., June 1991.
- [5-3] Leuven EMTP Center (LEC), "Alternative Transients Program Rule Book", Leuven EMTP Center (LEC), July 1987.
- [5-4] Manitoba HVDC Research Center, "EMTDC User's Manual", Manitoba HVDC Research Center, 1986.
- [6-1] A. Ba-Razzouk, K. Debebe, A. Pitet, M. Gheorghe, D. O. Neascu, Z. Yao et V. Rajagopalan, "SIMUPELS : SIMULATION of Power Electronic Systems in SIMULINK® Environnement", Chaire de recherche industrielle Hydro-Québec-CRSNG sur les Procédés Efficaces Électrothermiques, 1996.
- [6-2] Manitoba HVDC Research Center, "EMTDC User's Manual", 1986, p.41.

- [6-3] Charles A. Gross, "Power System Analysis", John Wiley & Sons, 1986, pp. Appendix D.
- [6-4] Cyril W. Lander, "Electronique de Puissance", 2e édition, McGraw-Hill, Paris, 1989, Chp.2.
- [6-5] Hansruedi Bühler, "Électronique de réglage et de commande", Traité d'Électricité, Volume XVI, troisième édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1990, pp. 227-232 et 252-273.
- [6-6] Jerry C. Whitaker, "AC Power Systems Handbook", CRC Press, 1991, p.20.
- [7-1] M. Tou, T. Rafesthain, A. Ba-Razzouk, K. Debebe, K. Al-Haddad et V. Rajagopalan, "Nouvelle méthode itérative de simulation globale de systèmes multi-convertisseurs d'électronique de puissance", Can. J. Elect. & Comp. Eng., Vol. 19, No. 2, 1994, pp. 89-96.
- [7-2] Venkatachari Rajagopalan, "Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems", Marcel Dekker Inc., New York, 1987.
- [7-3] The Math Works Inc., "Simulink, Dynamic System Simulation Software, User's Guide", The Math Works Inc., South Natick, USA, June 1993.

ANNEXE A

A. BEEP - Plans et figures

Cette annexe présente d'abord les différents plans et figures liées au "Banc d'essai pour l'Étude des Perturbations" ("BEEP") avec une liste des différents composants utilisés pour l'élaboration de ce montage. Une liste des différentes connexions du BEEP est présentée ensuite.

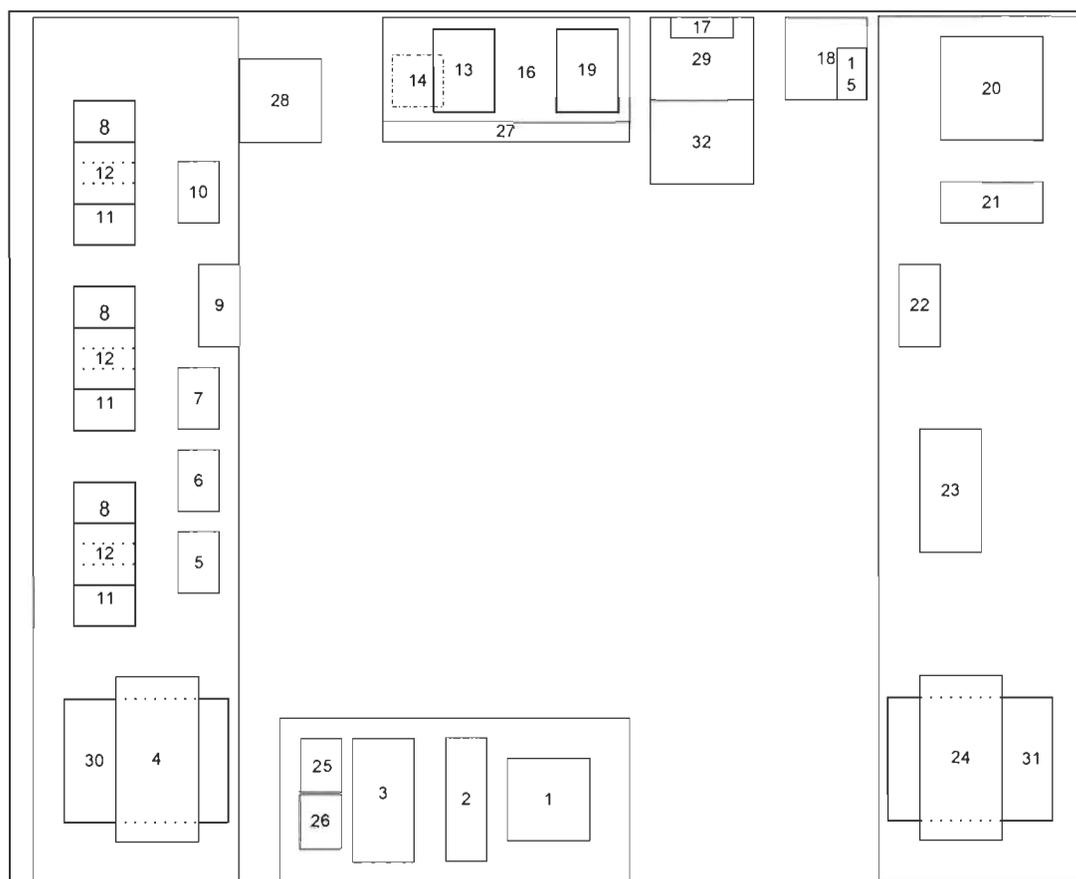


Figure A-1 Schéma du montage BEEP (Vue de haut)

Description des éléments du montage

- 1 Écran du PC
- 2 Ordinateur 486 DX-2 66 MHz 16 Mo RAM
- 3 Appareil d'acquisition numérique (VIORNE)
- 4 Analyseur de puissance PM3000A
- 5 Disjoncteur pour charge condensateurs DJ5
- 6 Disjoncteur pour charge résistance DJ3
- 7 Disjoncteur pour charge inductances DJ4
- 8 Charge linéaire : batterie de condensateurs
- 9 Bornier BT3
- 10 Disjoncteur principal DJ2

- 11 Charge linéaire : batterie d'inductances
- 12 Charge linéaire : batterie de résistances
- 13 Oscilloscope DATA6000
- 14 Moteur asynchrone à rotor bobiné (MOT AC6)
- 15 Amplificateurs pour les sondes de courant
- 16 Source de tension triphasée
- 17 Bornier BT1
- 18 Variac triphasé
- 19 Oscilloscope Philips PM3320A
- 20 Redresseur triphasé
- 21 Charge du redresseur
- 22 Bornier BT2
- 23 Ampèremètre et voltmètre pour la charge du redresseur
- 24 Analyseur de puissance PM3000A
- 25 Bornier BT4
- 26 Bornier BT5
- 27 Inductance de ligne (ligne de distribution)
- 28 Transformateur triphasé XF1
- 29 Transformateur triphasé XF2
- 30 SORBIER #1
- 31 SORBIER #2
- 32 Transformateur triphasé XF4

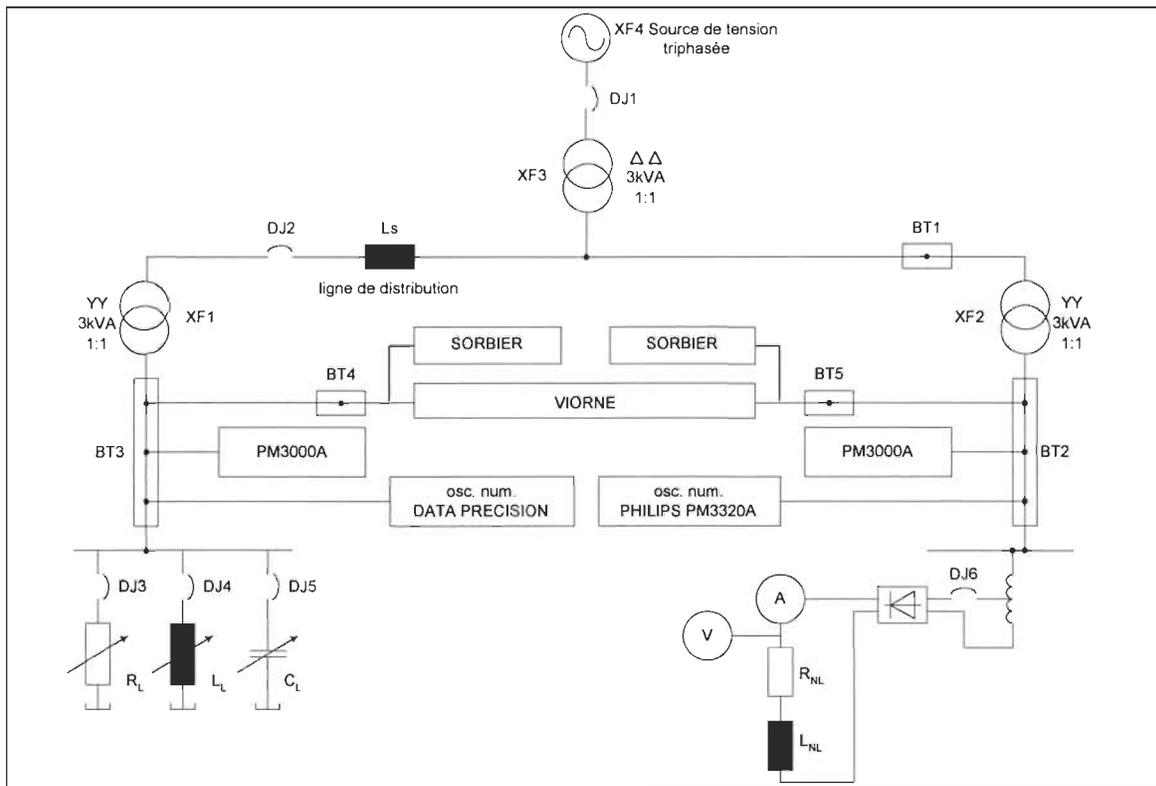


Figure A-2 Banc d'Essai pour l'Étude sur les Perturbations (BEEP) - Schéma unifilaire

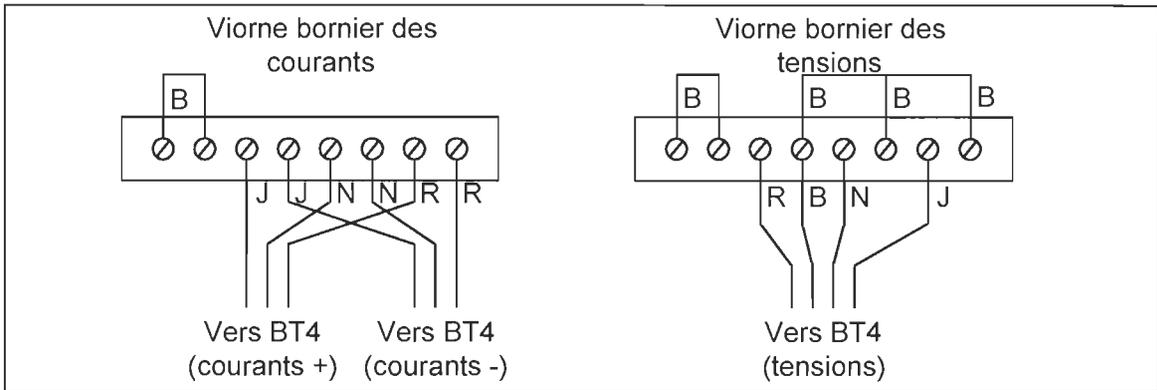


Figure A-3 Schéma de câblage des borniers de tension et courant du VIORNE

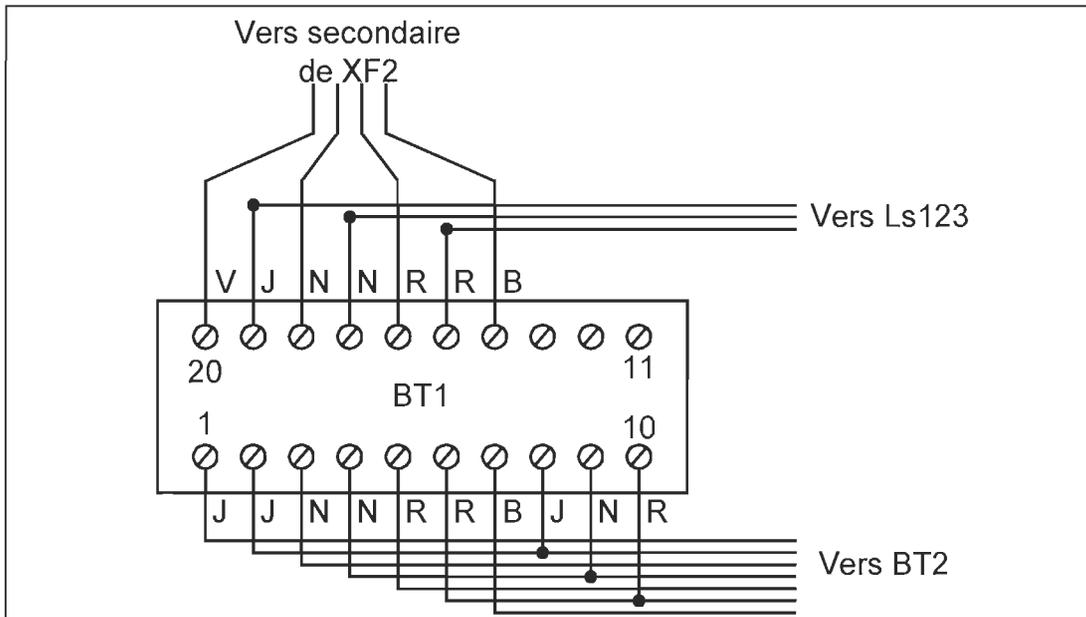


Figure A-4 Schéma de câblage du bornier BT1

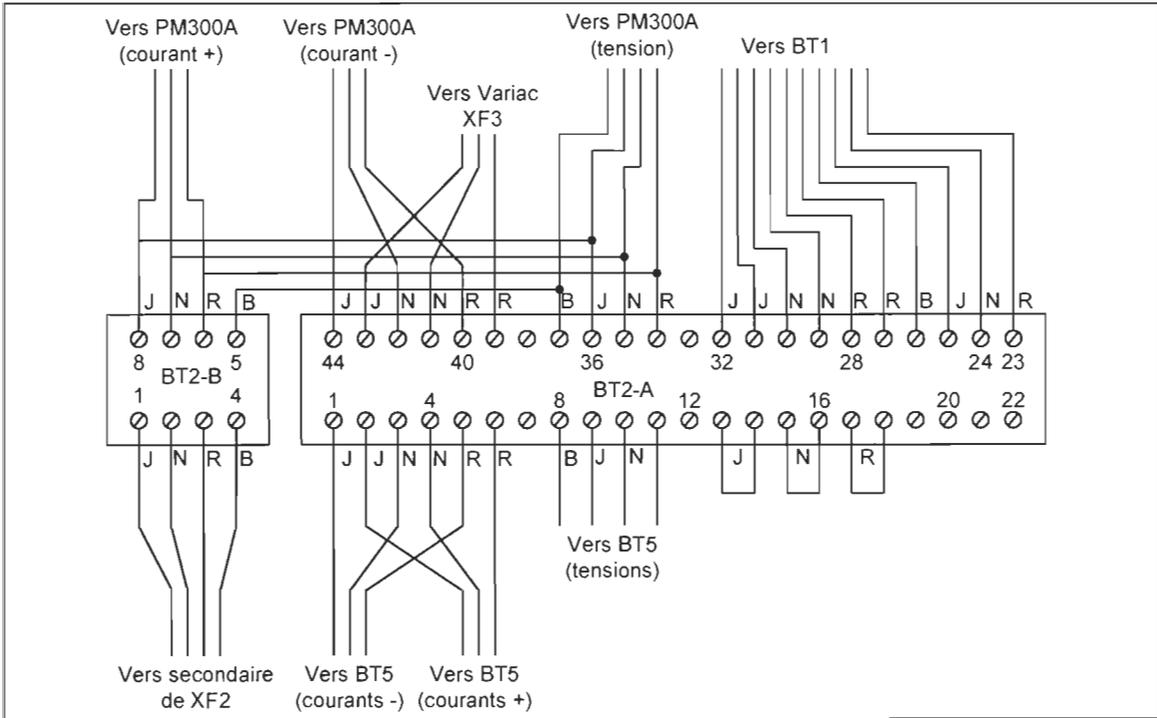


Figure A-5 Schéma de câblage du bornier BT2

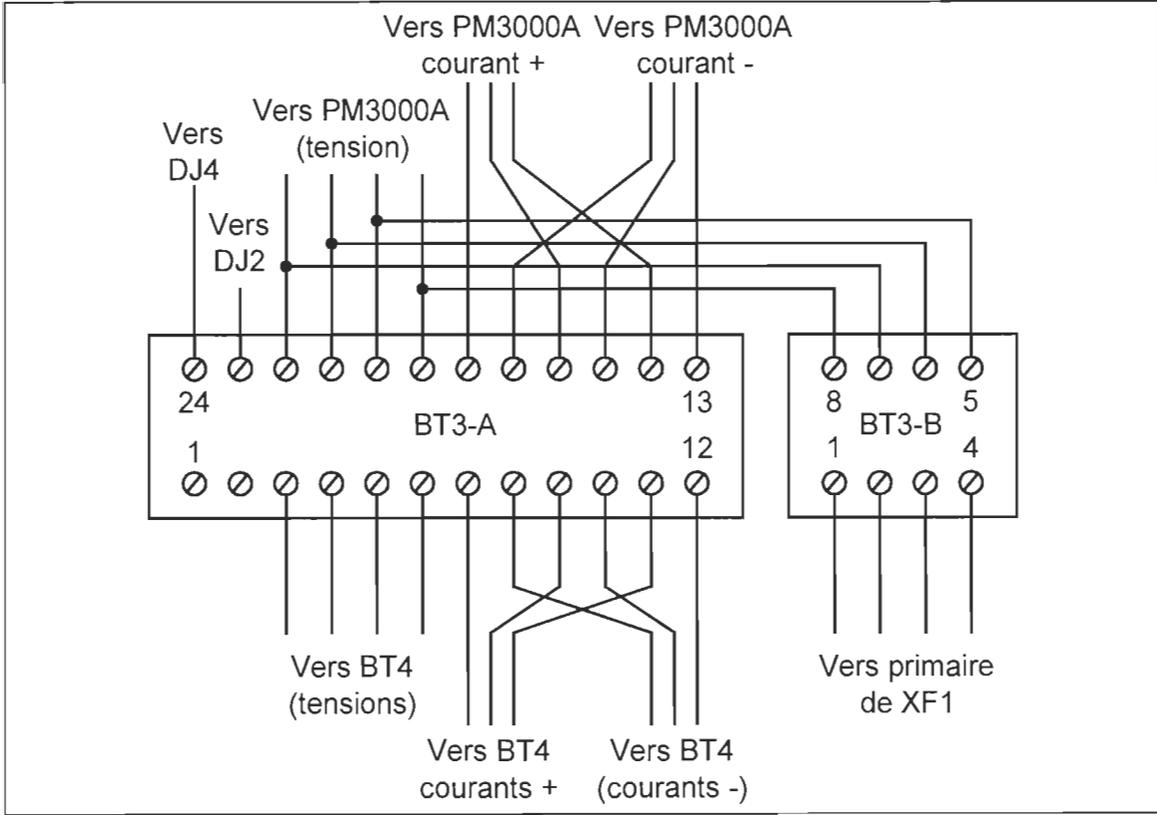


Figure A-6 Schéma de câblage du bornier BT3

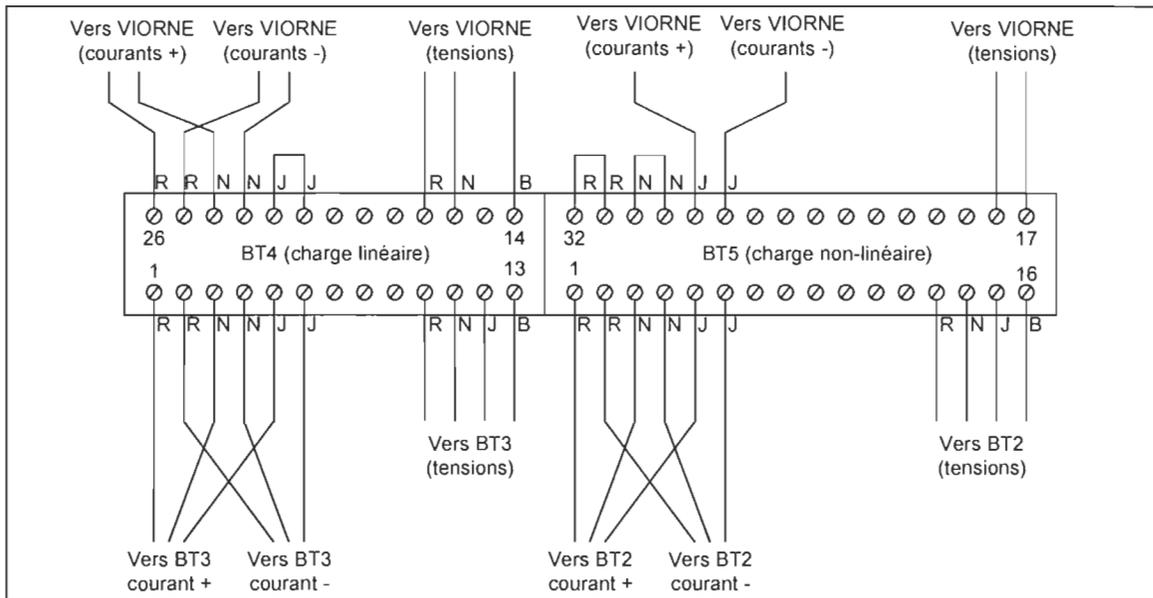


Figure A-7 Schéma de câblage des borniers BT4 et BT5

Tableau A-1 Liste des étiquettes apposées aux différents éléments du banc d'essai BEEP

CODE	BRANCHEMENT 1		CÔTÉ	V / I	BRANCHEMENT 2	
	appareil	#			appareil	#
B1	BT4	80	LIN	Ia+	BT3	A11
B2	BT4	318	LIN	Ia-	BT3	A12
B3	BT4	369	LIN	Ib+	BT3	A9
B4	BT4	326	LIN	Ib-	BT3	A10
B5	BT4	384	LIN	Ic+	BT3	A7
B6	BT4	73	LIN	Ic-	BT3	A8
B7	BT4	28	LIN	Va	BT3	A5
B8	BT4	362	LIN	Vb	BT3	A4
C1	BT4	321	LIN	Vc	BT3	A3
C2	BT4	347	LIN	Vn	BT3	A6
C3	BT5	395	NLIN	Ia+	BT2	A6
C4	BT5	390	NLIN	Ia-	BT2	A5
C5	BT5	130	NLIN	Ib+	BT2	A4
C6	BT5	70	NLIN	Ib-	BT2	A3
C7	BT5	53	NLIN	Ic+	BT2	A2
C8	BT5	4	NLIN	Ic-	BT2	A1
D1	BT5	375	NLIN	Va	BT2	A11
D2	BT5	14	NLIN	Vb	BT2	A10
D3	BT5	341	NLIN	Vc	BT2	A9
D4	BT5	102	NLIN	Vn	BT2	A8
D5	PM3000A	Ich1-H	LIN	Ia+	BT3	B5
D6	PM3000A	Ich1-L	LIN	Ia-	BT3	B13

CODE	BRANCHEMENT 1		CÔTÉ	V / I	BRANCHEMENT 2	
	appareil	#			appareil	#
D7	PM3000A	Ich2-H	LIN	Ib+	BT3	B6
D8	PM3000A	Ich2-L	LIN	Ib-	BT3	B15
E1	PM3000A	Ich3-H	LIN	Ic+	BT3	B7
E2	PM3000A	Ich3-L	LIN	Ic-	BT3	A17
E3	PM3000A	Vch1-H	LIN	Va	BT3	A20
E4	PM3000A	Vch2-H	LIN	Vb	BT3	A21
E5	PM3000A	Vch3-H	LIN	Vc	BT3	A22
E6	PM3000A	Vch 1;2;3-L	LIN	Vn	BT3	A19
E7	PM3000A	Ich1-H	NLIN	Ia+	BT2	A40
E8	PM3000A	Ich1-L	NLIN	Ia-	BT2	B6
F1	PM3000A	Ich2-H	NLIN	Ib+	BT2	A42
F2	PM3000A	Ich2-L	NLIN	Ib-	BT2	B7
F3	PM3000A	Ich3-H	NLIN	Ic+	BT2	A44
F4	PM3000A	Ich3-L	NLIN	Ic-	BT2	B8
F5	PM3000A	Vch1-H	NLIN	Va	BT2	A34
F6	PM3000A	Vch2-H	NLIN	Vb	BT2	A35
F7	PM3000A	Vch3-H	NLIN	Vc	BT2	A36
F8	PM3000A	Vch 1;2;3-L	NLIN	Vn	BT2	A37
G1	BT2	A23	NLIN	Va	BT1	A10
G2	BT2	A24	NLIN	Vb	BT1	A9
G3	BT2	A25	NLIN	Vc	BT1	A8
G4	BT2	A26	NLIN	Vn	BT1	A7
G5	BT2	A27	NLIN	Ia	BT1	A6
G6	BT2	A28	NLIN	Ia	BT1	A5
G7	BT2	A29	NLIN	Ib	BT1	A4
G8	BT2	A30	NLIN	Ib	BT1	A3
H1	BT2	A31	NLIN	Ic	BT1	A2
H2	BT2	A32	NLIN	Ic	BT1	A1
H3	BT2	A34	NLIN	Va	BT2 (pont)	B6
H4	BT2	A35	NLIN	Vb	BT2 (pont)	B7
H5	BT2	A36	NLIN	Vc	BT2 (pont)	B8
H6	BT2	A37	NLIN	Vn	BT2 (pont)	B5
H7	BT2	B4	NLIN	Vn	XF2	primaire
H8	BT2	B3	NLIN	Va	XF2	en Y avec

CODE	BRANCHEMENT 1		CÔTÉ	V / I	BRANCHEMENT 2	
	appareil	#			appareil	#
I1	BT2	B2	NLIN	Vb	XF2	neutre
I2	BT2	B1	NLIN	Vc	XF2	connecté
I3	BT1	A6	NLIN		BT1 (pont)	A10
I4	BT1	A4	NLIN		BT1 (pont)	A9
I5	BT1	A2	NLIN		BT1 (pont)	A8
I6	BT1	A15	NLIN		XF2	secondaire
I7	BT1	A17	NLIN		XF2	en Y sans
I8	BT1	A19	NLIN		XF2	N connecté
BB1	BT1	A16	NLIN	Va	Ls1	
BB2	BT1	A18	NLIN	Vb	Ls2	
BB3	BT1	A20	NLIN	Vc	Ls3	
BB4	BT1	A14	NLIN	Vn	neutre source	
BB5	Variac	Haut 4	NLIN		BT2	A39
BB6	Variac	Haut 2	NLIN		redresseur	B
BB7	Variac	Haut 3	NLIN		redresseur	A
BB8	Variac	Bas 4	NLIN		BT2	A43
CC1	Variac	Bas 3	NLIN		redresseur	C
CC2	Variac	Bas 2	NLIN		BT2	A41
CC3	BT3	A24	LIN		DJ2	TB
CC4	BT3	A23	LIN		DJ2	TF
CC5	BT3	B5	LIN	Va	BT3 (pont)	A20
CC6	BT3	B6	LIN	Vb	BT3 (pont)	A21
CC7	BT3	B7	LIN	Vc	BT3 (pont)	A22
CC8	BT3	B8	LIN	Vn	BT3 (pont)	A19
DD1	BT3	B4	LIN	Va	XF1	A5
DD2	BT3	B3	LIN	Vb	XF1	B5
DD3	BT3	B2	LIN	Vc	XF1	C5
DD4	BT3	B1	LIN	Vn	XF1	A6-B6-C6
DD5	DJ4	B3	LIN	Va	L3	
DD6	DJ4	B2	LIN	Vb	L2	
DD7	DJ4	B1	LIN	Vc	L1	
DD8	DJ4	TB	LIN	Vn	BT3	A24
EE1	DJ2	B3	LIN	Va	XF1	A2
EE2	DJ2	B2	LIN	Vb	XF1	B2
EE3	DJ2	B1	LIN	Vc	XF1	C2
EE4	neutre HH4		LIN	Vn	XF1	A1-B1-C1
EE5	DJ2	F1	LIN		BT3	A14
EE6	DJ2	F2	LIN		BT3	A16

CODE	BRANCHEMENT 1		CÔTÉ	V / I	BRANCHEMENT 2	
	appareil	#			appareil	#
EE7	DJ2	F3	LIN		BT3	A18
EE8	DJ2	TF	LIN		BT3	A23
FF1	DJ4	F1	LIN		DJ3	F1
FF2	DJ4	F2	LIN		DJ3	F2
FF3	DJ4	F3	LIN		DJ3	F3
FF4	DJ4	TF	LIN		DJ3	TF
FF5	DJ3	F1	LIN		DJ5	F1
FF6	DJ3	F2	LIN		DJ5	F2
FF7	DJ3	F3	LIN		DJ5	F3
FF8	DJ3	TF	LIN		DJ5	TF
GG1	DJ5	B3	LIN		C7	
GG2	DJ5	B2	LIN		C8	
GG3	DJ5	B1	LIN		C9	
GG4	DJ5	TB	LIN		DJ4	TB
GG5	DJ3	B3	LIN		R1	
GG6	DJ3	B2	LIN		R2	
GG7	DJ3	B1	LIN		R3	
GG8	DJ3	TB	LIN		DJ4	TB
HH1	DJ2	F1	LIN		A. source	rouge d.
HH2	DJ2	F2	LIN		A. source	noir d.
HH3	DJ2	F3	LIN		A. source	bleu d.
HH4	EE4		LIN		neutre source	
HH5	A. source	rouge g.	LIN		STA-01-EP	variac (lin)
HH6	A. source	noir g.	LIN		STA-01-EP	fils internes
HH7	A. source	bleu g.	LIN		STA-01-EP	déjà branchés
HH8	STA-01-EP	L1	LIN		Moteur	1
HB1	STA-01-EP	L2	LIN		Moteur	2
HB2	STA-01-EP	L3	LIN		Moteur	3
HB4	STA-01-EP	A	LIN		Moteur	4
HB5	STA-01-EP	B	LIN		Moteur	5
HB6	STA-01-EP	C	LIN		Moteur	6
HC1	STA-01-EP	A	LIN		Ls1	
HC2	STA-01-EP	B	LIN		Ls2	
HC3	STA-01-EP	C	LIN		Ls3	
II1	Lnl	1	NLIN		A. 2	noir
II2	Lnl	2	NLIN		Red. Sortie	noir

CODE	BRANCHEMENT 1		CÔTÉ	V / I	BRANCHEMENT 2	
	appareil	#			appareil	#
II3	Lnl	2	NLIN		Volt	noir
II4	Volt.	rouge	NLIN		Rnl	1
II5	A. 2	rouge	NLIN		Rnl	2
II6	Rnl	1	NLIN		Red. sortie	rouge

ANNEXE B

B. Logiciel du système VIORNE, codes de programmation

Cette annexe présente les différentes sections composant le logiciel d'acquisition et de traitement des données pour le système utilisant l'appareil d'acquisition des données appelé VIORNE. Ce logiciel a été développé sur la plate-forme "MICROSOFT EXCEL" et se nomme DATA6. Un seul fichier est requis pour l'utilisation de ce programme. Il s'agit d'un fichier qui se nomme data6.xlt. Ce fichier est composé de plusieurs pages EXCEL, chacune ayant son rôle propre.

Cette annexe présente d'abord l'interface graphique de commande, puis l'interface utilisée pour la présentation des résultats, le code de programmation EXCEL, les "macros" utilisant le code de programmation "VISUAL BASIC" et enfin, les équations utilisées pour le calcul des différents résultats. Pour plus d'informations, lire la référence [3-3].

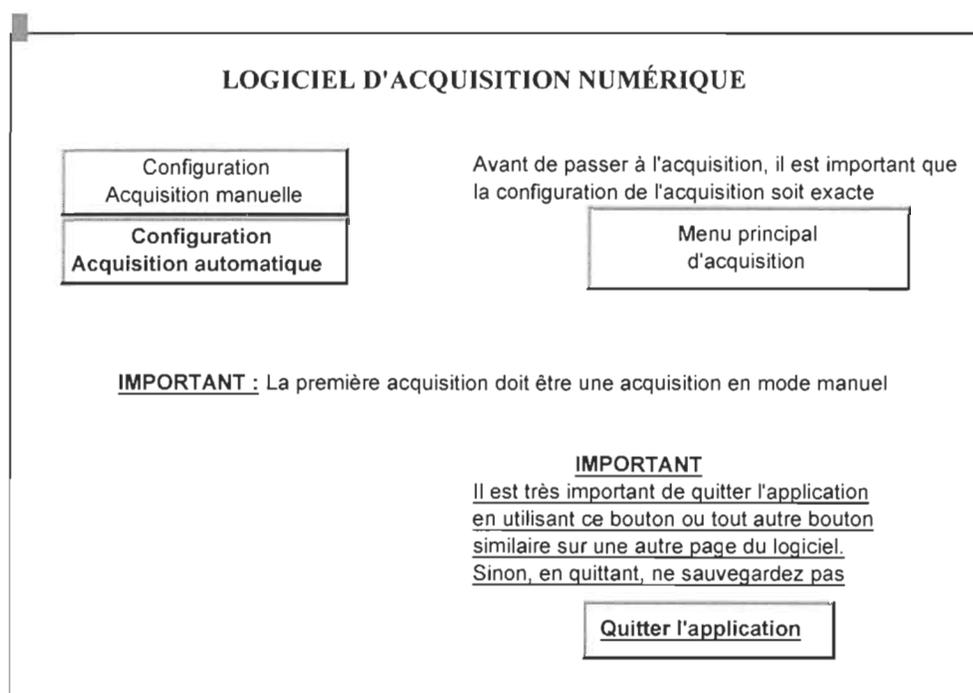


Figure B-1 Menu principal, Feuille "Depart"

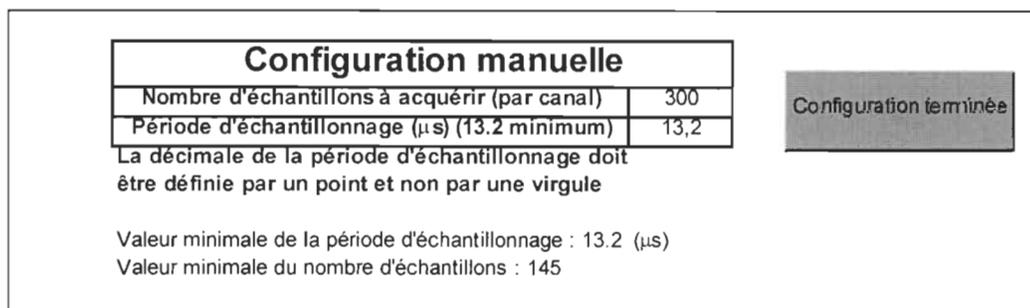


Figure B-2 Page de configuration du mode d'acquisition manuel, Feuille "Conf.Man."

Configuration automatique	
Nombre d'échantillons avant déclenchement	100
Nombre d'échantillons après déclenchement	200
Canal de surveillance (1-6)	1
Seuil de déclenchement (S) (voir table de conversion)	562
Période d'échantillonnage (μ s) (13,2 minimum)	13.2

La décimale de la période d'échantillonnage doit être définie par un point et non par une virgule

Calcul du seuil de déclenchement
 Pour le type de canal défini (courant ou tension), entrez la valeur réelle de déclenchement voulue dans la case appropriée. Pressez "ENTER".
 La valeur correspondante en valeur S sera affichée dans la case inférieure.

	Volts efficaces	Volts crête	Ampères efficaces	Ampères crête
Valeur réelle	1,000	1,000	1,000	1,000
Correspondance en S	82	59	1873	1325

Configuration terminée

Figure B-3 Page de configuration du mode d'acquisition automatique, Feuille "Conf.Auto."

Acq. mode manuel	Acq. mode surveillance	Charger les données
Mode d'acquisition sélectionné : Mode manuel		Données transférées

Note:
 La première acquisition doit être une acquisition en mode manuel afin de configurer la carte d'acquisition

Visualisation des résultats graphiques

Visualisation des résultats calculés

Transfert des données sur fichier (format Matlab)

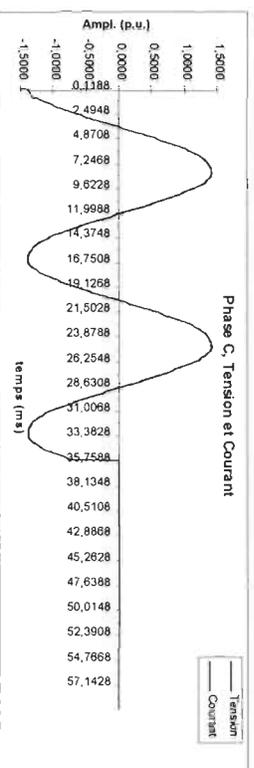
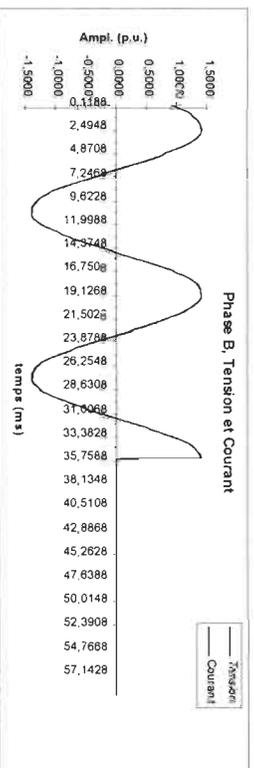
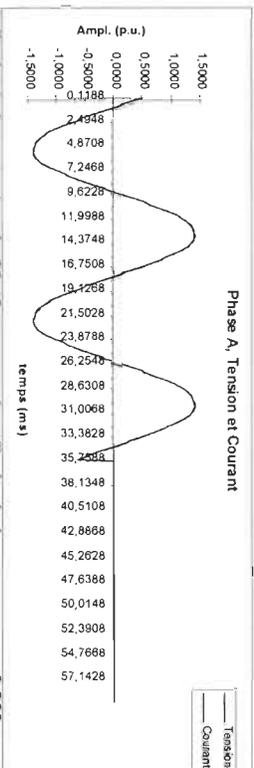


Matlab

Retour au menu de départ

Quitter l'application

Figure B-4 Page du menu principal d'acquisition, Feuille "tdata6.xls"



Retour
au
menu
d'acquisition

Figure B-5 Affichage des résultats graphiques, Feuille "tdata6.xls"

phase	A (N)	B (N)	C (N)	Unités
S total	17,8972	18,1966	17,0276	VA
P fond	17,8918	18,1893	17,0225	Watt
Q fond	0,2053	0,2541	0,1888	VAR
D	0,3908	0,4471	0,3719	
ϕ fond	0,66	0,80	0,64	degrés
THD (V)	1,20	1,47	1,13	%
THD (I)	1,82	1,97	1,87	%
FP	1,000	1,000	1,000	
Veff fond	29,395	29,617	28,729	Veff
Ieff fond	0,6087	0,6142	0,5926	Aeff
Veff	29,397	29,620	28,731	Veff
Ieff	0,6088	0,6143	0,5927	Aeff
Vcm	11,1558	17,5845	-28,4906	Veff
Vsm	-27,1957	23,8319	3,6942	Veff
Icm	0,2375	0,3577	-0,5884	Aeff
ism	-0,5605	0,4993	0,0697	Aeff
ϕ V	2,7523	0,6357	-1,4419	Rad
ϕ I	2,7408	0,6217	-1,4529	Rad

N
140
0,2918

Retour au
menu d'acquisition

Figure B-6 Affichage des résultats calculés, Feuille "tdata6.xls"

B100:B239 C100:C239 D100:D239 E100:E239 F100:F239 G100:G239					
Tension et Courant efficace (Bases)					
Va1	Ia1	Vb1	Ib1	Vc2	Ic2
29,3970	0,6088	29,6204	0,6143	28,7309	0,5927

Matrice de calibration					
58,7700	1352,8	58,7800	1458,0	59,2300	1324,5
B239	C239	D239	E239	F239	G239
B240	C240	D240	E240	F240	G240

Figure B-7 Valeurs de base en tension et en courant et matrice de calibration, Feuille "tdata6.xls"

Les tableaux B-1, B-2 et B-3 montrent la matrice des données et résultats qui permet de transformer les données brutes provenant de l'acquisition en données réelles avec unités. Seulement les dix premiers nombres sont présentés et la matrice est présentée divisée en 3 sections afin de montrer toutes les colonnes. Les tableaux B-4, B-5 et B-6 montrent cette même matrice en présentant les équations nécessaires au calcul des nombres.

Tableau B-1 Première partie de la matrice de calcul - Données brutes
Feuille "tdata6.xls", Cellules A98-G110

temps (ms)	Canaux					
	0	4	1	5	2	6
	Données bruts					
0,1188	816	416	1552	800	-2384	-1088
0,2376	720	368	1648	848	-2368	-1088
0,3564	624	304	1744	896	-2336	-1072
0,4752	512	256	1840	928	-2320	-1072
0,5940	400	208	1904	976	-2288	-1056
0,7128	288	160	1984	1008	-2240	-1024
0,8316	176	112	2048	1056	-2208	-1008
0,9504	80	64	2096	1088	-2160	-992
1,0692	-32	16	2160	1104	-2096	-960
1,1880	-128	-48	2208	1136	-2032	-944

Tableau B-2 Deuxième partie de la matrice de calcul - Données calibrées
Feuille "tdata6.xls", Cellules H98-M110

Va	la	Vb	lb	Vc	lc
Valeurs calibrées (en p.u.)					
0,4728	0,5056	0,8937	0,8954	-1,4108	-1,3956
0,4172	0,4473	0,9489	0,9491	-1,4014	-1,3956
0,3615	0,3695	1,0042	1,0029	-1,3824	-1,3751
0,2966	0,3112	1,0595	1,0387	-1,3730	-1,3751
0,2318	0,2528	1,0963	1,0924	-1,3540	-1,3546
0,1669	0,1945	1,1424	1,1282	-1,3256	-1,3135
0,1020	0,1361	1,1793	1,1819	-1,3067	-1,2930
0,0464	0,0778	1,2069	1,2178	-1,2783	-1,2725
-0,0185	0,0194	1,2438	1,2357	-1,2404	-1,2314
-0,0742	-0,0583	1,2714	1,2715	-1,2025	-1,2109

Tableau B-3 Troisième partie de la matrice de calcul - Valeurs instantanées et calcul du temps
Feuille "tdata6.xls", Cellules N98-U110

Va	la	Vb	lb	Vc	lc	temps
Valeurs instantanées						(ms)
13,8846	0,3075	26,4035	0,5487	-40,2499	-0,8214	0,1188
12,2511	0,2720	28,0367	0,5816	-39,9797	-0,8214	0,2376
10,6177	0,2247	29,6700	0,6145	-39,4395	-0,8094	0,3564
8,7119	0,1892	31,3032	0,6365	-39,1693	-0,8094	0,4752
6,8062	0,1538	32,3920	0,6694	-38,6291	-0,7973	0,5940
4,9005	0,1183	33,7530	0,6914	-37,8187	-0,7731	0,7128
2,9947	0,0828	34,8418	0,7243	-37,2784	-0,7610	0,8316
1,3612	0,0473	35,6584	0,7462	-36,4680	-0,7490	0,9504
-0,5445	0,0118	36,7472	0,7572	-35,3875	-0,7248	1,0692
-2,1780	-0,0355	37,5638	0,7791	-34,3069	-0,7127	1,1880

Tableau B-4 Première partie de la matrice de calcul - Formules - Données brutes
Feuille "tdata6.xls", Cellules A98-G110

temps	Canaux					
(ms)	0	4	1	5	2	6
=Time*9/1000*\$U\$101:\$U\$700	816	416	1552	800	-2384	-1088
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	720	368	1648	848	-2368	-1088
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	624	304	1744	896	-2336	-1072
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	512	256	1840	928	-2320	-1072
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	400	208	1904	976	-2288	-1056
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	288	160	1984	1008	-2240	-1024
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	176	112	2048	1056	-2208	-1008
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	80	64	2096	1088	-2160	-992
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	-32	16	2160	1104	-2096	-960
=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	-128	-48	2208	1136	-2032	-944

Tableau B-5a Deuxième partie de la matrice de calcul - Formules - Données calibrées
Feuille "tdata6.xls", Cellules H98-J110

Va	Ia	Vb
		Valeurs calibrées (en p.u.)
=B101:\$B600/(\$B\$91*B94)	=C101:\$C600/(\$C\$91*\$C\$94)	=D101:\$D600/(\$D\$91*\$D\$94)

Tableau B-5b Deuxième partie de la matrice de calcul - Formules - Données calibrées
Feuille "tdata6.xls", Cellules K98-M110

Ib	Vc	Ic
=E101:\$E600/(\$E\$91*\$E\$94)	=F101:\$F600/(\$F\$91*\$F\$94)	=G101:\$G600/(\$G\$91*\$G\$94)

Tableau B-6a Troisième partie de la matrice de calcul - Formules - Valeurs instantanées et calcul du temps
Feuille "tdata6.xls", Cellules N98-P110

Va	Ia	Vb
		Valeurs instantanées
=chan0/Calib_tension_0	=chan4/Calib_courant_4	=chan1/Calib_tension_1

Tableau B-6b Troisième partie de la matrice de calcul - Formules - Valeurs instantanées et calcul du temps
Feuille "tdata6.xls", Cellules Q98-U110

lb	Vc	lc	temps	
			(ms)	
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$101:\$U\$700	1
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	2
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	3
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	4
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	5
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	6
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	7
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	8
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	9
=chan5/Calib_courant_5	=chan2/Calib_tension_2	=chan6/Calib_courant_6	=Time*9/1000*\$U\$102:\$U\$701	10

Tableau B-7 Programme principal du logiciel d'acquisition des données, Feuille TDATA6.XLM, Cellules A1-B167

Macro Sheet:	TDATA6.XLM
Used with Worksheet:	TDATA6.XLS
Name	Formula
CollectingData:	FAUX
ConfigData:	FAUX
ChargerData:	FAUX
ConfigDap:	VRAI
	EstablishDapCommunication
EstablishDapCommunication	=SI(ConfigData = FAUX())
	= LancerWinWedge()
	= POSER.VALEUR(ConfigData;VRAI())
	= APP.ACTIVER()
	= EXEC(canal;"{config(c:\windows\winwedge\TEMP.cfg}")
canal:	= ACCEDER("winwedge","com2")
	= SELECTION.ATTEINDRE([data6.xlt]TDATA6.XLS!data1)
	= FORMULE("=WinWedge com1!Field(1)")
	= SELECTION.ATTEINDRE(tdata6.xls!\$A\$3)
	= EXEC(canal;"{sendout(13,13,13,'reset',13,13,10)}")
	= POUR.CELLULE("CellActive";init;VRAI)
	= POSER.NOM("mot";CellActive)
	= EXEC(canal;"{send("&mot&}")
	= EXEC(canal;"{sendcode(13)}")
	= SUIVANT()

	= EXEC(canal;"{Beep}")
	= Configuration_Dap()
	=FIN.SI()
	=GetDapData()
	=RETOUR()
	GetDapData
GetDapdata	=SI(CollectingData=FAUX())
	= POSER.VALEUR(CollectingData;FAUX())
	= APP.ACTIVER("Software Wedge")
	= SI(ConfigDap = VRAI; EXEC(canal;"{sendout('stop', 13, 10,'start a,b', 13, 10)}");)
	= SI(ConfigDap = FAUX; ATTENDRE(MAINTENANT()+ "00:00:01");)
	= SI(ConfigDap = FAUX; EXEC(canal;"{sendout('stop', 13, 10)}");)
	= SI(ConfigDap = FAUX; Configuration_Dap();)
	= POSER.VALEUR(ChargerData;VRAI())
	= FORMULE("Données prêtes à transférer";!Donnees)
	=FIN.SI()
	=RETOUR()
PlaceData	PlaceData
	=SI(ChargerData=VRAI())
	= POSER.VALEUR(ChargerData;FAUX())
	= EXEC(canal;"{sendout('stop', 13, 10)}")
	=
	OUVRIR.TEXTE("C:\DONNEE\EXCEL\WINWEDGE.LOG";2;1;1;1;FAUX;VRAI;FAUX;VRAI;FAUX;FAUX;;{1.1;2.1;3.1;4.1;5.1;6.1;7.1})
	= SELECTION.ATTEINDRE("R1C2:R500C7")
	= COPIER()
	= SELECTION.ATTEINDRE(DATA6.XLT!DataStart1)
	= COLLAGE.SPECIAL(3;1;FAUX;FAUX)
	= SEND.KEYS("{ECHAPPEMENT}";TRUE)
	= SELECTION.ATTEINDRE(tdata6.xls!\$A\$3)
	= ACTIVER("Winwedge.log")
	= SELECTIONNER("R1C1")
	= EFFACER(3)
	= FERMER(FAUX)
	= FICHER.SUPPRIMER("c:\DONNEE\EXCEL\WINWEDGE.LOG")
	= FORMULE("Données transférées";!Donnees)
	= CALCULER.MAINTENANT()
	=FIN.SI()
	=RETOUR()
	TerminateDapCommunication
	=SI(CollectingData = FAUX())
	= POSER.VALEUR(ConfigData;FAUX())
	= EXEC(canal;"{sendout('stop', 13, 10)}")

	= TERMINER(canal)
	=FIN.SI()
	=RETOUR()
	Lancer Software Wedge
LancerWinWedge	=ERREUR(VRAI;WinWedgeEnMarche)
	= APP.ACTIVER("Software Wedge")
	=ERREUR(VRAI)
	=ATTEINDRE(Fin)
WinWedgeEnMarche	=LANCER("c:\windows\winwedge\winwedge.exe c:\windows\winwedge\TEMP.cfg";1)
	=ERREUR(VRAI)
Fin	=RETOUR()
	ErreurCommunication
	= EXEC(canal;"{sendout('hello',13,10)}")
	=MESSAGE(VRAI;"verification de la communication")
	=ATTENDRE(MAINTENANT()+"00:00:02")
	=MESSAGE(FAUX)
	=SI([data6.xls]TDATA6.XLS!data1=0;RETOUR();)
	=BIP()
	=ALERTE("Attention, le systeme d'acquisition ne fonctionne pas normalement. Effectuer une remise a zero du systeme";3)
	=ARRETER()
	=RETOUR()
	Acquisition en manuel
	=SELECTION.ATTEINDRE("Time_man")
	=COPIER()
	=SEL.CLASSEUR("tdata6.xls";"tdata6.xls")
	=SELECTIONNER("R95C19")
	=COLLAGE.SPECIAL(3;1;FAUX;FAUX)
	=SELECTIONNER("R1C6")
	=POSER.VALEUR(ConfigDap,VRAI())
	=Configuration_Dap()
	=RETOUR()
	Acquisition par surveillance
	=SELECTION.ATTEINDRE("Time_auto")
	=COPIER()
	=SEL.CLASSEUR("tdata6.xls";"tdata6.xls")
	=SELECTIONNER("R95C19")
	=COLLAGE.SPECIAL(3;1;FAUX;FAUX)
	=SELECTIONNER("R1C6")

	=POSER.VALEUR(ConfigDap;FAUX())
	=Configuration_Dap()
	=RETOUR()
	Configuration de Dap
	= SI(ConfigDap=VRAI();;ATTEINDRE(Decl))
	= POUR.CELLULE("CellActive";FichierDapl1;VRAI)
	= POSER.NOM("mot";CellActive)
	= EXEC(canal;"{send("&mot&")}")
	= EXEC(canal;"{sendcode(13)}")
	= SUIVANT()
	= FORMULE("Mode manuel";Cont_Decl)
	=RETOUR()
	= POUR.CELLULE("CellActive";FichierDapl2;VRAI)
	= POSER.NOM("mot";CellActive)
	= EXEC(canal;"{send("&mot&")}")
	= EXEC(canal;"{sendcode(13)}")
	= SUIVANT()
	= FORMULE("Mode surveillance";Cont_Decl)
	= POSER.VALEUR(ChargerData;VRAI())
	= FORMULE("Donnees prêtes à transférer";!Donnees)
	= APP.ACTIVER("Software Wedge")
	=RETOUR()
	Sauvegarde des donnees bruts
	=ACTIVER.SUIV("data6.xlt")
	=SELECTION.ATTEINDRE("Mat6x500")
	=COPIER()
	=LANCER("notepad.exe";1)
	=TOUCHES("edit";VRAI)
	=TOUCHES("paste";VRAI)
	=LANCER("calc.exe";1)
	=TOUCHES("10*30";VRAI)
	=TOUCHES("paste";VRAI)

Tableau B-8 Programme principal du logiciel d'acquisition des données, Feuille TDATA6.XLM, Cellules C1-D133

Comments	Configuration

	Initialisation de DAP
Flag indicating data collection on or off	
Vrai: carte configurée	
Vrai: données transférées	
Vrai ; en manuel	
	options prompt=off
Start collection only if not already collecting	options sysinecho=off
Si la fonction suivante est en erreur, exec. LancerWinwedge	options terminal=on
Turn on the collecting data flag	options overflowq=off
Active EXCEL	options underflowq=off
Configurer le gestionnaire de port série	options errorq=off
Amorcer un lien DDE avec WinWedge	
Sélectionner la cellule active	
Créé un lien entre cellule et champs 1 de WinWedge	
Établir communication avec DAP et faire un RESET	
commence une boucle d'initialisation(ignorer les cellules vides)	
assigner à mot le contenu du pointeur CellActive	
Envoyer, à Dap, le contenu de "mot"	Fin initialisation
Envoyer, à DAP, un retour de chariot	
	Dapl, fichier de commande
Signaler la communication	debut
	; Ficher CUR.DAP
Fin si de la macro	; Configuration d'acquisition en mode manuel
Acquerir les données	RESET
retour de la macro	PIPES P0, P1, P2, P3, P4, P5
	;TRIGGER T, T1 6
	IDEFINE A 9
	SET IPIPE0 S0
	SET IPIPE1 S4
	SET IPIPE2 S1
	SET IPIPE3 S5
Lancer la procedure A et B	SET IPIPE4 S2
	SET IPIPE5 S6
	Time 13.2
	Count 2700
	END
	PDEFINE B
	;LIMIT (IP1, outside, -1000,1000,T,outside,-1000,1000)
	; MINTIME (T, 100000, T1)
	;WAIT(IP1, T1, 10, 490, P1)
	;WAIT(IP0, T1, 10, 490, P0)
	;WAIT(IP2, T1, 10, 490, P2)
	;WAIT(IP3, T1, 10, 490, P3)
Début de la routine insérer les données dans les collones	;WAIT(IP4, T1, 10, 490, P4)
	;WAIT(IP5, T1, 10, 490, P5)

Limit (IP1,inside,-30000,-562,T,inside,-30000,30000)	;LIMIT (IP1, outside, -1000,1000,T,outside,-1000,1000)
MINTIME (T, 100000, T1)	; MINTIME (T, 100000, T1)
WAIT(IP0, T1, 100, 200, P0)	;WAIT(IP1, T1, 10, 490, P1)
WAIT(IP1, T1, 100, 200, P1)	;WAIT(IP0, T1, 10, 490, P0)
WAIT(IP2, T1, 100, 200, P2)	;WAIT(IP2, T1, 10, 490, P2)
WAIT(IP3, T1, 100, 200, P3)	;WAIT(IP3, T1, 10, 490, P3)
WAIT(IP4, T1, 100, 200, P4)	;WAIT(IP4, T1, 10, 490, P4)
WAIT(IP5, T1, 100, 200, P5)	;WAIT(IP5, T1, 10, 490, P5)
; FFT(5,7,0,IP0,P1)	; FFT(5,7,0,IP0,P1)
; FFT(5,7,0,IP3,P2)	; FFT(5,7,0,IP3,P2)
; SEPARATE(IP0,P3,P4)	; SEPARATE(IP0,P3,P4)
; SEPARATE(IP3,P5,P6)	; SEPARATE(IP3,P5,P6)
; FORMAT output=\$serout (IP0,"",IP1,"",IP2,"",IP3,"",IP4,"",IP5)	FORMAT output=\$serout (IP0,"",IP1,"",IP2,"",IP3,"",IP4,"",IP5)
FORMAT output=\$serout (#, "",P0,"",P1,"",P2,"",P3,"",P4,"",P5)	; FORMAT output=\$serout (P0,"",P1,"",P2,"",P3,"",P4,"",P5)
END	END
START A, B	;START A, B

Liste B-1 Code des macro-commandes utilisées pour le logiciel d'acquisition des sonnées, Feuille Macro5.0

```

'
' Econfman Macro
' Macro recorded 27/04/95 by Eric Le Courtois
'
'
Sub Econfman()
    Sheets("Conf.man.").Select
End Sub
'
' Econfauto Macro
' Macro recorded 27/04/95 by Eric Le Courtois
'
'
Sub Econfauto()
    Sheets("Conf.auto.").Select
End Sub
'
' Eretmenu Macro
' Macro recorded 27/04/95 by Eric Le Courtois
'
'
Sub Eretmenu()
    Sheets("Départ").Select

```

```

End Sub
'
' Eacqui Macro
' Macro recorded 27/04/95 by Eric Le Courtois
'
Sub Eacqui()
    Sheets("tdata6.xls").Select
    Range("A1").Select
End Sub

'
' EFinConfAuto Macro
' Macro recorded 01/05/95 by Eric Le Courtois
' Lors de la fin de la configuration du mode de surveillance automatique,
' execute les opération de modification des paramètres dans le
' "worksheet" TDATA6.XLM
'
Sub EFinConfAuto()
    Application.ScreenUpdating = False
    Range("C27").Select
    Selection.Copy
    Sheets("TDATA6.XLM").Select
    Range("E43").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, _
        SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Sheets("Conf.auto.").Select
    Range("C28").Select
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Sheets("TDATA6.XLM").Select
    Range("E47").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, _
        SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Sheets("Conf.auto.").Select
    Range("C29:C34").Select
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Sheets("TDATA6.XLM").Select
    Range("E49:E54").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, _
        SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Sheets("Conf.auto.").Select
    Application.CutCopyMode = False

```

```

    ActiveWindow.LargeScroll Down:=-1
    Sheets("Départ").Select
    Range("a1").Select
    Application.ScreenUpdating = True
End Sub
'
' EFinConfMan Macro
' Macro recorded 01/05/95 by Eric Le Courtois
'
Sub EFinConfMan()
    Application.ScreenUpdating = False
    Range("C30").Select
    Selection.Copy
    Sheets("TDATA6.XLM").Select
    Range("D43").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, _
        SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Sheets("Conf.man.").Select
    Range("C31").Select
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Sheets("TDATA6.XLM").Select
    Range("D44").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, _
        SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Sheets("Conf.man.").Select
    Application.CutCopyMode = False
    ActiveWindow.LargeScroll Down:=-1
    Sheets("Départ").Select
    Range("A1").Select
    Application.ScreenUpdating = True
End Sub
'
' Copie_données Macro
' Macro servant à copier les données dans un nouveau workbook
' Le format de sauvegarde est .txt mais l'extension est .mat
' afin de pouvoir éditer les données dans Matlab
'
Sub Copie_données()
    Application.ScreenUpdating = False
    Range("N100:T599").Select
    Selection.Copy

```

```

Range("F1").Select
Workbooks.Add
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, _
SkipBlanks:=False, Transpose:=False
Range("A1").Select
Application.ScreenUpdating = True
Application.Dialogs(xlDialogSaveAs).Show arg1:="c:\matlab\matrice.acq", arg2:=3
ActiveWindow.Close saveChanges:=False
End Sub

```

```

'
' manu Macro
' Remplace les deux boutons servant à lancer une acquisition manuelle
' Macro recorded 06/07/95 by Eric Le Courtois
'
'

```

```

Sub manu()
Application.ScreenUpdating = False
Application.Run Macro:=Sheets("TDATA6.XLM").Range("B105")
Application.Run Macro:=Sheets("TDATA6.XLM").Range("B15")
Range("A1").Select
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

```

```

'
' resul Macro
' Se positionne sur les graphiques en appliquant un zoom
' Macro recorded 95/07/07 by Eric Le Courtois
'
'

```

```

Sub resul()
Application.ScreenUpdating = False
ActiveWindow.Zoom = 50
Range("u1").Select
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

```

```

'
' retourresul Macro
' Après avoir affiché les graphiques, retour au menu principal sans zoom
' Macro recorded 95/07/07 by Eric Le Courtois
'
'

```

```

Sub retourresul()
Application.ScreenUpdating = False
ActiveWindow.Zoom = 100

```

```

    Range("A1").Select
    Application.ScreenUpdating = True
End Sub

'
' resul2 Macro
' Sert à afficher les résultats calculés
' Macro recorded 95/07/07 by Eric Le Courtois
'
'
Sub resul2()
    Range("A63").Select
End Sub
'
' retourresul2 Macro
' Après avoir affiché les résultats calculés, retour au menu principal
' Macro recorded 95/07/07 by Eric Le Courtois
'
'
Sub retourresul2()
    Range("A1").Select
End Sub
'
' trans Macro
' Cette macro renvoie à la macro servant au transfert et au calcul des
' mais de façon à ne pas visualiser tous les calculs.
' Ceci augmente la rapidité.

Sub trans()
    Application.ScreenUpdating = False
    Application.Run Macro:=Sheets("TDATA6.XLM").Range("B51")
    Range("A1").Select
    Application.ScreenUpdating = True
End Sub
'
' trans Auto
' Cette macro renvoie à la macro servant à l'acquisition en mode
' automatique. On ne visualise pas cependant les mouvements d'écran.
' Ceci augmente la rapidité.

Sub auto()
    Application.ScreenUpdating = False
    Application.Run Macro:=Sheets("TDATA6.XLM").Range("B118")

```

```

    Application.ScreenUpdating = True
End Sub
'
' Matlab Macro
' Macro recorded 7/09/95 by Eric Le Courtois
'
Sub Matlab()
    Shell "c:\matlab\bin\matlab.exe", 4
End Sub

```

Équations utilisées pour le calcul des résultats

Notations :

N : Nombre d'échantillons.

i : Partie entière de N.

j : Partie décimale de N.

k : Compteur.

T_e : Période d'échantillonnage.

I_{eff} : Courant total efficace d'une phase.

I_{eff_f} : Courant fondamental efficace d'une phase.

V_{eff} : Tension totale efficace d'une phase.

V_{eff_f} : Tension fondamentale efficace d'une phase.

φ_i : Déphasage du courant d'une phase par rapport à la référence.

φ_v : Déphasage de la tension d'une phase par rapport à la référence.

φ_F : Déphasage de la tension par rapport au courant de la même phase.

PF : Facteur de puissance.

S : Puissance apparente monophasée totale.

P_F : Puissance active monophasée fondamentale.

Q_F : Puissance réactive monophasée fondamentale.

D : Distorsion de puissance monophasée totale. Représente la puissance des harmoniques d'une phase.

THD(I) : Taux d'harmoniques en courant monophasé (pourcentage).

THD(V) : Taux d'harmoniques en tension monophasé (pourcentage).

Série de Fourier :

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{B-1})$$

Pour notre analyse, remplaçons a_n par v_{cm} ou i_{cm} et b_n par v_{sm} ou i_{sm} . Comme l'analyse est basée sur un signal à composante continue nulle, a_0 sera donc nul.

On peut aussi écrire $v_0(t)$ comme :

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{B-2})$$

où :

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{B-3})$$

et représente l'amplitude maximale de la $n_{i\text{ème}}$ harmonique et φ , la phase de la $n_{i\text{ème}}$ harmonique.

$$N = \frac{1}{9 * T_{\acute{e}} * 60} \quad (\text{B-4})$$

$$N = i + j \quad (\text{B-5})$$

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^i (i_k)^2 + j * (i_i + j * (i_{i+1} - i_i))^2}{N}} \quad (\text{B-6})$$

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^i (v_k)^2 + j * (v_i + j * (v_{i+1} - v_i))^2}{N}} \quad (\text{B-7})$$

$$i_{cm} = \frac{\sqrt{2}}{N} * \left[\left(\sum_{k=1}^i i_k * \cos(2\pi 60 T_{\acute{e}} k) \right) + j * (i_i + j * (i_{i+1} - i_i)) \right] * \cos(2\pi) = I \quad (\text{B-8})$$

$$i_{sm} = \frac{\sqrt{2}}{N} * \left[\sum_{k=1}^i i_k * \sin(2\pi 60T_{\epsilon}k) \right] \quad * \sin(2\pi) = 0 \quad (\text{B-9})$$

$$v_{cm} = \frac{\sqrt{2}}{N} * \left[\left(\sum_{k=1}^i v_k * \cos(2\pi 60T_{\epsilon}k) \right) + j * (v_i + j * (v_{i+1} - v_i)) \right] \quad (\text{B-10})$$

$$v_{sm} = \frac{\sqrt{2}}{N} * \left[\sum_{k=1}^i v_k * \sin(2\pi 60T_{\epsilon}k) \right] \quad * \sin(2\pi) = 0 \quad (\text{B-11})$$

$$I_{eff_F} = \sqrt{i_{cm}^2 + i_{sm}^2} \quad (\text{B-12})$$

$$V_{eff_F} = \sqrt{v_{cm}^2 + v_{sm}^2} \quad (\text{B-13})$$

$$\varphi_i = \text{tg}^{-1} \left(\frac{i_{cm}}{i_{sm}} \right) \quad (\text{B-14})$$

$$\varphi_v = \text{tg}^{-1} \left(\frac{v_{cm}}{v_{sm}} \right) \quad (\text{B-15})$$

$$\varphi_F = \varphi_v - \varphi_i \quad (\text{B-16})$$

$$\text{PF} = \cos(\varphi_F) \quad (\text{B-17})$$

$$S = V_{eff} * I_{eff} \quad (\text{B-18})$$

$$P_F = V_{eff_F} * I_{eff_F} * \cos(\varphi_F) \quad (\text{B-19})$$

$$Q_F = V_{eff_F} * I_{eff_F} * \sin(\varphi_F) \quad (\text{B-20})$$

$$D = \sqrt{S^2 - P_F^2 - Q_F^2} \quad (\text{B-21})$$

$$\text{THD}(I) = 100 * \sqrt{\frac{I_{eff}^2 - I_{eff_F}^2}{I_{eff_F}^2}} \quad (\text{B-22})$$

$$\text{THD(V)} = 100 * \sqrt{\frac{V_{\text{eff}}^2 - V_{\text{eff}_F}^2}{V_{\text{eff}_F}^2}} \quad (\text{B-23})$$

ANNEXE C

C. Logiciel du système SORBIER, codes de programmation des logiciels de traitement des données

La section C.1 de cette annexe présente les codes de programmation utilisés sous MATLAB pour le traitement des données provenant d'une acquisition du système SORBIER en utilisant la configuration en réseau avec la logiciel LYRE. La section C.2 de cette annexe présente les codes de programmation utilisés sous MATLAB pour le traitement des données provenant d'une acquisition du système SORBIER en utilisant la configuration avec un seul appareil SORBIER, le micro ordinateur PSION et son logiciel VISION. Il a été nécessaire de définir deux programmes pour les deux types de configurations. La matrice produite par le logiciel LYRE ne fournit pas exactement les mêmes informations que la matrice produite par VISION. Pour cette raison, deux programmes différents ont du être conçus pour effectuer le traitement des données.

C.1 Codes de programmation pour traitement des données provenant de LYRE

Pour ce programme est composé 5 fichiers effectuant des routines différentes. Voici ces fichiers et leur utilité :

lyre.m	Routine principale. C'est la routine qui doit être appelée à l'invite de Matlab. Cette routine fait la lecture du fichier à analyser et fait la gestion du menu et des autres sous-routines. Il gère aussi l'affichage des signaux acquis.
lyrecmsm.m	sous-routine servant à calculer les coefficients A_n et B_n d'un signal dans le but de calculer les autres résultats (efficace, efficace fondamentale, THD,...)
lyreff.m	sous-routine servant à calculer les valeurs efficaces et efficaces fondamentales en tension et en courant.
lyrefft.m	sous-routine effectuant le calcul de transformée de Fourier et l'affichage du spectre en fréquence des signaux acquis. M. A. Ba-razzouk est responsable en grande partie du développement de cette sous-routine.
lyrethd.m	sous-routine calculant les valeurs de THD en tension et en courant. Il gère aussi l'affichage de la matrice des résultats calculés et la sauvegarde de cette matrice dans un fichier sous un format ASCII.

C.1.1 lyre.m

```
%%%%%%%%%%
% Michel Bélanger et Eric Le Courtois, 21 avril 1996. %
%%%%%%%%%%

clear
clc
close all;          %fermer toutes les fenêtres de figures;
flag=1;            %Pour valider le nom du fichier fourni par l'utilisateur
freq_base=60;

% déterminer le nom du fichier à examiner (matrice des données)

fichier=0;         % initialisation

[file,path]=uigetfile('c:\lyre\resultat.txt','Quel est le fichier à analyser?',0,0); %pour demander le nom du
                                                         fichier

fichier=[path,file];
clear path;clear file;
if fichier==0;     % Aucun nom de fichier proposé par l'utilisateur
    error('Ce message d"erreur est normal puisque vous n"avez pas spécifié de nom de
    fichier')
end;

%%%%%%%%%%
% Portion lecture du fichier de résultats %
%%%%%%%%%%
clc
disp('Lecture du fichier en cours...')
mat_size=[inf];
fid=fopen(fichier,'rt');
Vdata=fscanf(fid,'%15f',mat_size);
fclose(fid);
no_canal=Vdata(1);
no_ech=Vdata(2);
no_fichier=Vdata(3);
freq_ech=Vdata(4);
seuil=Vdata(5);
pre_ech=Vdata(6);
mat_V=Vdata(7);
mat_l=Vdata(8);
seconde=Vdata(9);
minute=Vdata(10);
heure=Vdata(11);
jour=Vdata(12);
mois=Vdata(13);
an=Vdata(14);

t=(1/freq_ech)*(0:no_ech-1);          %fenêtre d'échantillonnage
no_cycles=(no_ech/freq_ech)*freq_base;
N=floor(no_cycles);                   %nombre arrondi du nombre de périodes du signal échantillonné.
```

```
nomb=(N/60)*freq_ech;           % nombre d'échantillons correspondant à N périodes complètes.
```

```
%  
%Conversion de vecteur à matrice, paramètre : no_canal, no_ech  
%  
n=0;  
for J=1:16;  
    if (Vdata(J+16))==0  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=0;  
        end  
    elseif J==5;           %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==6;           %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==7;           %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==8;           %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==13;          %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==14;          %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==15;          %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    elseif J==16;          %Canal de courant échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;  
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);  
        end  
    else                    %Canal de tension échantillonné  
        n=n+1;  
        for l=1:no_ech;
```

```

                                Data(I,J)=Vdata(((I-1)*no_canal)+n+32);
                                end
                                end
                                end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%          MENU D'UTILISATION DU PROGRAMME LYRE          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fin=0;
while(fin<1);
    K=menu('Programme d"analyse des résultats provenant du Sorbier      Eric Le Courtois
1996'...
        , 'Afficher les résultats graphiques',...
        , 'Calculer les autres résultats ? (Valeurs efficaces fondamentales, S, P, Q, D, THD,
        FP)',...
        , 'Effectuer l"analyse en fréquence (FFT)',...
        , 'Fermer les fenêtres des figures',...
        , 'Recommencer ce programme', 'Quitter');
    if K==1;
        disp('Affichage des résultats...')
        n=1;
        for J=1:4                                %(on y va par paires tension-courant) (Sorbier#1)
            Sorbier='Sorbier#1, ';
            canal=J;
            canal=num2str(canal);
            titv=[Sorbier,'Canal de tension#',canal,' (V)'];
            titi=[Sorbier,'Canal de courant#',canal,' (A)'];

            if(Vdata(J+16)+Vdata(J+20))==2 %les canaux en tension ET courant
                correspondants ont été échantillonnés

                figure(n);n=n+1;
                subplot(2,1,1);plot(t,Data(:,J),'-w'),grid;zoom;
                title(titv)
                subplot(2,1,2);plot(t,Data(:,J+4),'-w'),grid;
                title(titi);xlabel('temps (s)')

            elseif Vdata(J+16)==1 %Seulement le canal de tension a été échantillonné
                figure(n);n=n+1;
                plot(t,Data(:,J));grid;zoom
                title(titv);xlabel('temps (s)')

            elseif Vdata(J+20)==1 %Seulement le canal de courant a été
                échantillonné
                figure(n);n=n+1
                plot(t,Data(:,J+4));grid;zoom
                title(titi);xlabel('temps (s)')
            end
        end
    end
    for J=9:12                                %(on y va par paires tension-courant) (Sorbier#1)
        Sorbier='Sorbier#2, ';
        canal=J-8;
        canal=num2str(canal);
        titv=[Sorbier,'Canal de tension#',canal,' (V)'];
        titi=[Sorbier,'Canal de courant#',canal,' (A)'];

```

```

if(Vdata(J+16)+Vdata(J+20))==2 %les canaux en tension ET courant
                                correspondants ont été échantillonnés
    figure(n);n=n+1;
    subplot(2,1,1);plot(t,Data(:,J),'-w'),grid;zoom;
    title(titv)
    subplot(2,1,2);plot(t,Data(:,J+4),'-w'),grid;
    title(titi);xlabel('temps (s)')

elseif Vdata(J+16)==1 %Seulement le canal de tension a été échantillonné
    figure(n);n=n+1;
    plot(t,Data(:,J));grid;zoom
    title(titv);xlabel('temps (s)')

elseif Vdata(J+20)==1 %Seulement le canal de courant a été
                        échantillonné
    figure(n);n=n+1;
    plot(t,Data(:,J+4));grid;zoom
    title(titi);xlabel('temps (s)')
end
end
elseif K==2;
    lyreff;
    pause(1);
    lyrecmsm;
    lyrethd;
elseif K==3;
    lyrefft;
elseif K==4;
    close all;
elseif K==5;
    fin=1;
    lyre;
else
    fin=1;
    clc;
end;
end;

```

```

clear Sorbier;clear J;clear ans; clear canal;clear rep;clear titi;clear titv;
clear n;clear ext;

```

C.1.2 lyrecmsm.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul de Vcm, lcm, Vsm et lsm pour calculer les valeurs efficaces      %
% de tension et courant fondamental.                                     %
% fichier requis pour l'analyse des résultats du système d'acquisition Sorbier %
%                                                                 %
%          Créé par Eric Le Courtois le 30 mai 1996.                  %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if N<1; % N est le nombre de périodes de 60 Hz qui ont été échantillonnées

    disp('Pour le taux d'échantillonnage utilisé, le nombre d'échantillons est insuffisant')
    disp('compte tenu qu'un minimum d'une période de 60 Hz est requise pour le calcul des
valeurs efficaces.')
    disp('Veuillez faire une acquisition avec plus d'échantillons')
    disp('Merci')

else % Calcul des valeurs efficaces fondamentales sur N périodes de 60 Hz
disp('Calcul des valeurs efficaces fondamentales...');
debut=no_ech-nomb; %position de départ pour calcul des valeurs efficaces
    if debut==0;
        debut=1;
    end

    J=0;i=0;
    for l=1:16; % Pour calculer tous les canaux de 1 à 16
        sumcm=0;sumsm=0;sm(l)=0;cm(l)=0;
        if Vdata(l+16)==0; %Si le canal n'a pas été échantillonné
            sumcm=0;sumsm=0;efffond(l)=0;
        else % il fait le calcul seulement sur les canaux qui ont été échantillonnés
            for J=debut:no_ech; %calcul sur P périodes de 60 Hz
                sumcm=sumcm+((Data(J,l))*cos(2*pi*60*((J-debut+1)/freq_ech)));
                sumsm=sumsm+((Data(J,l))*sin(2*pi*60*((J-debut+1)/freq_ech)));
            end;
            end
            cm(l)=sqrt(2)*sumcm/nomb; %Calcul Vcm si tension, lcm si courant
            sm(l)=sqrt(2)*sumsm/nomb; %Calcul Vsm si tension, lsm si courant
            efffond(l)=(sqrt(cm(l)^2+sm(l)^2));
        end
    end

end

clear debut; clear texte; clear var; clear txt;clear res;clear canal;clear S;clear J;clear I;

```

C.1.3 lyreff.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul de la valeur efficace de tension et de courant          %
% des résultats obtenus par Lyre                                %
% fichier requis pour l'analyse des résultats du système %
% d'acquisition Sorbier                                        %
%                                                              %
% Créé par Eric Le Courtois le 30 mai 1996.                  %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% on doit vérifier à ce qu'au moins une période de 60 Hz a été échantillonnée

clc;clc;
disp('Calcul des valeurs efficaces...')
N=floor(no_cycles); %Pour connaître le nombre entier de périodes échantillonnées.

```

```

if N<1; % N est le nombre de périodes de 60 Hz qui ont été échantillonnées

    disp('Pour le taux d'échantillonnage utilisé, le nombre d'échantillons est insuffisant')
    disp('compte tenu qu'un minimum d'une période de 60 Hz est requise pour le calcul des
valeurs efficaces.')
    disp('Veuillez faire une acquisition avec plus d'échantillons')
    disp('Merci')

else % Calcul des valeurs efficaces sur N périodes de 60 Hz

    nomb=round((N/60)*freq_ech); % calcul du nombre d'échantillon correspondant à N
périodes de 60 Hz
    debut=no_ech-nomb;          %position de départ pour calcul des valeurs efficaces
    if debut==0;
        debut=1;
    end
    n=0;

    for l=1:16; % Pour calculer tous les canaux de 1 à 16
        sum=0;
        if Vdata(l+16)==0; %Si le canal n'a pas été échantillonné
            sum=0;
        else % il fait le calcul seulement sur les canaux qui ont été échantillonnés
            for J=debut:no_ech; %calcul sur N périodes de 60 Hz
                sum=sum+(Data(J,l))^2;
            end;
        end
        eff(l)=sqrt(sum/nomb); %Calcul de la valeur efficace
    end
end

%effacement des variables (non indispensables) pour ne pas accaparer trop d'espace mémoire.
clear texte;clear Sorbier;clear l;clear J;clear flag;clear n;clear l1;clear l2;clear l3;
clear texteV;clear l4;clear l5;clear l6;clear l7;clear l8;clear V1;clear V2;clear V3;clear V4;
clear textel;clear V5;clear V6;clear V7;clear V8;clear ans;clear mat_l;clear mat_V;
clear mat_size;clear var;clear S;clear canal;clear sum;clear debut;clear mult;clear titi;
clear titv;clear txt;clear res;clear rep;clear fichier;clear dot;

```

C.1.4 lyreffft.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul de la fft des canaux échantillonnés et affichage des résultats %
% Créé par Eric Le Courtois avec l'aide de Abdellfattah BA-RAZZOUK %
% le 31 mai 1996. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Data : matrice des échantillons (16 colonnes pour 16 canaux);
% N : Nombre de périodes entières à 60 Hz du signal échantillonné
% nomb : nombre d'échantillons correspondant à N périodes complètes
% freq_ech : fréquence d'échantillonnage du Sorbier

```

```

% freq_base : fréquence de base du signal échantillonné (60Hz habituellement)
% l : nombre de canaux total
% ordre : numéro de l'ordre de l'harmonique (pour une fréquence de 60 Hz, l'ordre de 120Hz est 2)
% t : temps
% Ah : Amplitude de l'harmonique calculée
% f : fréquence

```

```

for l=1:16; % Pour tous les canaux
    if (Vdata(l+16))==1; % Si le canal a été échantillonné
        % pour N périodes complètes
        x = Data(1:nomb,l); % Signal à analyser
        t=0:1/freq_ech:((nomb-1)/freq_ech); % temps correspondant au nombre
        % d'échantillons
        y=fft(x); % exécution de la fft
        Ah(:,l)=2*sqrt(y.*conj(y))/nomb; % calcul de l'amplitude exacte du résultat
        % de la fft
        Ah(1,l)=Ah(1,l)/2; % Calcul de l'amplitude exacte de la
        % composante c.c.
        f=freq_ech/nomb*(0:(nomb/2)-1); % calcul du vecteur fréquence
        f=f'; % Passage de vecteur colonne à vecteur
        ligne % Passage de fréquence à "ordre
        ordre=f/freq_base; % d'harmonique"
    end
end

```

```

% Affichage des résultats
figure; % Création d'une nouvelle figure par canal
subplot(2,1,1);plot((1:nomb)/freq_ech,x,'-w');grid; % Affichage du signal à analyser
if (l==1);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#1, Sorbier#1');
elseif (l==2);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#2, Sorbier#1');
elseif (l==3);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#3, Sorbier#1');
elseif (l==4);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#4, Sorbier#1');
elseif (l==5);
    title('Signal et FFT du signal, canal en courant#1, Sorbier#1');
elseif (l==6);
    title('Signal et FFT du signal, canal en courant#2, Sorbier#1');
elseif (l==7);
    title('Signal et FFT du signal, canal en courant#3, Sorbier#1');
elseif (l==8);
    title('Signal et FFT du signal, canal en courant#4, Sorbier#1');
elseif (l==9);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#1, Sorbier#2');
elseif (l==10);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#2, Sorbier#2');
elseif (l==11);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#3, Sorbier#2');
elseif (l==12);
    title('Signal et FFT du signal, canal en tension#4, Sorbier#2');
elseif (l==13);
    title('Signal et FFT du signal, canal en courant#1, Sorbier#2');
elseif (l==14);
    title('Signal et FFT du signal, canal en courant#2, Sorbier#2');
end

```

```

        title('Signal et FFT du signal, canal en courant#2, Sorbier#2');
elseif(l==15);
        title('Signal et FFT du signal, canal en courant#3, Sorbier#2');
elseif(l==16);
        title('Signal et FFT du signal, canal en courant#4, Sorbier#2');
end;
subplot(2,1,2);plot(ordre,Ah(1:nomb/2,l),'-r');zoom;grid % Affichage du résultats
if (freq_ech>50*60); % diminution de la fenêtre
                    % à la 50e harmonique ou
                    % moins
                    axis([0 50 0 max(Ah(:,l))])
else
                    axis([0 freq_ech/60 0 max(Ah(:,l))])
end
xlabel('Ordre d"harmonique')
else
end;
end

```

C.1.5 lyreffft.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul du THD, phi, PF, P, S, Q, D %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% fichier requis pour l'analyse des résultats du système %
% d'acquisition Sorbier %
% %
% Créé par Eric Le Courtois le 30 mai 1996. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('Calcul des différents résultats...')

%Calcul du THD en tension et courant et de l'angle de déphasage tension fondamentale et courant
fondamental
for l=1:16;
    if (Vdata(l+16))==0
        THD(l)=0;phi(l)=0;
    elseif (Vdata(l+16))==1;
        THD(l)=100*sqrt((eff(l)^2-efffond(l)^2)/efffond(l)^2);
        phi(l)=atan2(sm(l),cm(l));
    else
        disp('problème dans le calcul du THD et phi')
    end
end

end

%%%Calcul des autres résultats : P, Q, S, D, phi, PF
for l=1:4; %Sorbier #1
    if ((Vdata(l+16))==0)||((Vdata(l+16+4))==0); %Si le canal en tension OU
        phifond(l)=0; %le canal en courant n'a pas
        phifond(l+4)=0; %été échantillonné... (pas utilisé)
    end
end

```

```

PF(l)=0;
PF(l+4)=0;
S(l)=0;
S(l+4)=0;
Pfond(l)=0;
Pfond(l+4)=0;
Qfond(l)=0;
Qfond(l+4)=0;
D(l)=0;
D(l+4)=0;

else
%Les canaux en tension ET courant
%ont été échantillonnés
phifond(l)=0;
%angle de déphasage tension-courant
fondamental;
phifond(l+4)=(phi(l)-phi(l+4));
%cet angle est de 0 pour la tension et phi
pour le courant
PF(l)=cos(phifond(l));
%Facteur de puissance tension courant
fondamental
PF(l+4)=cos(phifond(l+4));
S(l)=eff(l)*eff(l+4);
%Puissance apparente
S(l+4)=S(l);
Pfond(l)=efffond(l)*efffond(l+4)*cos(phifond(l)); %Puissance active fondamentale
Pfond(l+4)=efffond(l)*efffond(l+4)*cos(phifond(l));
Qfond(l)=efffond(l)*efffond(l+4)*sin(phifond(l)); %Puissance réactive
fondamentale
Qfond(l+4)=efffond(l)*efffond(l+4)*sin(phifond(l));
D(l)=sqrt(S(l)^2-Pfond(l)^2-Qfond(l)^2); %Puissance de distorsion
D(l+4)=sqrt(S(l)^2-Pfond(l)^2-Qfond(l)^2);
end;

end;

for l=9:12;
%Sorber#2
if ((Vdata(l+16))==0)||((Vdata(l+16+4))==0); %Si le canal en tension OU
%le canal en courant n'a pas
%été échantillonné...
phifond(l)=0;
phifond(l+4)=0;
PF(l)=0;
PF(l+4)=0;
S(l)=0;
S(l+4)=0;
Pfond(l)=0;
Pfond(l+4)=0;
Qfond(l)=0;
Qfond(l+4)=0;
D(l)=0;
D(l+4)=0;

else
%Les canaux en tension ET courant
%ont été échantillonnés
%angle de déphasage tension-courant
fondamental;
phifond(l)=0;
%cet angle est de 0 pour la tension et phi
pour le courant
phifond(l+4)=(phi(l)-phi(l+4));

```

```

PF(l)=cos(phifond(l));           %Facteur de puissance tension courant
                                fondamental

PF(l+4)=cos(phifond(l+4));
S(l)=eff(l)*eff(l+4);           %Puissance apparente
S(l+4)=S(l);
Pfond(l)=efffond(l)*efffond(l+4)*cos(phifond(l)); %Puissance active fondamentale
Pfond(l+4)=efffond(l)*efffond(l+4)*cos(phifond(l));
Qfond(l)=efffond(l)*efffond(l+4)*sin(phifond(l)); %Puissance réactive
                                                fondamentale
Qfond(l+4)=efffond(l)*efffond(l+4)*sin(phifond(l));
D(l)=sqrt(S(l)^2-Pfond(l)^2-Qfond(l)^2);      %Puissance de distorsion
D(l+4)=sqrt(S(l)^2-Pfond(l)^2-Qfond(l)^2);

end

end;

phi=phi*180/pi;                 %transformation de radians==>degrés
phifond=phifond*180/pi;        %transformation de radians==>degrés
%Affichage des résultats

%%%%%%%%%%
%Affichage des données
%%%%%%%%%%

figure;
AXIS('off')
axis([0 8 1 18])
axis('ij')
text(1,0,'eff')
text(2,0,'THD')
text(3,0,'phi')
text(4,0,'FP')
text(5,0,'S')
text(6,0,'P')
text(7,0,'Q')
text(8,0,'D')
text(0,1,'S1,V1')
text(0,2,'S1,I1')
text(0,3,'S1,V2')
text(0,4,'S1,I2')
text(0,5,'S1,V3')
text(0,6,'S1,I3')
text(0,7,'S1,V4')
text(0,8,'S1,I4')
text(0,9,'S2,V1')
text(0,10,'S2,I1')
text(0,11,'S2,V2')
text(0,12,'S2,I2')
text(0,13,'S2,V3')
text(0,14,'S2,I3')
text(0,15,'S2,V4')
text(0,16,'S2,I4')
for l=1:4;
    text1=num2str(eff(l));
    text(1,(l*2-1),text1);           % Sorbier#1 V1,I1, V2,I2, V3,I3, V4,I4
                                    % Tension

```

```

text1=num2str(THD(l+4));           % Courant
text(1,(l*2),text1);

text1=num2str(THD(l));
text(2,(l*2-1),text1);
text1=num2str(THD(l+4));
text(2,(l*2),text1);

text1=num2str(phifond(l));
text(3,(l*2-1),");
text1=num2str(phifond(l+4));
text(3,(l*2),text1);

text1=num2str(PF(l));
text(4,(l*2-1),");
text1=num2str(PF(l+4));
text(4,(l*2),text1);

text1=num2str(S");
text1=num2str(S(l+4));
text(5,(l*2),text1);

text1=num2str(Pfond(l));
text(6,(l*2-1),");
text1=num2str(Pfond(l+4));
text(6,(l*2),text1);

text1=num2str(Qfond(l));
text(7,(l*2-1),");
text1=num2str(Qfond(l+4));
text(7,(l*2),text1);

text1=num2str(D(l));
text(8,(l*2-1),");
text1=num2str(D(l+4));
text(8,(l*2),text1);

end
for l=9:12;
text1=num2str(THD(l));           % Sorbier#1 V1,I1, V2,I2, V3,I3, V4,I4
text(1,(l*2-9),text1);           % Tension
text1=num2str(THD(l+4));
text(1,(l*2-8),text1);           % Courant

text1=num2str(THD(l));
text(2,(l*2-9),text1);
text1=num2str(THD(l+4));
text(2,(l*2-8),text1);

text1=num2str(phifond(l));
text(3,(l*2-9),");
text1=num2str(phifond(l+4));
text(3,(l*2-8),text1);

text1=num2str(PF(l));

```

```

text(4,(I*2-9),");
text1=num2str(PF(I+4));
text(4,(I*2-8),text1);

text1=num2str(S(I));
text(5,(I*2-9),");
text1=num2str(S(I+4));
text(5,(I*2-8),text1);

text1=num2str(Pfond(I));
text(6,(I*2-9),");
text1=num2str(Pfond(I+4));
text(6,(I*2-8),text1);

text1=num2str(Qfond(I));
text(7,(I*2-9),");
text1=num2str(Qfond(I+4));
text(7,(I*2-8),text1);

text1=num2str(D(I));
text(8,(I*2-9),");
text1=num2str(D(I+4));
text(8,(I*2-8),text1);
end

%Pour la sauvegarde des résultats
rep=input('Voulez-vous sauvegarder la matrice des résultats? (o/n)', 's');
if rep=='o';
    %Création de la matrice des résultats
    for I=1:4;
        A((I*2-1),1)=eff(I);
        A((I*2),1)=eff(I+4);

        A((I*2-1),2)=THD(I);
        A((I*2),2)=THD(I+4);

        A((I*2-1),3)=phifond(I);
        A((I*2),3)=phifond(I+4);

        A((I*2-1),4)=PF(I);
        A((I*2),4)=PF(I+4);

        A((I*2-1),5)=S(I);
        A((I*2),5)=S(I+4);

        A((I*2-1),6)=Pfond(I);
        A((I*2),6)=Pfond(I+4);

        A((I*2-1),7)=Qfond(I);
        A((I*2),7)=Qfond(I+4);

        A((I*2-1),8)=D(I);
        A((I*2),8)=D(I+4);
    end
end

```

```

end

for l=9:12;
    A((l*2-9),1)=eff(l);
    A((l*2-8),1)=eff(l+4);

    A((l*2-9),2)=THD(l);
    A((l*2-8),2)=THD(l+4);

    A((l*2-9),3)=phifond(l);
    A((l*2-8),3)=phifond(l+4);

    A((l*2-9),4)=PF(l);
    A((l*2-8),4)=PF(l+4);

    A((l*2-9),5)=S(l);
    A((l*2-8),5)=S(l+4);

    A((l*2-9),6)=Pfond(l);
    A((l*2-8),6)=Pfond(l+4);

    A((l*2-9),7)=Qfond(l);
    A((l*2-8),7)=Qfond(l+4);

    A((l*2-9),8)=D(l);
    A((l*2-8),8)=D(l+4);
end;

%Sauvegarde de la matrice des résultats
[file,path]=uiputfile('c:\lyre\reponse.txt','Sauvegarde de la matrice des résultats');
fichier=[path,file];
clear path;clear file;
fid=fopen(fichier,'wt');
fprintf(fid,'Date: %g/%g/%g Heure : %g:%g\n\n',jour,mois,an,heure,minute); %imprime la
                                                date comme entête du fichier

fprintf(fid,'SORBIER#1 \n\n');
fprintf(fid,'Canal Val. eff. THD Phi(°) PF S(VA) P(W) Q(VAR)
D(VA)\n');
for l=1:8;
    if(round(l/2)==(l/2)) % nombre pair==> courant
        fprintf(fid,'Courant%1g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g
\n',l/2,A(l,:));
    else;
        fprintf(fid,'TENSION%1g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g
%10g \n',(l+1)/2,A(l,:));
    end;
end
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,'SORBIER#2 \n\n');
fprintf(fid,'Canal Val. eff. THD Phi(°) PF S(VA) P(W) Q(VAR)
D(VA)\n');
for l=9:16;
    if(round(l/2)==(l/2)) % nombre pair==> courant
        fprintf(fid,'Courant%1g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g
\n',(l-8)/2,A(l,:));
    end;
end;

```

```

else;
    fprintf(fid,'TENSION%1g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g \n',(l-7)/2,A(l,:));
end;
end
end;
clear A;clear fichier;

```

C.2 Codes de programmation pour le traitement des données provenant de VISION

IMPORTANT : Avant de faire un traitement post-acquisition, le fichier provenant de l'acquisition et conservé sur la disquette flash doit être copié sur le disque dur du PC. Ce programme ne fait pas la lecture directe de la disquette flash.

- psion.m routine principale. C'est la routine qui doit être appelée à l'invite de Matlab. Cette routine fait la lecture du fichier à analyser et fait la gestion du menu et des autres sous-routines. Il gère aussi l'affichage des signaux acquis.

- psiocmsm.m sous-routine servant à calculer les coefficients A_n et B_n d'un signal dans le but de calculer les autres valeurs (efficace, efficace fondamentale, THD,...)

- psioeff.m sous-routine servant à calculer les valeurs efficaces en tension et en courant.

- psiofft.m sous-routine effectuant le calcul de la transformée de Fourier et l'affichage du spectre en fréquence des signaux acquis.
M. A. Ba-razzouk est responsable en grande partie du développement de cette sous-routine.

- psiothd.m sous-routine calculant les valeurs de THD en tension et en courant. Il gère aussi l'affichage de la matrice des résultats calculés.

C.2.1 psion.m

```

%%%%%%%%%%%%%%
% Michel Bélanger et Eric Le Courtois, 21 avril 1996.  %
%%%%%%%%%%%%%%

clear
clc
close all; %fermer toutes les fenêtres de figures;
freq_base=60;

% déterminer le nom du fichier à examiner

fichier=0;

```

```

[file,path]=uigetfile ('c:\psion\datafile.*','Quel est le fichier à analyser?',0,0); %pour demander le nom du
fichier
fichier=[path,file];
clear path;clear file;
if fichier==0; % Aucun fichier spécifié par l'utilisateur pour la collecte des données
    error('Ce message d'erreur est normal puisque vous n'avez pas spécifié de nom de fichier valide')
end;

%%%%%%%%%%%%%%
% Portion lecture du fichier de résultats %
%%%%%%%%%%%%%%
clc
disp('Lecture du fichier en cours...')
mat_size=[inf];
fid=fopen(fichier,'rt');
Vdata=fscanf(fid,'%15f',mat_size);
fclose(fid);
no_canal=Vdata(1);
no_ech=Vdata(2);
no_fichier=Vdata(3);
freq_ech=Vdata(4);
seuil=Vdata(5);
pre_ech=Vdata(6);
mat_V=Vdata(7);
mat_I=Vdata(8);
seconde=Vdata(9);
minute=Vdata(10);
heure=Vdata(11);
jour=Vdata(12);
mois=Vdata(13);
an=Vdata(14);

freq_ech=10000;
t=(1/freq_ech)*(0:no_ech-1); %fenêtre d'échantillonnage
no_cycles=(no_ech/freq_ech)*freq_base;
N=floor(no_cycles); %nombre arrondi du nombre de périodes du signal échantillonné.
nomb=(N/60)*freq_ech; % nombre d'échantillons correspondant à N périodes complètes.

%Les données de la matrice sont sous la forme d'un seul vecteur.
%Il faut donc retrouver une matrice à 8 colonnes et no_ech lignes
%Les colonnes de la matrice correspondant à des canaux non échantillonnés prennent la valeur 0.
n=0;
for J=1:8;
    if (Vdata(J+16))==0;
        for l=1:no_ech; %Canal non échantillonné
            Data(l,J)=0;
        end
    elseif J==5; %Canal en courant
        n=n+1;
        for l=1:no_ech;
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);
        end
    elseif J==6; %Canal en courant
        n=n+1;
    end
end

```

```

        for l=1:no_ech;
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);
        end
    elseif J==7;    %Canal en courant
        n=n+1;
        for l=1:no_ech;
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);
        end
    elseif J==8;    %Canal en courant
        n=n+1;
        for l=1:no_ech;
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);
        end
    elseif(Vdata(J+16))==1; % Canal échantillonné
        n=n+1;
        for l=1:no_ech;
            Data(l,J)=Vdata(((l-1)*no_canal)+n+32);
        end
    end
end;
clear n;clear J;clear l;

%%%%%%%%%%%%%%
%      MENU D'UTILISATION DU PROGRAMME PSION      %
%%%%%%%%%%%%%%

fin=0;

while(fin<1); %Pour demeurer dans le menu tant que quitter n'est pas sélectionné

    K=menu('Programme d"analyse des résultats provenant du Sorbier      Eric Le Courtois 1996',...
        'Afficher les résultats graphiques',...
        'Calculer les autres résultats (Valeurs efficaces fondamentales, S, P, Q, D, THD, FP)',...
        'Effectuer l"analyse en fréquence (FFT)',...
        'Fermer les fenêtres des figures',...
        'Recommencer ce programme','Quitter');
    if K==1;
        disp('Affichage des résultats...')
        n=1;
        for J=1:4 %(on y va par paires tension-courant) (Sorbier#1)
            Sorbier='Sorbier#1, ';
            canal=J;
            canal=num2str(canal);
            titv=[Sorbier,'Canal de tension#',canal,' (V)'];
            titi=[Sorbier,'Canal de courant#',canal,' (A)'];

            if(Vdata(J+16)+Vdata(J+20))==2 %les canaux en tension ET courant
                correspondants ont été échantillonnés
                figure(n);n=n+1;disp('2')
                subplot(2,1,1);plot(t,Data(:,J),'-w'),grid;zoom;
                title(titv)
                subplot(2,1,2);plot(t,Data(:,J+4),'-w'),grid;
                title(titi);xlabel('temps (s)')
            elseif Vdata(J+16)==1 %Seulement le canal de tension a été échantillonné

```

```

        figure(n);n=n+1;disp('V')
        plot(t,Data(:,J));grid;zoom
        title(titv);xlabel('temps (s)')
    elseif Vdata(J+20)==1 %Seulement le canal de courant a été échantillonné
        figure(n);n=n+1
        plot(t,Data(:,J+4));grid;zoom;disp('I')
        title(titi);xlabel('temps (s)')
    end
end

elseif K==2;
    psioeff;
    pause(1);
    psiocmsm;
    psiothd;
elseif K==3;
    psiofft;
elseif K==4;
    close all;
elseif K==5;
    fin=1;
    psion;
else
    fin=1;
    clc;
end;

end;

clear Sorbier;clear J;clear ans; clear canal;clear rep;clear titi;clear titv;
clear n;clear ext;

```

C.2.2 psiocmsm.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul de Vcm, lcm, Vsm et lsm pour calculer les valeurs efficaces      %
% de tension et courant fondamental.                                     %
% fichier requis pour l'analyse des résultats du système d'acquisition Sorbier %
%                                                                 %
%      Créé par Eric Le Courtois le 30 mai 1996.                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

if N<1; % N est le nombre de périodes de 60 Hz qui ont été échantillonnées

```

disp('Pour le taux d'échantillonnage utilisé, le nombre d'échantillons est insuffisant')
disp('compte tenu qu'un minimum d'une période de 60 Hz est requise pour le calcul des valeurs
efficaces.')
disp('Veuillez faire une acquisition avec plus d'échantillons')
disp('Merci')

```

```

else % Calcul des valeurs efficaces fondamentales sur N périodes de 60 Hz
    disp('Calcul des valeurs efficaces fondamentales...');
    debut=no_ech-nomb; %position de départ pour calcul des valeurs efficaces
    if debut==0;
        debut=1;
    end

    J=0;l=0;
    for l=1:8; % Pour calculer tous les canaux de 1 à 16
        sumcm=0;sumsm=0;sm(l)=0;cm(l)=0;
        if Vdata(l+16)==0; %Si le canal n'a pas été échantillonné
            sumcm=0;sumsm=0;efffond(l)=0;
        else % il fait le calcul seulement sur les canaux qui ont été échantillonnés
            for J=debut:no_ech; %calcul sur P périodes de 60 Hz
                sumcm=sumcm+((Data(J,l))*cos(2*pi*60*((J-debut+1)/freq_ech)));
                sumsm=sumsm+((Data(J,l))*sin(2*pi*60*((J-debut+1)/freq_ech)));
            end;
            end
            cm(l)=sqrt(2)*sumcm/nomb; %Calcul Vcm si tension, lcm si courant
            sm(l)=sqrt(2)*sumsm/nomb; %Calcul Vsm si tension, lsm si courant
            efffond(l)=(sqrt(cm(l)^2+sm(l)^2));
        end
    end
end

clear debut; clear texte; clear var; clear txt;clear res;clear canal;clear S;clear J;clear l;

```

C.2.3 psioeff.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul de la valeur efficace de tension et de courant          %
% des résultats obtenus par Lyre                                %
% fichier requis pour l'analyse des résultats du système        %
% d'acquisition Sorbier                                         %
%                                                                %
% Créé par Eric Le Courtois le 30 mai 1996.                    %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% on doit vérifier à ce qu'au moins une période de 60 Hz a été échantillonnée
clc;clc;
disp('Calcul des valeurs efficaces...')
N=floor(no_cycles); %Pour connaître le nombre entier de périodes échantillonnées.

if N<1; % N est le nombre de périodes de 60 Hz qui ont été échantillonnées
    disp('Pour le taux d'échantillonnage utilisé, le nombre d'échantillons est insuffisant')
    disp('compte tenu qu'un minimum d'une période de 60 Hz est requise pour le calcul des valeurs
    efficaces.')
    disp('Veuillez faire une acquisition avec plus d'échantillons')
    disp('Merci')
else % Calcul des valeurs efficaces sur N périodes de 60 Hz

```

```

nomb=round((N/60)*freq_ech); % calcul du nombre d'échantillonnd correspondant à N périodes de
60 Hz
debut=no_ech-nomb; %position de départ pour calcul des valeurs efficaces
if debut==0;
    debut=1;
end
n=0;

for l=1:8; % Pour calculer tous les canaux de 1 à 8
    sum=0;
    if Vdata(l+16)==0; %Si le canal n'a pas été échantillonné
        sum=0;
    else % il fait le calcul seulement sur les canaux qui ont été échantillonnés
        for J=debut:no_ech; %calcul sur N périodes de 60 Hz
            sum=sum+(Data(J,l))^2;
        end;
    end
    eff(l)=sqrt(sum/nomb); %Calcul de la valeur efficace
end
end

%effacement des variables non-indispensables pour ne pas accaparer trop d'espace mémoire.

```

```

clear texte;clear Sorbier;clear l;clear J;clear flag;clear n;clear l1;clear l2;clear l3;
clear texteV;clear l4;clear l5;clear l6;clear l7;clear l8;clear V1;clear V2;clear V3;clear V4;
clear textel;clear V5;clear V6;clear V7;clear V8;clear ans;clear mat_l;clear mat_V;
clear mat_size;clear var;clear S;clear canal;clear sum;clear debut;clear mult;clear titi;
clear titv;clear txt;clear res;clear rep;clear fichier;clear dot;

```

C.2.4 psiofft.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcul de la fft des canaux échantillonnés et affichage des résultats      %
% Créé par Eric Le Courtois avec l'aide de M. Abdellfattah BA-RAZZOUK      %
%                               le 31 mai 1996.                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Data      : matrice des échantillons (16 colonnes pour 16 canaux);
% N         : Nombre de périodes entières à 60 Hz du signal échantillonné
% nomb     : nombre d'échantillons correspondant à N périodes complètes
% freq_ech : fréquence d'échantillonnage du Sorbier
% freq_base : fréquence de base du signal échantillonné (60Hz habituellement)
% l        : nombre de canaux total
% ordre    : numéro de l'ordre de l'harmonique (pour une fréquence de 60 Hz, l'ordre de 120Hz est 2)
% t        : temps
% Ah       : Amplitude de l'harmonique calculée
% f        : fréquence

for l=1:8;
    if (Vdata(l+16))==1;
        x = Data(1:nomb,l);
        t=0:1/freq_ech:((nomb-1)/freq_ech);
    end
end

```



```
disp('Calcul des différents résultats...')
```

```
%Calcul du THD en tension et courant et de l'angle de déphasage tension-courant
```

```
for l=1:8;
```

```
    if (Vdata(l+16))==0;
```

```
        THD(l)=0;phi(l)=0;
```

```
    elseif (Vdata(l+16))==1;
```

```
        THD(l)=100*sqrt((eff(l)^2-effond(l)^2)/effond(l)^2);
```

```
        phi(l)=atan2(sm(l),cm(l));
```

```
    else
```

```
        disp('problème dans le calcul du THD et phi')
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Calcul des autres résultats : P, Q, S, D, phi, PF
```

```
for l=1:4;
```

```
    if (Vdata(l+16))==0 %Canaux en tension non échantillonnés
```

```
        phifond(l)=0;
```

```
        PF(l)=0;
```

```
        S(l)=0;
```

```
        Pfond(l)=0;
```

```
        Qfond(l)=0;
```

```
        D(l)=0;
```

```
    end;
```

```
    if (Vdata(l+16+4))==0; %Canaux en courant non échantillonnés
```

```
        phifond(l+4)=0;
```

```
        PF(l+4)=0;
```

```
        S(l+4)=0;
```

```
        Pfond(l+4)=0;
```

```
        Qfond(l+4)=0;
```

```
        D(l+4)=0;
```

```
    else
```

```
        phifond(l)=(phi(l)-phi(l+4)); %angle de déphasage tension-courant fondamental;
```

```
        phifond(l+4)=phifond(l);
```

```
        PF(l)=cos(phifond(l)); %Facteur de puissance tension courant fondamental
```

```
        PF(l+4)=cos(phifond(l));
```

```
        S(l)=eff(l)*eff(l+4); %Puissance apparente
```

```
        S(l+4)=S(l);
```

```
        Pfond(l)=effond(l)*effond(l+4)*cos(phifond(l)); %Puissance active fondamentale
```

```
        Pfond(l+4)=effond(l)*effond(l+4)*cos(phifond(l));
```

```
        Qfond(l)=effond(l)*effond(l+4)*sin(phifond(l)); %Puissance réactive fondamentale
```

```
        Qfond(l+4)=effond(l)*effond(l+4)*sin(phifond(l));
```

```
        D(l)=sqrt(S(l)^2-Pfond(l)^2-Qfond(l)^2); %Puissance de distorsion
```

```
        D(l+4)=sqrt(S(l)^2-Pfond(l)^2-Qfond(l)^2);
```

```
    end
```

```
end;
```

```
phi=phi*180/pi; %transformation de radians==>degrés
```

```
phifond=phifond*180/pi; %transformation de radians==>degrés
```

```
%Affichage des résultats
```

```
figure;
```

```
AXIS('off')
```

```

axis([0 8 0 9])
axis('ij')
text(1,0,' eff')
text(2,0,' THD')
text(3,0,' phi (°)')
text(4,0,' FP')
text(5,0,' S')
text(6,0,' P')
text(7,0,' Q')
text(8,0,' D')
text(0,1,'S1,V1')
text(0,2,'S1,I1')
text(0,3,'S1,V2')
text(0,4,'S1,I2')
text(0,5,'S1,V3')
text(0,6,'S1,I3')
text(0,7,'S1,V4')
text(0,8,'S1,I4')

for l=1:4;                                % Sorbier#1 V1,I1, V2,I2, V3,I3, V4,I4
    text1=num2str(eff(l));                % Tension
    text(1,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(eff(l+4));              % Courant
    text(1,(l*2),text1);

    text1=num2str(THD(l));
    text(2,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(THD(l+4));
    text(2,(l*2),text1);

    text1=num2str(phifond(l));
    text(3,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(phifond(l+4));
    text(3,(l*2),'');

    text1=num2str(PF(l));
    text(4,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(PF(l+4));
    text(4,(l*2),'');

    text1=num2str(S(l));
    text(5,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(S(l+4));
    text(5,(l*2),'');

    text1=num2str(Pfond(l));
    text(6,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(Pfond(l+4));
    text(6,(l*2),'');

    text1=num2str(Qfond(l));
    text(7,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(Qfond(l+4));
    text(7,(l*2),'');

```

```

    text1=num2str(D(l));
    text(8,(l*2-1),text1);
    text1=num2str(D(l+4));
    text(8,(l*2),");
end

%Pour la sauvegarde des résultats
rep=input('Voulez-vous sauvegarder la matrice des résultats? (o/n)', 's');
if rep=='o';
    %Création de la matrice des résultats

    for l=1:4;
        A((l*2-1),1)=eff(l);
        A((l*2),1)=eff(l+4);

        A((l*2-1),2)=THD(l);
        A((l*2),2)=THD(l+4);

        A((l*2-1),3)=phifond(l);
        A((l*2),3)=phifond(l+4);

        A((l*2-1),4)=PF(l);
        A((l*2),4)=PF(l+4);

        A((l*2-1),5)=S(l);
        A((l*2),5)=S(l+4);

        A((l*2-1),6)=Pfond(l);
        A((l*2),6)=Pfond(l+4);

        A((l*2-1),7)=Qfond(l);
        A((l*2),7)=Qfond(l+4);

        A((l*2-1),8)=D(l);
        A((l*2),8)=D(l+4);
    end

%Sauvegarde de la matrice des résultats
[file,path]=uiputfile('c:\psion\reponse.txt','Sauvegarde de la matrice des résultats');
fichier=[path,file];
clear path;clear file;
fid=fopen(fichier,'wt');
fprintf(fid,'Date: %g/%g/%g Heure : %g:%g\n\n',jour,mois,an,heure,minute); %imprime la date
                                                    comme entête du
                                                    fichier

fprintf(fid,'SORBIER \n\n');
fprintf(fid,'Canal Val. eff. THD Phi(°) PF S(VA) P(W) Q(VAR) D(VA)\n');
for l=1:8;
    if(round(l/2)==(l/2)) % nombre pair==> courant
        fprintf(fid,'Courant%1g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g\n',l/2,A(l,:));
    else;

```

```
fprintf(fid,'TENSION%1g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g %10g\n',(l+1)/2,A(l,:));
```

```
end;
```

```
end
```

```
end;
```

```
clear A;clear fichier;  
clear A;clear fichier;
```

ANNEXE D

D. Méthode itérative de simulation globale, codes de programmation

Cette annexe présente les codes de programmation développés pour la méthode itérative de simulation globale discutée au chapitre 7 de ce mémoire. Les fichiers nécessaires pour d'exécuter cette simulation sont :

init.m	Sous-système d'initialisation (fichier SIMULINK)
iter.m	Routine d'itération
modele.m	Second sous-système (fichier SIMULINK)
naming.m	Permet de renommer les variables pour la comparaison d'une itération à la suivante
plotin.m	Affichage des résultats de prog.m
plotin2.m	Affichage des résultats de progcomp.m
prog.m	Programme principal de simulation avec itérations
progcomp.m	Programme de simulation du système complet
sys1.m	Premier sous-système (Fichier SIMULINK)
syscompl.m	Système complet (fichier SIMULINK)

D.1 Fichier init.m - sous-système d'initialisation

Ce fichier est de type SIMULINK. Il permet la génération des vecteurs de courant et de tension initiaux. Le modèle utilisé est présenté à la figure D-1.

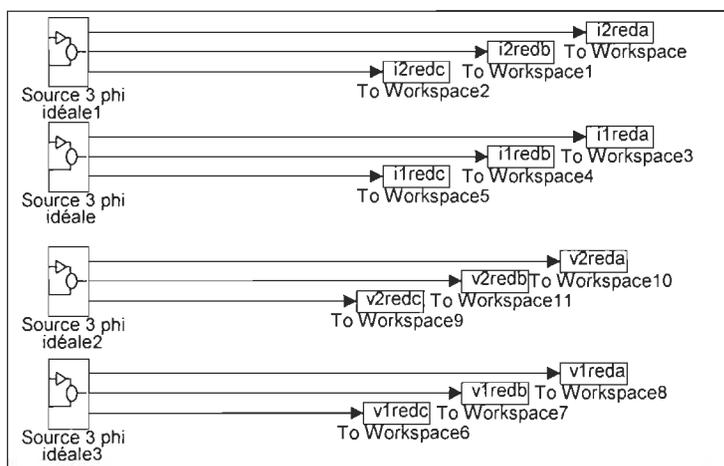


Figure D-1 Génération des vecteur initiaux - fichier init.m

D.2 Fichier iter.m - Routine d'itération

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Début de la routine d'itération          %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Premier fichier (fichier total sans redresseurs)

[T,x,y]=gear('sys1',[tinit,tfin],x0,[tolsys,psmnsys,psmxxsys]);
t1=T;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sauvegarde de certaines données sous d'autres noms      %
% afin de pouvoir les comparer avec les valeurs de      %
% l'itération suivante                                   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Deuxième fichier (fichier redresseurs seuls))

[T,z,w]=gear('modele',[tinit,tfin],x0,[tolmod,psmnmmod,psmxxmod]);
t2=T;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Affichage des données sur le courant et la tension      %
% pour que l'utilisateur décide d'arrêter la            %
% simulation ou continuer avec une autre itération      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Courant de la charge 1
subplot(4,1,1),plot(t2,i1reda,'-w',t2,i1reda0,'-y');title('ired1, précédent=jaune, 4e courbe=erreur');
subplot(4,1,2),plot(t2,i1redb,'-w',t2,i1redb0,'-y');
subplot(4,1,3),plot(t2,i1redc,'-w',t2,i1redc0,'-y');
subplot(4,1,4),plot(t2,(i1reda-i1reda0),'-w');zoom on;grid;

% Courant de la charge 2
figure(2);
subplot(4,1,1),plot(t2,i2reda,'-w',t2,i2reda0,'-y');title('ired2, précédent=jaune, 4e courbe=erreur');
subplot(4,1,2),plot(t2,i2redb,'-w',t2,i2redb0,'-y');
subplot(4,1,3),plot(t2,i2redc,'-w',t2,i2redc0,'-y');
subplot(4,1,4),plot(t2,(i2reda-i2reda0),'-w');zoom on;grid;

clc
disp('Les courbes présentées pour chaque fenêtre représentent les courants des trois phases des
redresseurs')
```

```

disp('Les courbes jaune représentent les valeurs précédentes')
disp('La quatrième courbe représente la différence entre les derniers résultats et les résultats précédents')
disp(' ')
disp('Il est possible d"effectuer un "zoom" sur la fenêtre de votre choix à l"aide de votre souris')
disp(' ')

```

D.3 Fichier modele.m - Second sous-système

Le modèle utilisé pour le second sous-système est présenté à la figure D-2. Il s'agit du système composé des convertisseurs de puissance, de leur transformateur et de leur charge.

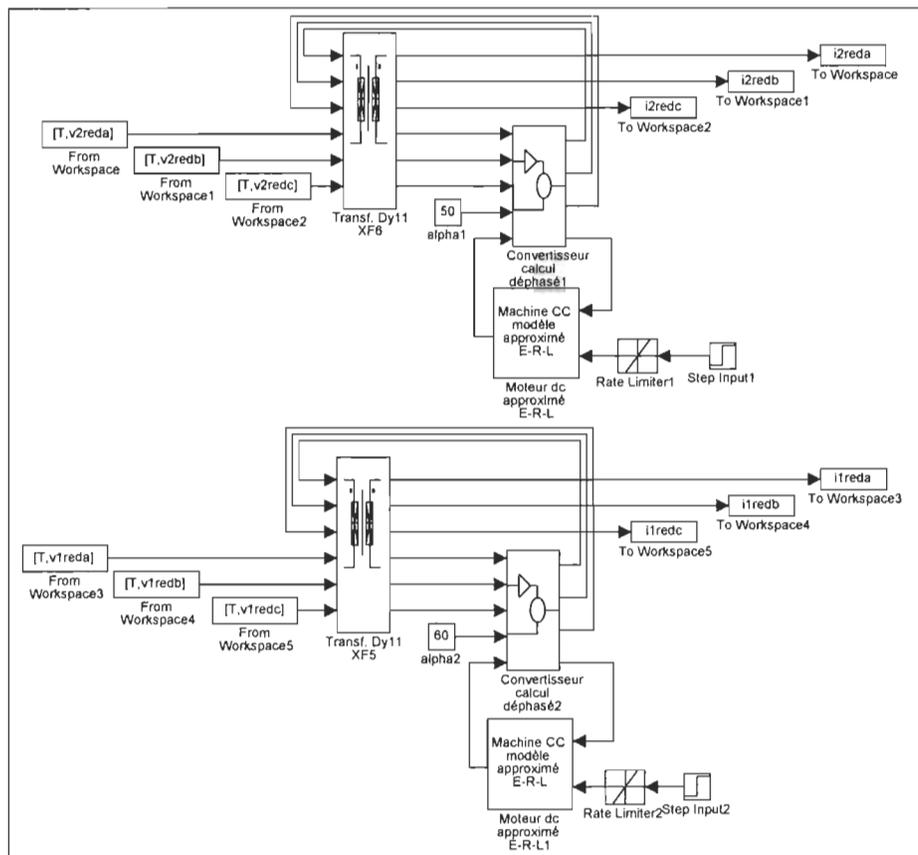


Figure D-2 Second sous-système - Fichier modele.m

D.4 Fichier naming.m - fichier de changement des noms des variables

```
i1reda0=i1reda;i1redb0=i1redb;i1redc0=i1redc;
i2reda0=i2reda;i2redb0=i2redb;i2redc0=i2redc;
v1reda0=v1reda;v1redb0=v1redb;v1redc0=v1redc;
v2reda0=v2reda;v2redb0=v2redb;v2redc0=v2redc;

v00=v0;
v01=v1;
v02=v2;
v03=v3;

isp0=isp;
iss0=iss;
ixf1p0=ixf1p;
ixf1s0=ixf1s;
ixf2p0=ixf2p;
ixf2s0=ixf2s;
ixf3p0=ixf3p;
ixf3s0=ixf3s;
i1lin0=i1lin;
i2lin0=i2lin;
```

D.5 Fichier plotin.m - Fichier d'affichage des résultats obtenus par prog.m

```
%%%%%%%%%%%%%%
%% Affichage des donnees pertinentes      %%
%%%%%%%%%%%%%%

t=T;
% Affichage des données

subplot(4,1,1),plot(t1,v0(:,1),'-w',t1,v00(:,1),'-y');title('V0, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v0(:,2),'-w',t1,v00(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v0(:,3),'-w',t1,v00(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v0(:,1)-v00(:,1)));grid;

% Tension de la charge 1
figure(2);
subplot(4,1,1),plot(t1,v1(:,1),'-w',t1,v01(:,1),'-y');title('V1, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v1(:,2),'-w',t1,v01(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v1(:,3),'-w',t1,v01(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v1(:,1)-v01(:,1)));grid;

% Courant de la charge 1
figure(3);
subplot(4,1,1),plot(t2,i1reda,'-w',t2,i1reda0,'-y');title('ired1, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t2,i1redb,'-w',t2,i1redb0,'-y');
subplot(4,1,3),plot(t2,i1redc,'-w',t2,i1redc0,'-y');
subplot(4,1,4),plot(t2,(i1reda-i1reda0));zoom;grid;
```

```

%Tension de la charge 2
figure(4);
subplot(4,1,1),plot(t1,v2(:,1),'-w',t1,v02(:,1),'-y');title('V2, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v2(:,2),'-w',t1,v02(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v2(:,3),'-w',t1,v02(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v2(:,1)-v02(:,1)));

% Courant de la charge 2
figure(5);
subplot(4,1,1),plot(t2,i2reda,'-w',t2,i2reda0,'-y');title('ired2, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t2,i2redb,'-w',t2,i2redb0,'-y');
subplot(4,1,3),plot(t2,i2redc,'-w',t2,i2redc0,'-y');
subplot(4,1,4),plot(t2,(i2reda-i2reda0));zoom;grid;

figure(6);
subplot(4,1,1),plot(t1,v3(:,1),'-w',t1,v03(:,1),'-y');title('V3, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v3(:,2),'-w',t1,v03(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v3(:,3),'-w',t1,v03(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v3(:,1)-v03(:,1)));grid;

figure (7);
subplot(4,1,1),plot(t1,isp(:,1),'-w',t1,isp0(:,1),'-y');title('isp, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,isp(:,2),'-w',t1,isp0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,isp(:,3),'-w',t1,isp0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(isp(:,1)-isp0(:,1)));grid;

figure (8);
subplot(4,1,1),plot(t1,iss(:,1),'-w',t1,iss0(:,1),'-y');title('iss, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,iss(:,2),'-w',t1,iss0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,iss(:,3),'-w',t1,iss0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(iss(:,1)-iss0(:,1)));grid;

figure (9);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf1p(:,1),'-w',t1,ixf1p0(:,1),'-y');title('ixf1p, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf1p(:,2),'-w',t1,ixf1p0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf1p(:,3),'-w',t1,ixf1p0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf1p(:,1)-ixf1p0(:,1)));grid;

figure (10);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf1s(:,1),'-w',t1,ixf1s0(:,1),'-y');title('ixf1s, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf1s(:,2),'-w',t1,ixf1s0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf1s(:,3),'-w',t1,ixf1s0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf1s(:,1)-ixf1s0(:,1)));grid;

figure (11);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf2p(:,1),'-w',t1,ixf2p0(:,1),'-y');title('ixf2p, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf2p(:,2),'-w',t1,ixf2p0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf2p(:,3),'-w',t1,ixf2p0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf2p(:,1)-ixf2p0(:,1)));grid;

figure (12);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf2s(:,1),'-w',t1,ixf2s0(:,1),'-y');title('ixf2s, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf2s(:,2),'-w',t1,ixf2s0(:,2),'-y');

```

```
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf2s(:,3),'-w',t1,ixf2s0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf2s(:,1)-ixf2s0(:,1)));grid;
```

figure (13);

```
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf3p(:,1),'-w',t1,ixf3p0(:,1),'-y');title('ixf3p, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf3p(:,2),'-w',t1,ixf3p0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf3p(:,3),'-w',t1,ixf3p0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf3p(:,1)-ixf3p0(:,1)));grid;
```

figure (14);

```
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf3s(:,1),'-w',t1,ixf3s0(:,1),'-y');title('ixf3s, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf3s(:,2),'-w',t1,ixf3s0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf3s(:,3),'-w',t1,ixf3s0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf3s(:,1)-ixf3s0(:,1)));grid;
```

figure (15);

```
subplot(4,1,1),plot(t1,i1lin(:,1),'-w',t1,i1lin0(:,1),'-y');title('i1lin, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,i1lin(:,2),'-w',t1,i1lin0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,i1lin(:,3),'-w',t1,i1lin0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(i1lin(:,1)-i1lin0(:,1)));grid;
```

figure (16);

```
subplot(4,1,1),plot(t1,i2lin(:,1),'-w',t1,i2lin0(:,1),'-y');title('i2lin, precedent = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,i2lin(:,2),'-w',t1,i2lin0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,i2lin(:,3),'-w',t1,i2lin0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(i2lin(:,1)-i2lin0(:,1)));grid;
```

D.6 Fichier plotin2.m - Fichier d'affichage des résultats obtenus par progcomp.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Affichage des donnees pertinentes avec comparaison des résultats avec itération %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Affichage des données
```

```
subplot(4,1,1),plot(t1,v0_cp(:,1),'-w',t1,v0(:,1),'-y');title('V0, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v0_cp(:,2),'-w',t1,v0(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v0_cp(:,3),'-w',t1,v0(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v0_cp(:,1)-v0(:,1)));grid;
```

figure (2);

```
subplot(4,1,1),plot(t1,v1_cp(:,1),'-w',t1,v1(:,1),'-y');title('V1, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v1_cp(:,2),'-w',t1,v1(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v1_cp(:,3),'-w',t1,v1(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v1_cp(:,1)-v1(:,1)));grid;
```

figure (3);

```
% Courant de la charge 1
subplot(4,1,1),plot(T,i1red_cp(:,1),'-w',T,i1reda,'-y');title('ired1, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(T,i1red_cp(:,2),'-w',T,i1redb,'-y');
subplot(4,1,3),plot(T,i1red_cp(:,3),'-w',T,i1redc,'-y');
subplot(4,1,4),plot(T,(i1red_cp(:,1)-i1reda));zoom;grid;
```

```

figure(4);
subplot(4,1,1),plot(t1,v2_cp(:,1),'-w',t1,v2(:,1),'-y');title('V2, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v2_cp(:,2),'-w',t1,v2(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v2_cp(:,3),'-w',t1,v2(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v2_cp(:,1)-v2(:,1)));

```

```

figure(5);
subplot(4,1,1),plot(T,i2red_cp(:,1),'-w',T,i2reda,'-y');title('ired2, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(T,i2red_cp(:,2),'-w',T,i2redb,'-y');
subplot(4,1,3),plot(T,i2red_cp(:,3),'-w',T,i2redc,'-y');
subplot(4,1,4),plot(T,(i2red_cp(:,1)-i2reda));zoom;grid;

```

```

figure(6);
subplot(4,1,1),plot(t1,v3_cp(:,1),'-w',t1,v3(:,1),'-y');title('V3, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,v3_cp(:,2),'-w',t1,v3(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,v3_cp(:,3),'-w',t1,v3(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(v3_cp(:,1)-v3(:,1)));grid;

```

```

figure (7);
subplot(4,1,1),plot(t1,isp_cp(:,1),'-w',t1,isp(:,1),'-y');title('isp, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,isp_cp(:,2),'-w',t1,isp(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,isp_cp(:,3),'-w',t1,isp(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(isp_cp(:,1)-isp(:,1)));grid;

```

```

figure (8);
subplot(4,1,1),plot(t1,iss_cp(:,1),'-w',t1,iss(:,1),'-y');title('iss, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,iss_cp(:,2),'-w',t1,iss(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,iss_cp(:,3),'-w',t1,iss(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(iss_cp(:,1)-iss(:,1)));grid;

```

```

figure (9);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf1p_cp(:,1),'-w',t1,ixf1p(:,1),'-y');title('ixf1p, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf1p_cp(:,2),'-w',t1,ixf1p(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf1p_cp(:,3),'-w',t1,ixf1p(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf1p_cp(:,1)-ixf1p(:,1)));grid;

```

```

figure (10);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf1s_cp(:,1),'-w',t1,ixf1s(:,1),'-y');title('ixf1s, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf1s_cp(:,2),'-w',t1,ixf1s(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf1s_cp(:,3),'-w',t1,ixf1s(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf1s_cp(:,1)-ixf1s(:,1)));grid;

```

```

figure (11);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf2p_cp(:,1),'-w',t1,ixf2p(:,1),'-y');title('ixf2p, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf2p_cp(:,2),'-w',t1,ixf2p(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf2p_cp(:,3),'-w',t1,ixf2p(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf2p_cp(:,1)-ixf2p(:,1)));grid;

```

```

figure (12);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf2s_cp(:,1),'-w',t1,ixf2s(:,1),'-y');title('ixf2s, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf2s_cp(:,2),'-w',t1,ixf2s(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf2s_cp(:,3),'-w',t1,ixf2s(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf2s_cp(:,1)-ixf2s(:,1)));grid;

```

```

figure (13);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf3p_cp(:,1),'-w',t1,ixf3p(:,1),'-y');title('ixf3p, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf3p_cp(:,2),'-w',t1,ixf3p(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf3p_cp(:,3),'-w',t1,ixf3p(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf3p_cp(:,1)-ixf3p(:,1)));grid;

```

```

figure (14);
subplot(4,1,1),plot(t1,ixf3s_cp(:,1),'-w',t1,ixf3s(:,1),'-y');title('ixf3s, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,ixf3s_cp(:,2),'-w',t1,ixf3s(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,ixf3s_cp(:,3),'-w',t1,ixf3s(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(ixf3s_cp(:,1)-ixf3s(:,1)));grid;

```

```

figure (15);
subplot(4,1,1),plot(t1,i1lin_cp(:,1),'-w',t1,i1lin(:,1),'-y');title('i1lin, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,i1lin_cp(:,2),'-w',t1,i1lin(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,i1lin_cp(:,3),'-w',t1,i1lin(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(i1lin_cp(:,1)-i1lin(:,1)));grid;

```

```

figure (16);
subplot(4,1,1),plot(t1,i2lin_cp(:,1),'-w',t1,i2lin(:,1),'-y');title('i2lin, système sans itération = jaune');
subplot(4,1,2),plot(t1,i2lin_cp(:,2),'-w',t1,i2lin(:,2),'-y');
subplot(4,1,3),plot(t1,i2lin_cp(:,3),'-w',t1,i2lin(:,3),'-y');
subplot(4,1,4),plot(t1,(i2lin_cp(:,1)-i2lin(:,1)));grid;

```

D.7 Fichier prog.m - programme principal de simulation avec itérations

```

% prog.m créé par Eric Le Courtois le 7/2/96
% pour M. Venkatachari Rajagopalan
% dans le cadre de la recherche SIMUBEEP

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ce programme fait l'automatisation de la %
% simulation d'un système comprenant 2 sous-systèmes. %
% Le premier sous-système (fichier sys.m) comprend le %
% système total sans le second sous-système %
% (fichier modele.m). Certaines données seront %
% échangées bidirectionnellement entre le premier et %
% le deuxième sous-système par l'entremise du %
% "workspace" (espace de travail de Matlab). %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Deux sous-routines sont appelées à partir de ce %
% programme (prog.m). Ces routines sont dans les %
% fichiers suivants : iter.m et naming.m %
% iter comprend la routine d'initialisation %
% naming.m permet de sauvegarder les résultats afin %
% de comparer les résultats présents avec les %
% précédents. %
% %
% Les fichiers nécessaires sont donc : %

```

```

%          prog.m          %
%          init.m         %
%          naming.m       %
%          iter.m         %
%          sys.m          %
%          modele.m       %
% et finalement plotin.m qui permet l'affichage final %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sauvegarde des données du workspace dans une %
% matrice appelée : %
% c:\matlab\temp.mat %
% pour ensuite pouvoir vider le workspace %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

save c:\matlab\temp.mat;
clear;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% initialisation %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x0=[];
z0=[];
a0=[];
b0=[];
i1reda=0;i1redb=0;i1redc=0;
i2reda=0;i2redb=0;i2redc=0;
i1reda0=0;i1redb0=0;i1redc0=0;
i2reda0=0;i2redb0=0;i2redc0=0;
v1reda=0;v1redb=0;v1redc=0;
v1reda0=0;v1redb0=0;v1redc0=0;
v2reda=0;v2redb=0;v2redc=0;
v2reda0=0;v2redb0=0;v2redc0=0;
v0=0;v1=0;v2=0;v3=0;
v00=0;v01=0;v02=0;v03=0;
isp=0;isp0=0;
iss=0;iss0=0;
ixf1p=0;ixf1p0=0;
ixf1s=0;ixf1s0=0;
ixf2p=0;ixf2p0=0;
ixf2s=0;ixf2s0=0;
ixf3p=0;ixf3p0=0;
ixf3s=0;ixf3s0=0;
i1lin=0;i1lin0=0;
i2lin=0;i2lin0=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Départ----- %
% Demande à l'utilisateur des différentes constante %
% pour le fonctionnement de la simulation. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%paramètres par défaut

```

```

tinit=0;
tfin=0.0334;
tolsys=1e-4; % Tolérance pour simulation fichier sys1.m
tolmod=1e-4; % Tolérance pour simulation fichier modele.m
pasmnsys=1e-4; %pas de calcul minimum simulation fichier sys1.m
pasmxsys=1e-4; %pas de calcul maximum simulation fichier sys1.m
pasmnmod=1e-4; %pas de calcul minimum simulation fichier modele.m
pasmxmod=1e-4; %pas de calcul maximum simulation fichier modele.m

%affichage des paramètres par défaut

disp('Les paramètres pour cette simulation sont : ')
disp('tolérance pour système total sans redresseurs: ');disp(tolsys)
disp('tolérance pour système redresseurs: ');disp(tolmod)
disp('temps initial : ');disp(tinit)
disp('temps final : ');disp(tfin)
disp('pas de calcul minimum pour système total sans redresseurs: ');disp(pasmnsys)
disp('pas de calcul maximum pour système total sans redresseurs: ');disp(pasmxsys)
disp('pas de calcul minimum pour système redresseurs: ');disp(pasmnmod)
disp('pas de calcul maximum pour système redresseurs: ');disp(pasmxmod)

flag=1;
while flag==1; % Pour s'assurer que la réponse à la question suivante soit strictement "o" ou "n"
    Q=input('Voulez-vous modifier les paramètres? (o/n) ','s');
    if Q=='o';
        disp('Vous n"avez qu"à presser "enter" si les valeurs par défaut sont acceptables')
        flag=0;
        tfin=input('temps final (0.0334): ');
        if tfin==[];
            tfin=0.0334;
        end;
        tolsys=input('tolérance à appliquer à la simulation du système total sans redresseurs (1e-4): ');
        if tolsys==[];
            tolsys=1e-4;
        end;
        tolmod=input('tolérance à appliquer à la simulation du système redresseurs (1e-4): ');
        if tolmod==[];
            tolmod=1e-4;
        end
        pasmnsys=input('pas minimum à appliquer à la simulation du système total sans redresseurs (1e-4): ');
        if pasmnsys==[]
            pasmnsys=1e-4;
        end
        pasmxsys=input('pas maximum à appliquer à la simulation du système total sans redresseurs (1e-4): ');
        if pasmxsys==[]
            pasmxsys=1e-4;
        end
        pasmnmod=input('pas minimum à appliquer à la simulation du système redresseurs (1e-4): ');
        if pasmnmod==[]

```



```

ans='o';
while ans=='o';
    temps=temps+cputime-temps0;
    clc
    flag=1;
    disp('Veuillez patienter, simulation en cours...')
    disp('Si vous appuyez sur CTRL-C, ceci se fait à vos risques...')
    naming
    iter
    temps0=cputime;

    while flag==1;
        ans=input('Voulez-vous refaire une autre itération ? (o/n)','s');
        if ans=='o'
            flag=0;
        elseif ans=='n'
            flag=0;
        else
            flag=1;
        end;
    end;
end;

%%%%%%%%%%
% Etape finale %
%%%%%%%%%%

disp('etape finale')

%%%%%%%%%%
%% Affichage des donnees pertinentes      %%
%%%%%%%%%%

aff=input('Voulez-vous afficher les différents résultats? (o/n) ','s');
if aff=='o';
    plotin
end

disp('temps d'utilisation du CPU');temps
end;

```

D.8 Fichier pcomp.m - programme de simulation du système complet

```

% prog.m créé par Eric Le Courtois le 7/2/96
% pour M. Venkatachari Rajagopalan
% dans le cadre de la recherche SIMUBEEP

%%%%%%%%%%
% Ce programme est réaliser pour la simulation du      %
% fichier syscompl.m et le calcul du temps de        %
% simulation de ce système. Ceci est réaliser dans    %
% but de comparer les résultats obtenus par          %

```

```

% simulation du système complet (syscompl.m) et du %
% système par itération (prog.m, sys.m, modele.m,...) %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sauvegarde des données du workspace dans une %
% matrice appelée : %
% c:\matlab\temp.mat %
% pour ensuite pouvoir vider le workspace %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

save c:\matlab\temp.mat;
clear;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% initialisation %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x0=[];
z0=[];
a0=[];
b0=[];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Départ----- %
% Demande à l'utilisateur des différentes constante %
% pour le fonctionnement de la simulation. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%paramètres par défaut

tinit=0;
tfin=0.0334;
tol=1e-4; % Tolérance pour simulation fichier syscompl.m
pasmn=1e-4; %pas de calcul minimum simulation fichier syscompl.m
pasmx=1e-4; %pas de calcul maximum simulation fichier syscompl.m

%affichage des paramètres par défaut

disp('Les paramètres pour cette simulation sont : ')
disp('tolérance pour système total : ');disp(tol)
disp('temps initial : ');disp(tinit)
disp('temps final : ');disp(tfin)
disp('pas de calcul minimum pour système total : ');disp(pasmn)
disp('pas de calcul maximum pour système total : ');disp(pasmx)

flag=1;
while flag==1; % Pour s'assurer que la réponse à la question suivante soit strictement "o" ou "n"
    Q=input('Voulez-vous modifier les paramètres? (o/n) ','s');
    if Q=='o';
        disp('Vous n"avez qu"à presser "enter" si les valeurs par défaut sont acceptables')
        flag=0;
        tfin=input('temps final (0.0334): ');
        if tfin==[];
            tfin=0.0334;
        end
    end
end

```

```

        end;
    tol=input('tolérance à appliquer à la simulation du système total (1e-4) : ');
    if tol==[];
        tol=1e-4;
    end;
    pasmn=input('pas minimum à appliquer à la simulation du système total (1e-4) : ');
    if pasmn==[]
        pasmn=1e-4;
    end
    pasmx=input('pas maximum à appliquer à la simulation du système total (1e-4) : ');
    if pasmx==[]
        pasmx=1e-4;
    end
end
elseif Q=='n';
    flag=0;
else
    flag=1;
end
end

% la commande cputime permet d'évaluer le temps de simulation
temps0=cputime;

[T,x,y]=gear('syscompl',[tinit,tfin],x0,[tol,pasmn,pasmx]);

temps2=cputime-temps0;

%%%%%%%%%%%%%%
%% Affichage des donnees pertinentes      %%
%%%%%%%%%%%%%%

plotin2

disp('temps d'utilisation du CPU');temps2

```

D.9 Fichier sys1.m - Premier sous-système

Ce fichier est un fichier de type SIMULINK. Il permet la simulation du premier sous-système qui est composé du système complet auquel on a remplacé les charges non linéaires par des sources de courant non linéaires équivalentes. Les figures D-2 à D-5 présentent ce sous-système.

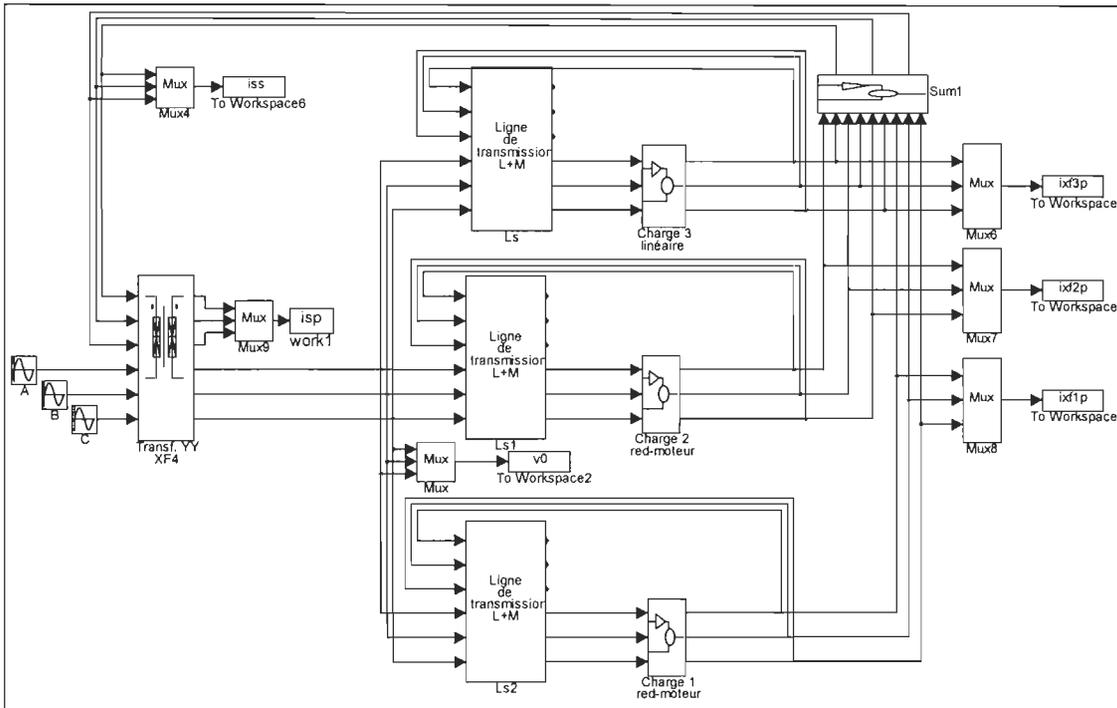


Figure D-3 Premier sous-système - fichier sys1.m

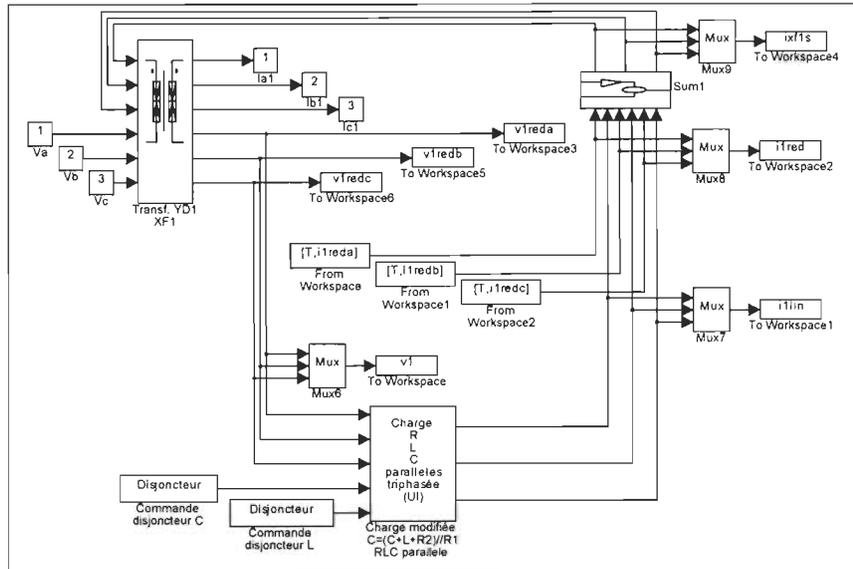


Figure D-4 Bloc de la charge 1 - fichier sys1.m

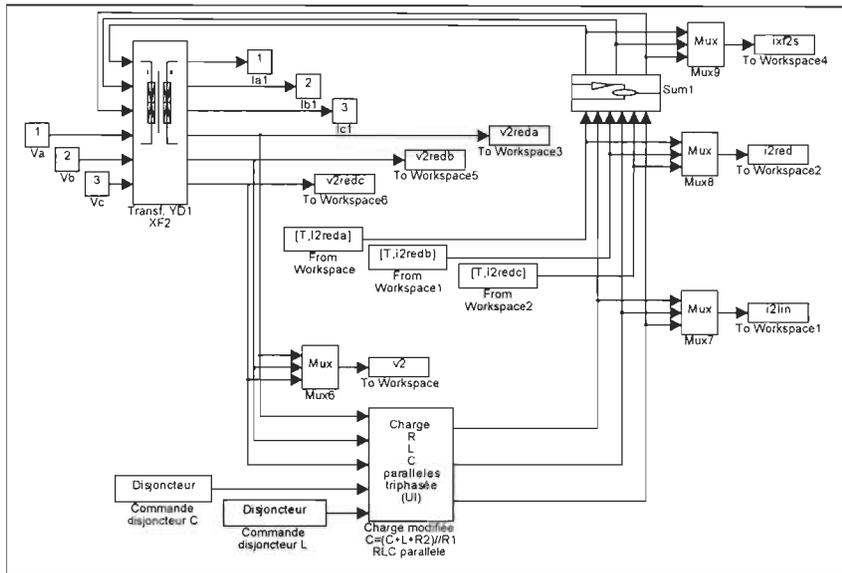


Figure D-5 Bloc de la charge 2 - fichier sys1.m

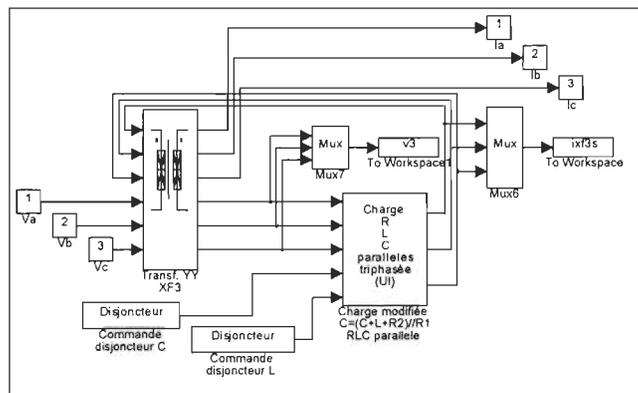


Figure D-6 Bloc de la charge 3 - fichier sys1.m

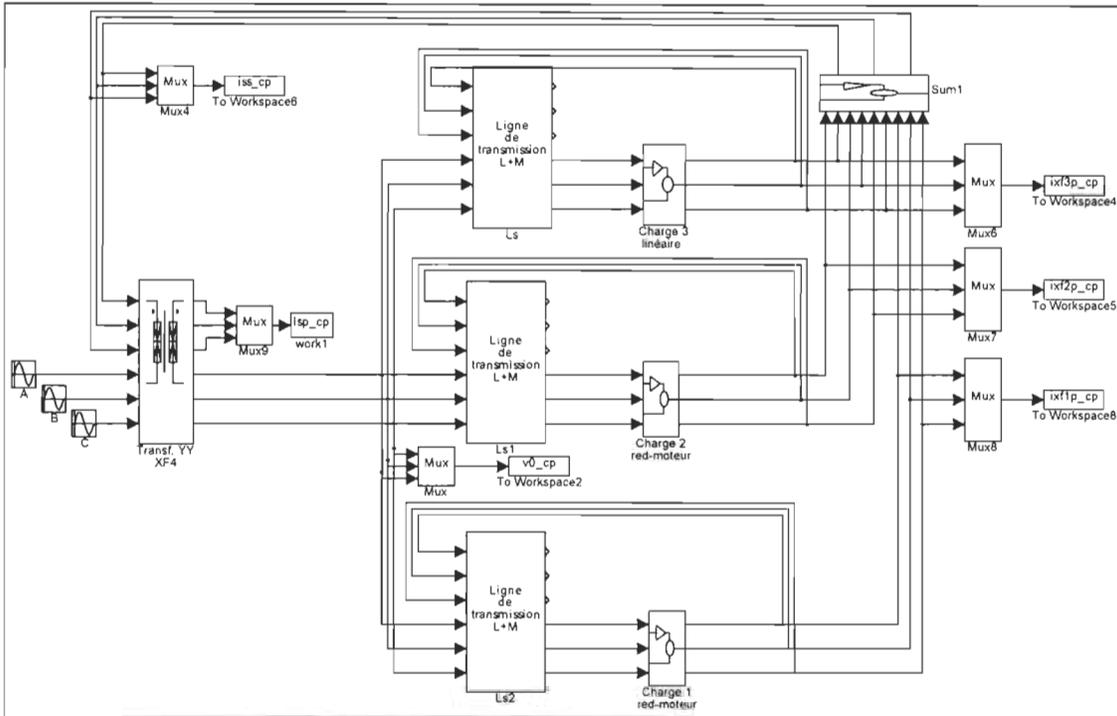


Figure D-7 Système complet - fichier syscompl.m

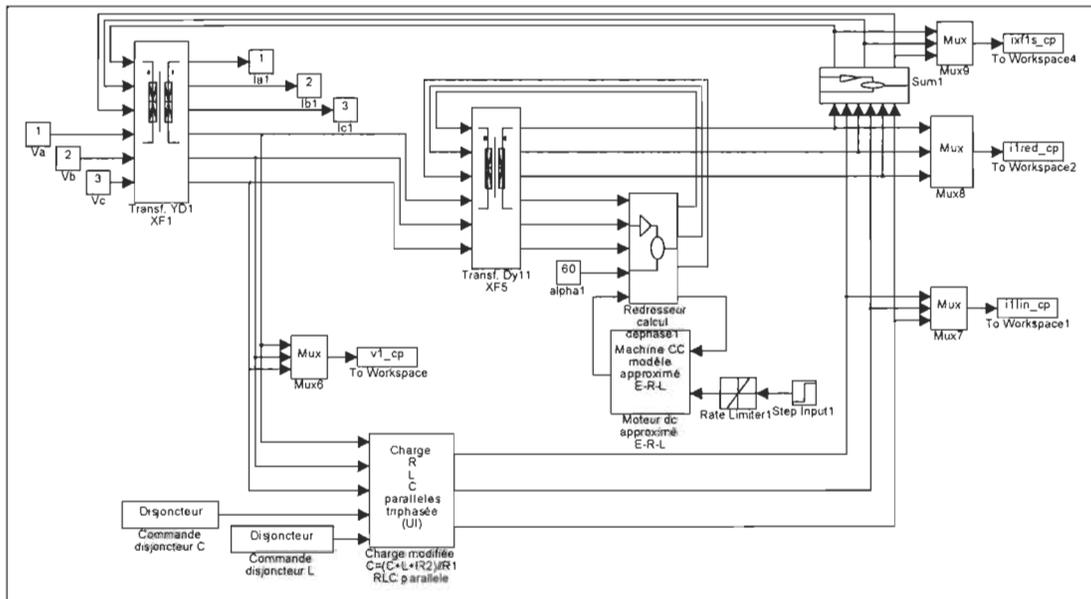


Figure D-8 Bloc Charge 1 - fichier syscompl.m

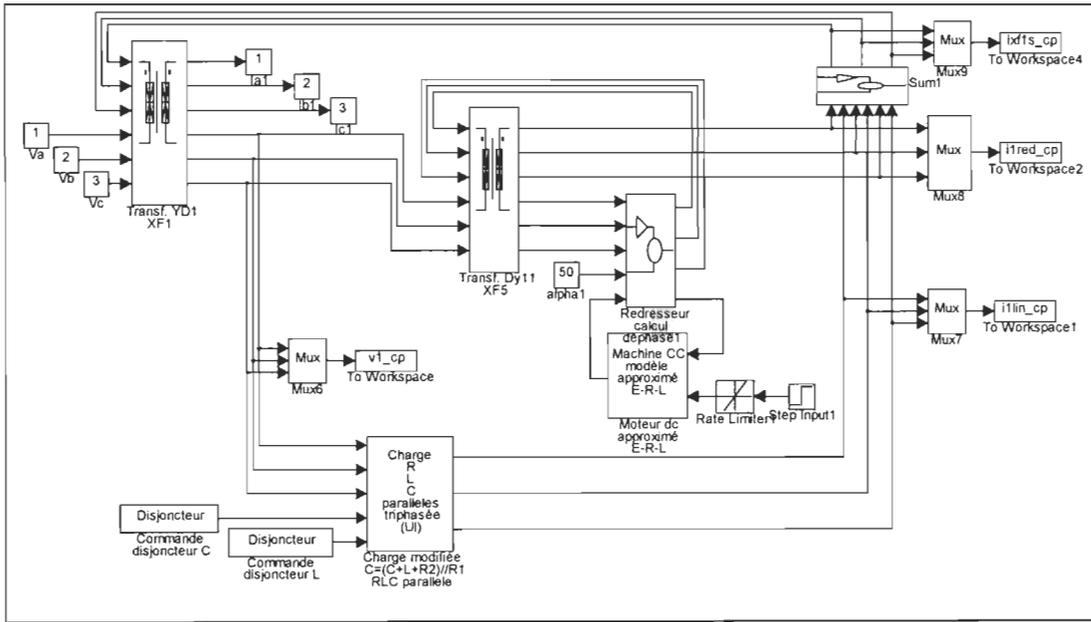


Figure D-9 Bloc Charge 2 - fichier syscompl.m

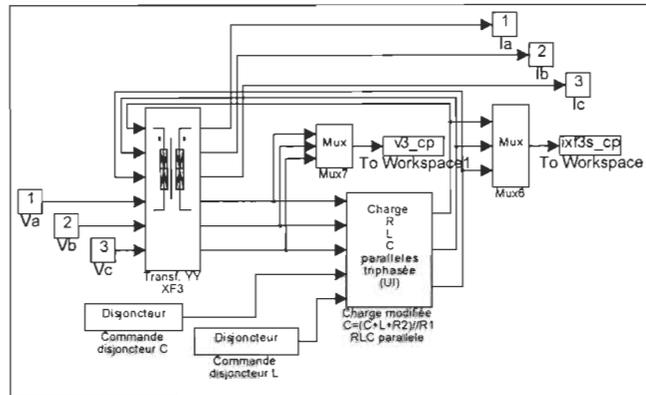


Figure D-10 Bloc charge 3 - fichier syscompl.m