50376
1989
43

N° d'ordre : 326

50376
1989
43

THÈSE

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

pour obtenir le titre de

DOCTEUR

Spécialité : Electronique

par

Patrick LIENART

Maître es Sciences

SUR LA COMMANDE RAPPROCHEE D'UNE CASCADE REVERSIBLE DE DEUX CONVERTISSEURS STATIQUES : MODELISATION ET REALISATION

Soutenue le 22 Mars 1989 devant le Jury

MM.	R.	PERRET	Président, Rapporteur
	C.	ROMBAUT	Rapporteur
	G.	MANESSE	Directeur du Travail
	P.	MATHYS	Examinateur
	C.	MAIZIERES	Examinateur
	J.P.	HAUTIER	Examinateur

A mes parents.

AVANT PROPOS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Systèmes Electromécaniques de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres-Artois, successivement dirigé par Messieurs les Professeurs C. MAIZIERES et G. MANESSE. Je leur témoigne toute ma reconnaissance pour l'excellent accueil qu'ils m'ont réservé et l'encouragement qu'ils m'ont apporté.

Que Monsieur le Professeur G. MANESSE trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour les conseils qu'ils m'a prodigués et l'enthousiasme avec lequel il a suivi ce travail, malgré ses nombreuses préoccupations au Conservatoire National des Arts et Métiers de PARIS.

Je remercie très vivement Monsieur le Professeur R. PERRET, de l'Institut National Polytechnique de Grenoble pour l'honneur qu'il me fait d'être à la fois Président du jury et Rapporteur.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur C. ROMBAUT pour la qualité de son enseignement, dispensé à l'Institut Industriel du Nord (I.D.N.) mais aussi pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être Rapporteur.

Je suis très heureux que Monsieur P. MATHYS, Maître de conférence à l'Université Libre de Bruxelles, porte intérêt à mes travaux et que de surcroît il ait bien voulu les examiner.

J'accorde toute ma gratitude à Monsieur J.P. HAUTIER, Maître assistant à l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Douai, pour avoir accepté de participer à ce jury en qualité d'Examinateur.

Je tiens également à remercier tous mes collègues du Laboratoire de Systémes Electromécaniques et plus particulièrement Messieurs P. DUMON, B. SEURE et J.J. FRANCHAUD pour leurs aide et conseils qui m'ont permis de mener à bien la réalisation du montage expérimental.

Mes remerciements vont également à ma soeur Nathalie qui a assuré, avec beaucoup de soin et de sérieux, la frappe et la présentation du texte.

Enfin, je ne saurais oublier mon épouse Véronique, qui m'a aidé dans la rédaction de ce mémoire et qui m'encouragea par sa compréhension et sa patience.

**** SOMMAIRE ****

Page

Introduction générale 1

CHAPITRE 1 : CHANGEUR DE FREQUENCE REVERSIBLE MONOPHASE

1- PRESENTATION DE LA STRUCTURE DE CONVERSION 5

2- ANALYSE FONCTIONNELLE 6
2.1 Détermination des différentes connexions possibles . 6
2.2 Choix de l'interrupteur - Notations 7
2.3 Configurations de fonctionnement 8

3- DESCRIPTION FONCTIONNELLE 11
3.1 Notion de classe de commande 11
3.2 Mise en oeuvre de la décomposition fonctionnelle ... 12
3.3 Réseaux de Pétri 15
3.3.1 Macroplace de classe de commande 15
3.3.2 Structure des macroplaces pour le pont d'entrée 18
a- Classe 0 18
b- Classe 2 19
3.3.3 Structure des macroplaces pour le pont de sortie 20
a- Classe 0 20
b- Classe 1 21
c- Classe 2 22

4- STRATEGIE DE COMMANDE 24
4.1 Affectation des fonctions de conversion 24
4.2 Commande du redresseur 24
4.3 Commande de l'onduleur 25

5- MODELE NUMERIQUE DU CONVERTISSEUR 29

6- RESULTATS 34

7- CONCLUSION 39

CHAPITRE 2 : ETUDE D'UN CHANGEUR DE FREQUENCE REVERSIBLE TRIPHASE - TRIPHASE

1- PRESENTATION DE LA CASCADE DE CONVERSION ETUDIEE 40

2- MODELISATION DE L'ONDULEUR TRIPHASE 42
2.1 Dénombrement des différentes connexions possibles
- Configurations de fonctionnement - 42
2.2 Description fonctionnelle 47
2.2.1 Notations et définitions des indices 47
2.2.2 Décomposition en classes de commande 48
2.2.3 Réseaux de Pétri 49
a- Réseau des Macroplaces 49
b- Macroplace [0 0 0] (Classe 0) 50
c- Macroplace [↑ 0 0] (Classe 1) 55
d- Macroplaces [↑ ↓ 0] et [↑↑ 0] (Classe 2) . 59
e- Macroplaces [↑ ↓ ↓] et [↑↑↑] (Classe 3) . 60
2.3 Modèle numérique de l'onduleur 62
2.4 Problèmes rencontrés 62
2.4.1 Alimentation monophasée 62
2.4.2 Traitement des inhibitions du temps 64
2.5 Résultats - Conclusion 66

3- MODELISATION DU REDRESSEUR SYNCHRONE 70
3.1 Description fonctionnelle 70
3.2 Réseau de Pétri - Expression de la tension redressée 70

4- IMPLANTATION SUR CALCULATEUR 71

5- PRESENTATION DES RESULTATS 73

6- FONCTIONNEMENT DU REDRESSEUR EN ONDULEUR NON AUTONOME ... 80

7- CONCLUSION 81

CHAPITRE 3 : ETUDE DE L'ENSEMBLE : CHANGEUR DE FREQUENCE - MOTEUR ASYNCHRONE

1- MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE 84
1.1 Hypothèses et notations principales 84
1.2 Equations générales 85
1.3 Transformation de Park 87
1.4 Simplification des équations en fonction du couplage et du mode d'alimentation 91
1.4.1 Couplage triangle, alimentation triphasée ... 91
1.4.2 << , alimentation monophasée .. 92
1.4.3 << , machine apparemment déconnectée 95
1.4.4 Couplage étoile 95
1.5 Equation mécanique 99
1.6 Résultats, validation 99
1.7 Conclusion 110

2- COMMANDE RAPPROCHEE DE L'ONDULEUR 111
2.1 Introduction, choix d'une stratégie 111
2.2 Description du modulateur 113
2.3 Principe de fonctionnement 115
2.4 Modèle numérique du modulateur 116
2.5 Résultats 124

3- CONCLUSION 128

CHAPITRE 4 : MISE EN OEUVRE DU SYSTEME DE CONTROLE
ET RESULTATS D'ENSEMBLE

1- ARCHITECTURE DE CONTROLE 130
1.1 Organisation générale 130
1.2 Partie commune 130
1.3 Commande rapprochée du redresseur 132
1.4 Commande rapprochée de l'onduleur 133
1.5 Dispositif de protection 136
1.5.1 Protection en courant 136
1.5.2 Controle des commandes de base 136

2- ORGANISATION DU LOGICIEL 138
2.1 Principe 138
2.2 Commande du modulateur 143

3- RESULTATS 147

4- CONCLUSION 158

Conclusion générale 159

**** SOMMAIRE ANNEXES ****

Page

ANNEXE 1 : OPTIMISATION DES FORMES D'ONDE POUR UN ONDULEUR MONOPHASE

1- INTRODUCTION A2

2- MISE EN EQUATIONS POUR UNE ONDE A DEUX NIVEAUX A2

3- METHODE NUMERIQUE DE RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS NON LINEAIRES A4

4- IMPLANTATION SUR CALCULATEUR A6
4.1 Adaptation de la méthode pour une onde à 2 ou 3 niveaux A6
4.2 Programme de calcul A7

5- RESULTATS A11

ANNEXE 2 : PROGRAMME DE SIMULATION DE L'ASSOCIATION : REDRESSEUR SYNCHRONE - ONDULEUR MONOPHASE (Structure en pont) Débit sur charge R-L-Em.SIN[θ] A13

ANNEXE 3 : PROGRAMMES de TRAITEMENT DE POINTS (TDP) et de TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE (TFR)

1- POSITION DU PROBLEME A31

2- PROGRAMME DE TRAITEMENT DE POINTS A32

3- PROGRAMME DE TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE A35

4- LISTING DU PROGRAMME DE TDP ASSOCIE A LA TFR A37

ANNEXE 4 : ALIMENTATION REVERSIBLE POUR MOTEUR A COURANT CONTINU

1- INTRODUCTION, POSITION DU PROBLEME A43

2- SOLUTION PROSOSEE A44

3- CONCLUSION A45

ANNEXE 5 : CARACTERISTIQUES GENERALES DU MODULATEUR HEF 4752 ..... A46

ANNEXE 6 : PROGRAMME EN LANGAGE ASSEMBLEUR et LOGICIEL DU 8085 (INTEL) A50

INTRODUCTION GENERALE

L'entraînement à vitesse variable dans une plage étendue a longtemps été réservé au moteur à courant continu, privilégié par ses performances dynamiques et la souplesse de sa commande. Aujourd'hui, dans de nombreuses applications, il cède sa place à l'association d'un convertisseur statique à un moteur asynchrone standard. En effet, cette machine particulièrement robuste et de construction très simple est généralement plus économique puisqu'elle n'exige pas de matériaux magnétiques spéciaux, ni de maintenance particulière. La commande du convertisseur est certes plus sophistiquée ; cependant, les progrès sans cesse grandissants, tant en électronique de puissance qu'en électronique de commande, tendent à réduire le surcoût de ces équipements et à mettre sur le marché des convertisseurs à la fois fiables et performants.

Si l'on écarte les GRADATEURS, pour lesquels la fréquence des tensions appliquées aux enroulements statoriques est fixe, et les CYCLOCONVERTISSEURS (généralement utilisés pour de fortes puissances) qui présentent cependant l'avantage de fonctionner en commutation naturelle mais qui, en revanche, n'autorisent pas des fréquences de sortie supérieures au tiers de la fréquence d'entrée, les convertisseurs utilisés dans les équipements à vitesse variable sont des convertisseurs indirects. Ils sont constitués d'un montage REDRESSEUR associé, par l'intermédiaire d'un filtre, à un montage ONDULEUR. Cette double conversion permet le réglage simultané de l'amplitude

et de la fréquence des tensions appliquées au moteur. Les montages diffèrent selon que la variation de tension est assurée par le montage redresseur ou par le montage onduleur.
Dans le premier cas, le redresseur délivre une tension modulée en amplitude qui, filtrée, est appliquée à l'onduleur. Le redresseur est soit entièrement commandé (thyristors), soit non commandé (diodes). Un HACHEUR est alors intercalé entre le redresseur et l'onduleur.
Dans le second cas, le redresseur est non commandé et l'étage onduleur assure seul, en modulant la largeur des impulsions de tension appliquées au moteur, la variation simultanée de l'amplitude et de la fréquence.

Pour ces structures indirectes, la nature (diodes ou thyristors) des interrupteurs du montage redresseur interdit sa réversibilité en courant. Lorsque la charge fonctionne en générateur, il convient donc d'aiguiller l'énergie fournie, soit vers le réseau par l'adjonction d'un second montage redresseur (fonctionnant en onduleur non autonome), soit vers un élément dissipateur généralement résistif. Ces artifices tendent naturellement à dégrader les performances dynamiques de la chaîne électromécanique, en raison du temps de réponse des dispositifs effectuant la nécessaire commutation de structure dans la chaîne de conversion statique.

C'est dans le but d'améliorer ces caractéristiques que diverses études ont été menées sur des structures directes ou indirectes bidirectionnelles.

Les solutions présentées (voir figure 0.1), dans le cas des structures directes, conduisent soit à des convertisseurs introduisant des commutations très dures à interrupteurs totalement contrôlés, soit à des commutations douces avec des interrupteurs uniquement contrôlés à la fermeture. Les performances obtenues sont alors satisfaisantes, mais onéreuses dans le premier cas, plus limitées mais beaucoup moins chères dans le second cas.

Les structures bidirectionnelles indirectes occupent un créneau intermédiaire si l'on simplifie la composition de l'interrupteur bidirectionnel du montage redresseur de tête. On arrive ainsi à la solution qui fait l'objet de ces travaux : les interrupteurs des deux montages ne font alors intervenir que des commutations parfaitement maîtrisées dans les équipements industriels.

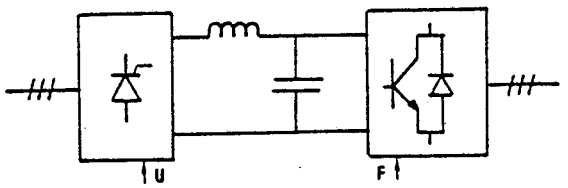
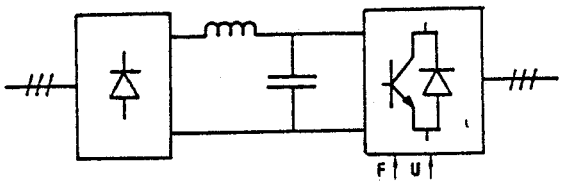
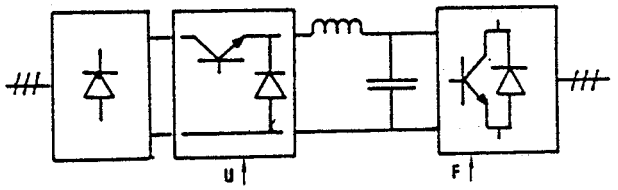
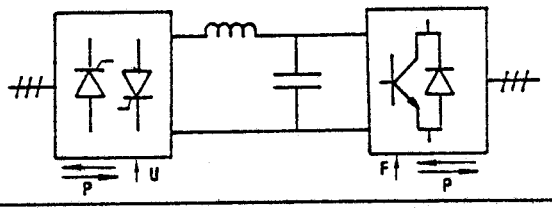
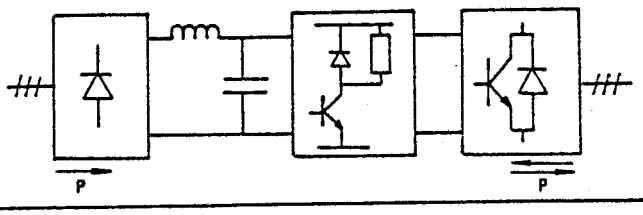
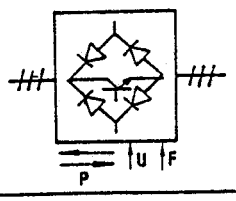
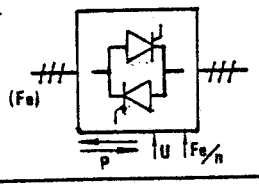
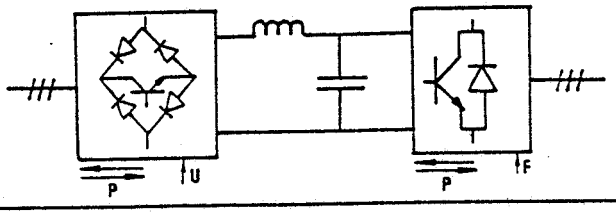
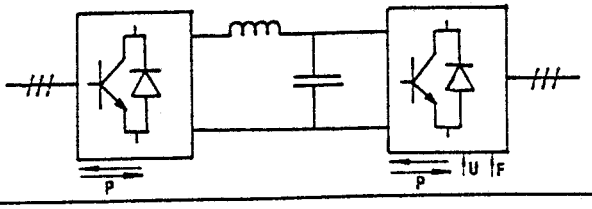
Ainsi dans une première approche, au chapitre 1, nous analysons le fonctionnement du changeur de fréquence lorsque celui-ci est constitué de deux montages monophasés. Cette structure simplifiée nous permet d'énoncer les principes de modélisation et de définir clairement un formalisme compatible avec toutes les stratégies de commande possibles des interrupteurs.

Au chapitre 2, cette modélisation est étendue au montage triphasé afin de montrer, par simulation numérique, la faisabilité de l'association envisagée.

Le chapitre 3 est consacré à l'établissement du programme de simulation globale de l'ensemble changeur de fréquence - moteur asynchrone. Pour cela, l'étude précédente est complétée d'une part, en lui adjoignant un modèle numérique du moteur (établi à partir de la transformation de Park au rotor) et d'autre part, en définissant les caractéristiques du modulateur de largeur d'impulsions assurant le contrôle rapproché de l'onduleur.

Dans le chapitre 4, nous décrivons la mise en oeuvre du système assurant le contrôle et la commande de cet ensemble. Les organisations matérielle et logicielle y sont successivement abordées. Divers relevés expérimentaux sont enfin comparés aux formes d'onde prédéterminées par ordinateur.

Figure 0.1 : Exemples de structures de convertisseur de fréquence

	Type de convertisseur	Schéma synoptique
STRUCTURES INDIRECTES NON REVERSIBLES	*Convertisseur de fréquence à Impulsions Modulées en Amplitude (P.A.M.) - Redresseur commandé*	
	Convertisseur de fréquence à Largeur d'Impulsions Modulée (P.W.M.) - Redresseur non commandé	
	Convertisseur de fréquence à Impulsions Modulées en Amplitude (P.A.M.) - Redresseur non commandé	
STRUCTURES INDIRECTES REVERSIBLES	*Convertisseur réversible par Onduleur de freinage (Energie renvoyée au réseau)*	
	Convertisseur réversible par Hacheur de freinage (Energie dissipée par effet Joule)	
STRUCTURES DIRECTES BIDIRECTIONNELLES	*Convertisseur Direct à 9 interrupteurs bidirectionnels totalement contrôlés /29/ /81/*	
	Diviseur de fréquence par gradateur /82/	
STRUCTURES INDIRECTES BIDIRECTIONNELLES	*Redresseur d'entrée à interrupteurs totalement contrôlés /30/ /31/*	
	Redresseur d'entrée à interrupteurs partiellement commandés	

CHAPITRE 1

CHANGEUR DE FREQUENCE REVERSIBLE MONOPHASE

Dans ce chapitre, nous analysons les diverses configurations d'un changeur de fréquence réversible assurant la connexion d'une source de tension monophasée à une source de courant de même type. La modélisation proposée de cette cascade de conversion est indépendante de la charge et de la stratégie de commande adoptée.

1 - PRESENTATION DE LA STRUCTURE DE CONVERSION

Le changeur de fréquence, dont le schéma de principe est représenté figure 1.1, permet l'échange de puissance entre deux sources monophasées de nature différente :

- une source de tension sinusoïdale de fréquence fixe (Fe) à l'entrée,

- un récepteur de courant, alimenté sous tension et fréquence (Fs) variables.

La conversion est assurée par la mise en cascade, à travers un filtre réactif (L_f, C_f), de deux convertisseurs en pont de structure identique, mais de fonction -définie par la séquence de commande des interrupteurs- différente.

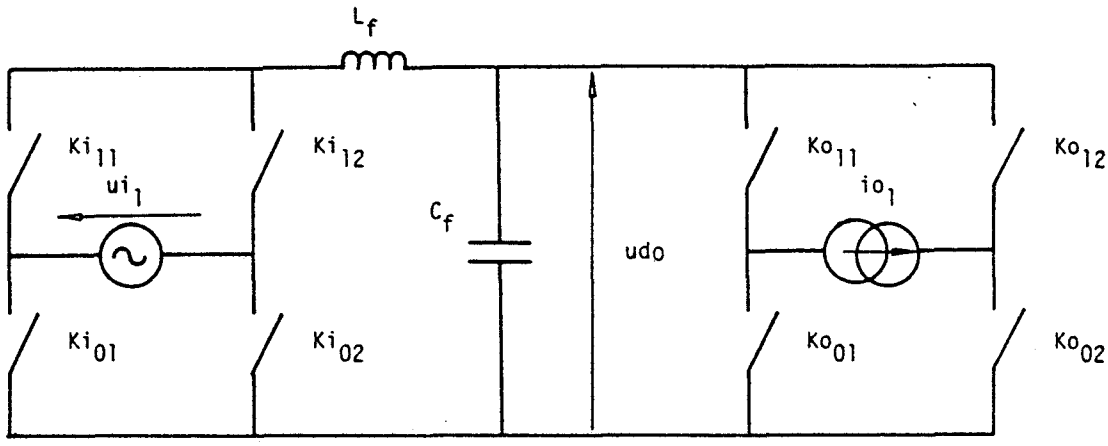


Figure 1.1 : Schéma de principe du changeur de fréquence

2 - ANALYSE FONCTIONNELLE

2.1. Détermination des différentes connexions possibles /1/

Les différentes connexions possibles entre la charge et le réseau d'alimentation sont déterminées afin de respecter la nature des sources en présence.
Ainsi, la source de tension à l'entrée du premier pont interdit la fermeture simultanée de deux interrupteurs d'un même groupe (Ki_{11}, Ki_{12}) ou (Ki_{01}, Ki_{02}) qui court-circuiterait celle-ci. De même, pour le pont de sortie, la continuité du courant dans la charge sera respectée, si deux interrupteurs appartenant à des branches différentes sont en permanence fermés. La fermeture des groupes d'interrupteurs (Ko_{11}, Ko_{12}) ou (Ko_{01}, Ko_{02}) isole la charge de la source de tension udo en la court-circuitant sur elle-même ; en revanche, l'alimentation de la charge ou la récupération d'énergie (si celle-ci est active) est obtenue par la fermeture de deux interrupteurs d'une même diagonale (Ko_{11}, Ko_{02}) ou (Ko_{12}, Ko_{01}).

2.2. Choix de l'interrupteur /2/ /3/ - Notations

Pour assurer un transfert d'énergie réversible et compte tenu du signe des tensions intermédiaires, le changeur de fréquence doit être constitué d'interrupteurs à semiconducteurs bidirectionnels en courant.

Pour cela, nous avons choisi l'association en antiparallèle d'un transistor et d'une diode (figure 1.2). Le montage ainsi défini est représenté par la figure 1.3 où sont explicitées les principales notations et conventions utilisées dans la suite de notre étude.

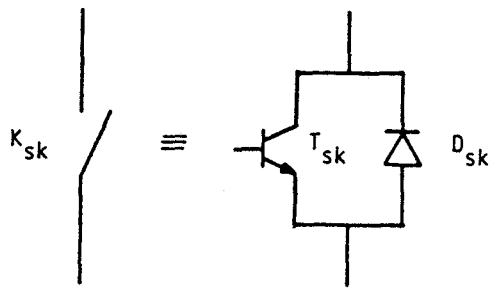


Figure 1.2 : Interrupteur bidirectionnel

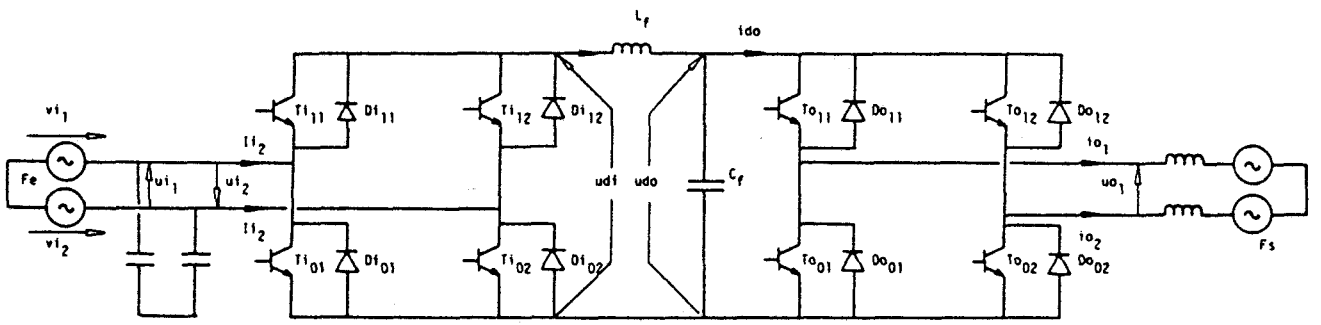


Figure 1.3 : Montage étudié

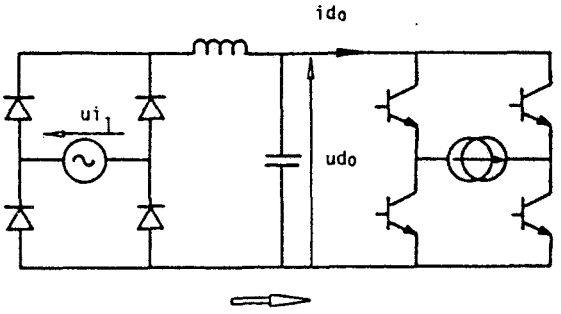
Chaque interrupteur possédera donc deux modes possibles de commutation :

- des commutations spontanées par extinction ou amorçage naturel de la diode,

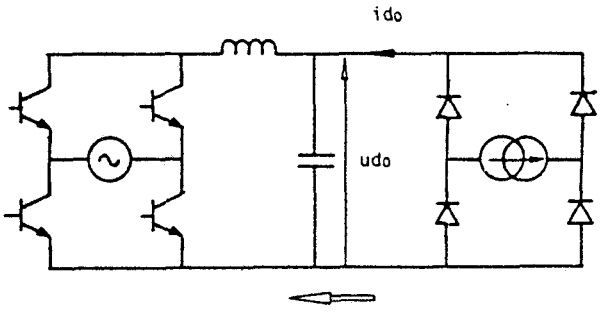
- des commutations commandées (amorçage ou blocage) par le transistor de l'interrupteur ou un transistor voisin.

Dans notre étude, les interrupteurs sont supposés idéaux et la commutation se traduit par un changement d'état simultané de deux composants.

Puisque la tension udo est unidirectionnelle, le signe du courant ido fixe le sens de transfert de puissance et la nature de l'élément conducteur (transistor ou diode). Ainsi, lorsque la source de tension ui_1 à l'entrée du montage est génératrice et la source de courant en sortie réceptrice, l'interconnexion des sources s'effectue par les diodes du premier pont et les transistors du second pont (figure 1.4 a) ; en revanche, lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la sortie vers l'entrée ce sont les transistors du premier pont et les diodes du second qui assurent la liaison (figure 1.4 b).



Transfert d'énergie Réseau ⇒ Charge
Figure 1.4a



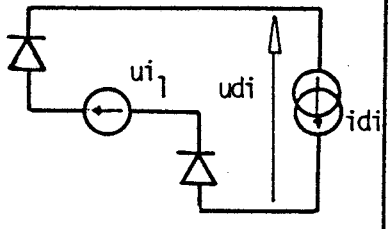
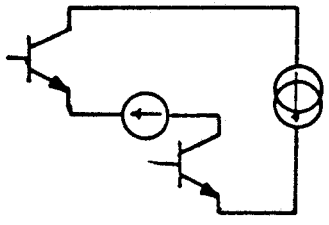
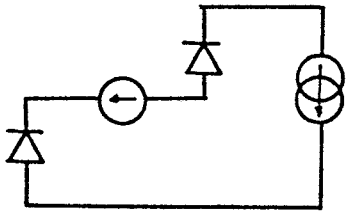
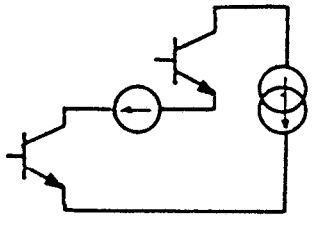
Transfert d'énergie Charge ⇒ Réseau
Figure 1.4b

2.3. Configurations de fonctionnement

L'analyse précédente montre qu'il existe finalement 5 configurations pour le pont d'entrée alors qu'il est possible d'en dénombrer 9 pour le pont de sortie. Les tableaux 1.5 et 1.6 regroupent ces différentes configurations et les grandeurs de sortie qui leur sont associées.

La détermination de la nature des éléments conducteurs s'effectue aisément en considérant le signe du courant de sortie, idi pour le premier pont et io_1 pour le second.

L'enchaînement de ces configurations dépendra à la fois de la stratégie de commande adoptée et de l'évolution des grandeurs électriques des deux montages.

Paire d'interrupteurs fermés	Signe du courant de sortie idi > 0	idi < 0	Tension de sortie
(Ki_{11}, Ki_{02})			$udi = ui_1$
(Ki_{12}, Ki_{01})			$udi = -ui_1$

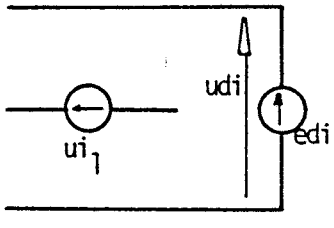
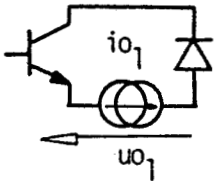
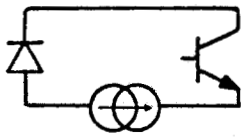
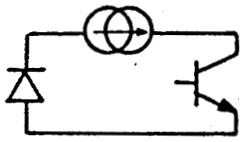
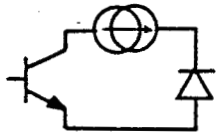
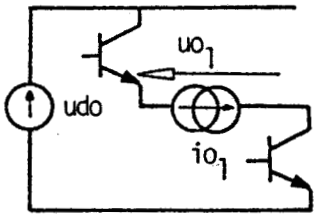
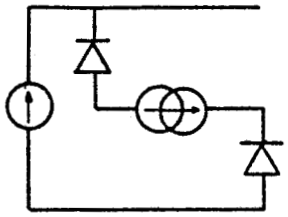
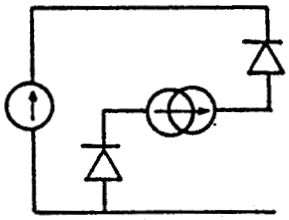
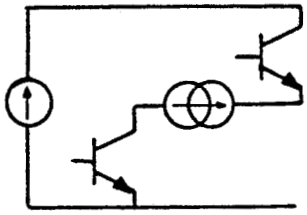
Paire d'interrupteurs fermés	idi = 0	Tension de sortie
(0 , 0)		udi = edi

Tableau 1.5 : Configurations du pont d'entrée

Paire d'interrupteurs fermés	Signe du courant de sortie $io_1>0$	$io_1<0$	Tension de sortie
(Ko_{11}, Ko_{12})			$uo_1 = 0$
(Ko_{01}, Ko_{02})			$uo_1 = 0$
(Ko_{11}, Ko_{02})			$uo_1 = udo$
(Ko_{12}, Ko_{01})			$uo_1 = -udo$

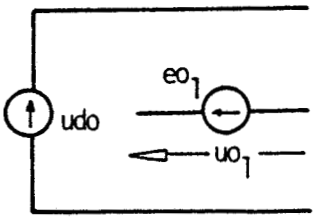
Paire d'interrupteurs fermés	$io_1 = 0$	Tension de sortie
(0 , 0)		$uo_1 = eo_1$

Tableau 1.6 : Configurations du pont de sortie

3 -DESCRIPTION FONCTIONNELLE

3.1. Notion de classe de commande /4/

La description fonctionnelle du montage proposé en vue d'une simulation numérique globale, peut s'effectuer au moyen de GRAFCET /5/ /6/ ou de RESEAU DE PETRI /7/ /8/.
Ces moyens de représentation habituellement utilisés pour les automatismes séquentiels s'implantent facilement ici puisque la description des séquences de conduction et de blocage des éléments s'exprime avec un formalisme voisin. Chaque semi-conducteur fonctionnant en commutation est en effet assimilé à un interrupteur ne présentant que deux états logiques 1 ou 0, selon qu'il est fermé ou ouvert /9/.

Une telle représentation permet l'analyse du montage et facilite la construction d'un modèle de simulation numérique.

Le graphe de fonctionnement peut être établi en associant à chaque configuration du convertisseur une place du graphe /10/. Cette démarche, applicable pour des ponts monophasés, devient plus difficile pour des structures triphasées, pour lesquelles le nombre de configurations augmente considérablement.

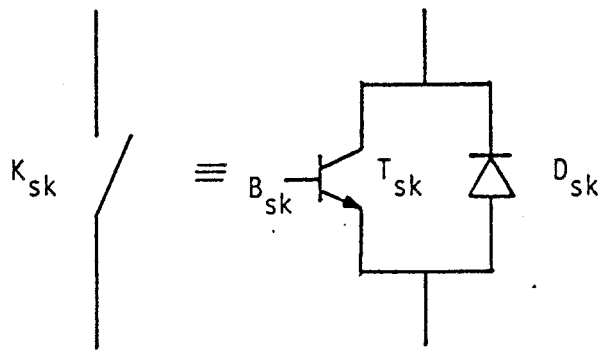
L'utilisation des symétries du montage ou la recherche d'une classification judicieuse simplifie en général la modélisation. Une décomposition branche par branche /11/ /12/, par exemple, évite de considérer le montage dans son intégralité et dispense d'un recensement préalable des configurations du système complet. Toutefois, cette description qui débouche sur un grafcet, donne lieu à des conditions d'évolution relativement complexes, dues à l'interdépendance des branches. Ces conditions sont en effet, à la fois fonction de l'état de la commande des branches voisines et de l'état électrique de la charge connectée à celles-ci.

La description retenue ici, repose sur une classification par nombre d'éléments commandés (transistors) indépendante de la conduction ou non de ce dernier. Elle est effectuée sans a priori sur le type de commande adoptée et donc sur la succession des séquences de fonctionnement. En revanche, la structure du convertisseur est supposée immuable et, de ce fait, l'analyse des différentes connexions possibles nous fournit les seules phases de fonctionnement envisageables dans le temps.
Il est donc possible de simuler la conséquence d'un défaut de commande sur un transistor (base inactive) ainsi que de l'évolution des grandeurs électriques suite à la mise en court-circuit de ce composant (base active en permanence).

3.2. Mise en oeuvre de la décomposition fonctionnelle

Avant de poursuivre l'étude, il convient d'expliciter les différents codages utilisés pour le découpage fonctionnel et la conception du modèle numérique.

Chaque interrupteur, affecté des indices s et k, est caractérisé par trois variables binaires B_{sk}, T_{sk}, D_{sk} précisant respectivement l'état de la commande, du transistor, et de la diode (figure 1.7) ; l'indice s désigne la position (supérieure ou inférieure) de l'interrupteur, la valeur de k précise le bras étudié.



avec : $s \in \{0,1\}$
$k \in \{1,2\}$

Figure 1.7 : Indiçage de l'interrupteur

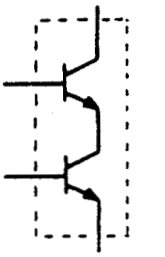
La commande de chaque branche s'exprime alors par le couple $(B_{sk},B_{s+1.k})$ qui prend ses valeurs dans l'ensemble $\{(0,0),(0,1),(1,0)\}$; la présence d'un générateur de tension élimine, comme nous l'avons vu, la configuration pour laquelle les interrupteurs d'une même branche sont fermés simultanément.

La commande d'un pont est donc totalement définie par le doublet $[\ (B_{sk},B_{s+1.k})\ ,\ (B_{s.k+1},B_{s+1.k+1})\ ]$ que l'on notera $\mathcal{C}$.

Ces notations se simplifient et deviennent plus représentatives si l'on caractérise le couple de valeurs binaires $(B_{sk},B_{s+1.k})$ par l'un des symboles suivants : $\{0,\uparrow,\downarrow\}$ (Tableau 1.8). Cette notation condensée permet un repérage aisé de la position du transistor commandé dans la branche k.

Dans une même classe de commande, le doublet $\mathcal{C}$ s'écrit différemment suivant les valeurs de s et k. Afin d'unifier la description, l'appartenance à une classe de commande sera toujours référencée par rapport au même doublet, appelé terme générateur /4 /.

1	0	0	B_{1k}
0	1	0	B_{0k}
(1,0)	(0,1)	(0,0)	(B_{1k},B_{0k})
↑	↓	0	



Branche k

Tableau 1.8 : Correspondance notation binaire - notation condensée

Les tableaux ci-dessous illustrent, comment à partir de ce terme générateur (choisi arbitrairement), en incrémentant s et k, il est possible de retrouver tous les autres doublets.

s \ k	1	2
1	[↑,↓]	[↓,↑]
0	[↓,↑]	[↑,↓]

$\mathcal{E} \in [\uparrow,\downarrow]$

s \ k	1	2
1	[↑,0]	[0,↑]
0	[↓,0]	[0,↓]

$\mathcal{E} \in [\uparrow,0]$

s \ k	1	2
1	[↑,↑]	[↑,↑]
0	[↓,↓]	[↓,↓]

$\mathcal{E} \in [\uparrow,\uparrow]$

Tableau 1.9 : Différents doublets de commande

En conclusion, la description du pont d'entrée se décompose en deux classes de commande :

- classe 0, Aucun transistor commandé,
  de terme générateur [0,0]
- classe 2, Deux transistors commandés,
  de terme générateur [↑,↓]

et celle du pont de sortie se scinde en trois classes :

- classe 0, Aucun transistor commandé,
  de terme générateur [0,0]
- classe 1, Un transistor commandé,
  de terme générateur [↑,0]
- classe 2, Deux transistors commandés,
  de terme générateur [↑,↓] ou [↑,↑]

Les indices s et k sont également employés dans la notation des tensions et courants. La figure 1.10 précise les conventions de signe adoptées pour la branche k. La variable binaire s permet de changer le signe de la grandeur électrique considérée.

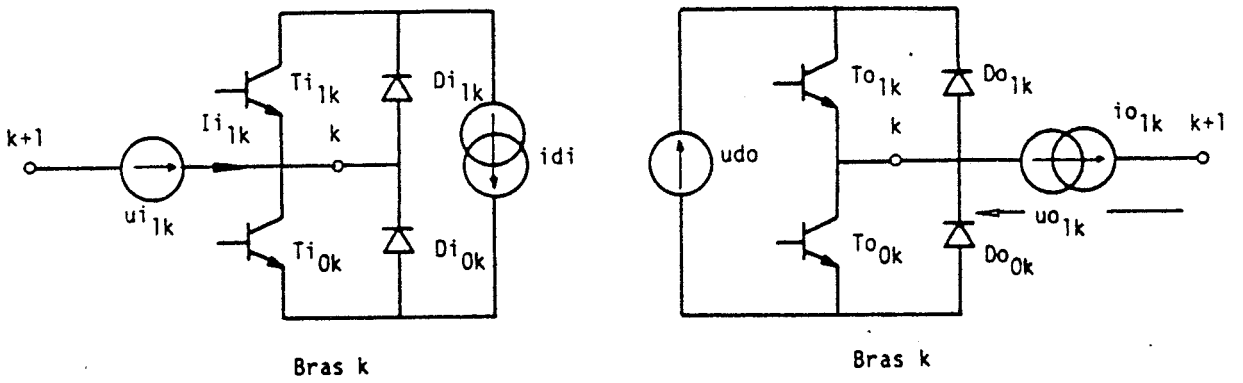


Figure 1.10 : Conventions de signe

L'état des composants, des commandes de base, des tensions et courants peut ainsi être caractérisé par un terme représentant à lui seul une matrice de dimension 2x2 dont les composantes sont obtenues en faisant varier les indices s et k :

$$- \text{Tension}\left[u_{sk}\right] = \left[(2.s-1).u(k)\right] = \begin{bmatrix} +u(1) & +u(2) \\ -u(1) & -u(2) \end{bmatrix}$$

$$- \text{Courant}\left[i_{sk}\right] = \left[(2.s-1).i(k)\right] = \begin{bmatrix} +i(1) & +i(2) \\ -i(1) & -i(2) \end{bmatrix}$$

$$- \text{Commande de base}\left[B_{sk}\right] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{01} & B_{02} \end{bmatrix}$$

De prime abord, ce formalisme paraît complexe, voire déroutant ; cependant il s'avère nécessaire lorsqu'une résolution numérique du système étudié est envisagée. Il permet entre autres de n'étudier qu'une configuration génératrice indicée en s et k, le programme choisissant lui-même la valeur de ces deux indices selon la commande adoptée.

La valeur des indices s et k de chaque pont étant totalement indépendante, en toute rigueur, il conviendrait de différencier ceux-ci en employant par exemple les notations suivantes : si , ki pour le pont d'entrée et so , ko pour le pont de sortie. Ce repère supplémentaire présentant l'inconvénient d'alourdir l'écriture, nous l'abandonnons.

3.3. Réseaux de Pétri

Chaque convertisseur est décrit séparément au moyen de différents réseaux de Pétri.

Un premier graphe, dit graphe de commande, définit les matrices de commande de base $[Bi_{sk}]$ et $[Bo_{sk}]$ pour les transistors du premier et du second pont. Il conditionne leur évolution au cours du temps.

Un second graphe gère le passage entre les différentes classes de commande du montage. Il est, en fait, formé de plusieurs MACROPLACES /13/ /14/ dont l'accès est déterminé par le nombre de transistors commandés représenté ici par le doublet de commande correspondant : $\mathcal{C}_i$ ou $\mathcal{C}_o$.

Enfin, un graphe est associé à chaque macroplace ; il en détaille la structure et permet le calcul des grandeurs électriques du montage. Chacune de ses places est décrite à partir du terme générateur ; ce sont donc les valeurs de s et k qui permettront de connaître la configuration exacte du montage.

3.3.1 Macroplaces de classe de commande

Le réseau des Macroplaces, pour chaque convertisseur, (figure 1.11a et 1.11b) fait clairement apparaître le découpage par la commande énoncé au paragraphe 3.2.

A partir d'une place de choix (Ec), le doublet $\mathcal{C}$ oriente le pointeur vers l'une des classes ; ce pointeur restera dans la Macroplace jusqu'à ce qu'il y ait changement de commande ($\Delta\mathcal{C}=1$).

L'étude de chaque macroplace est développée dans les sous paragraphes ci-après. Le graphe de chacune d'elle est bâti sur un même modèle. Il comprend : une place d'entrée (E) active lorsque la condition sur le doublet de commande est vérifiée, une place de sortie (S) active dès qu'une modification de commande est détectée ($\Delta\mathcal{C}=1$) et, des places intermédiaires représentant l'état de fonctionnement du convertisseur.
Sur chaque réseau, figurent les réceptivités d'accès et de sortie de la macroplace ; les réceptivités "internes" (afférentes aux places intermédiaires) sont, quant à elles, élaborées dans un tableau qui précise pour chaque place :

- Les conditions d'accès à partir de la place d'attente Ec,
- Le repère de la place concernée ainsi que la valeur du pointeur,

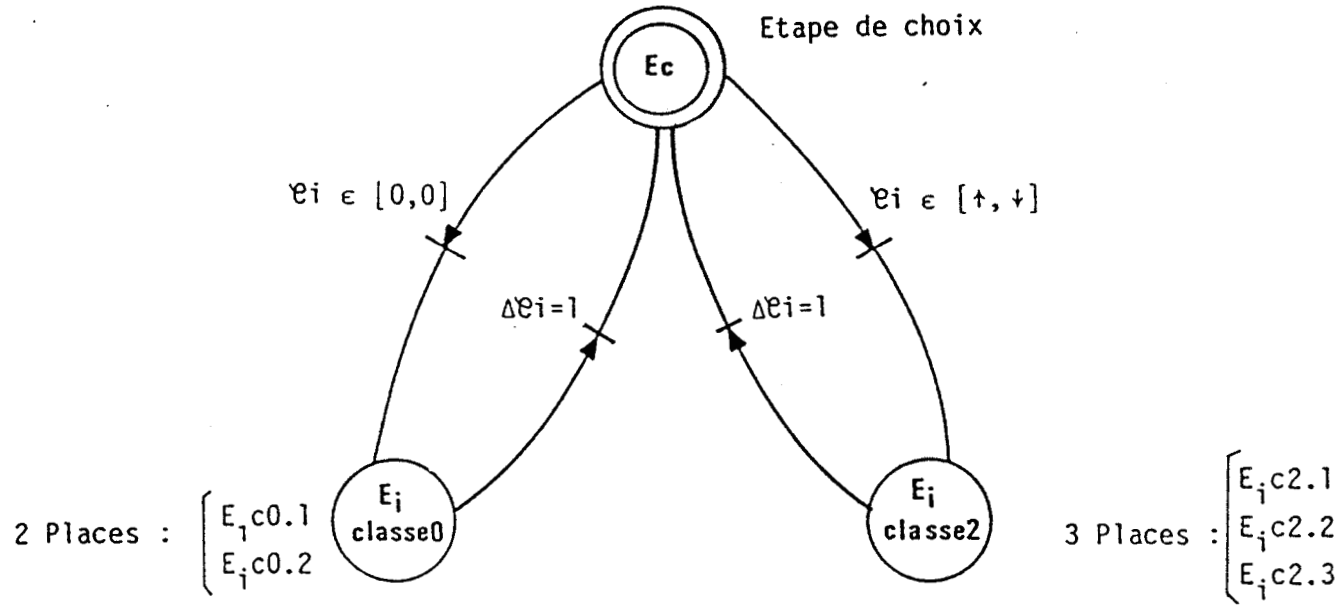


Figure 1.11a
Macroplaces de classes de commande (entrée)

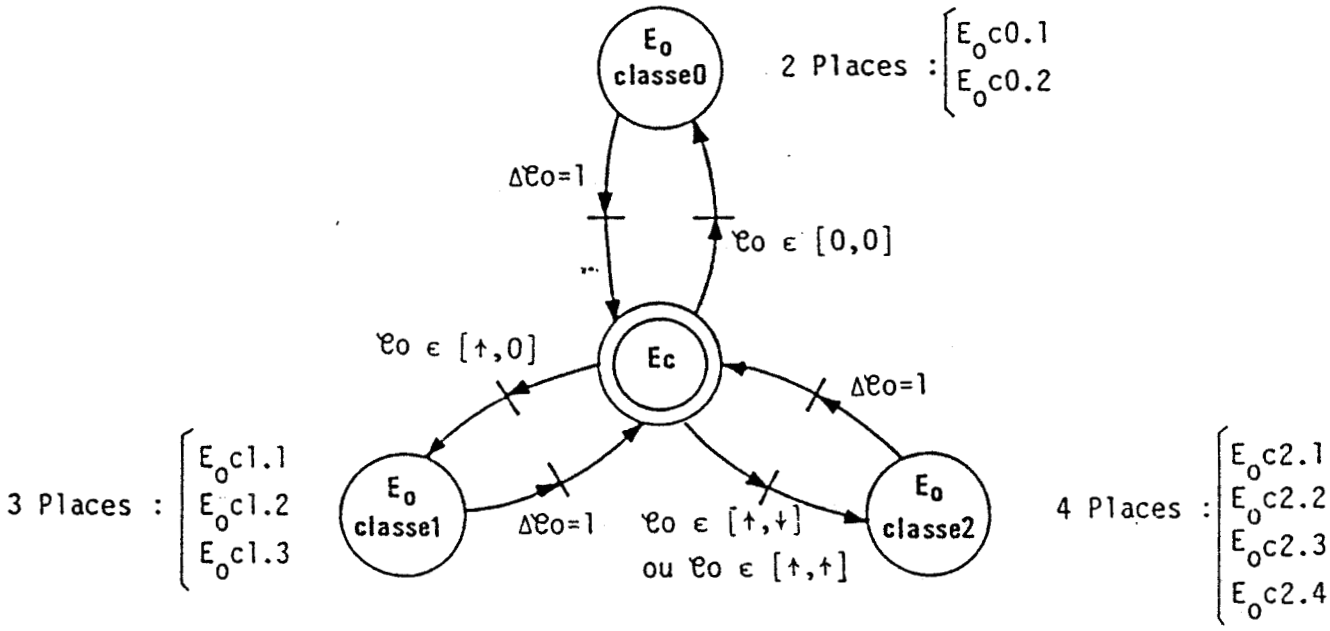
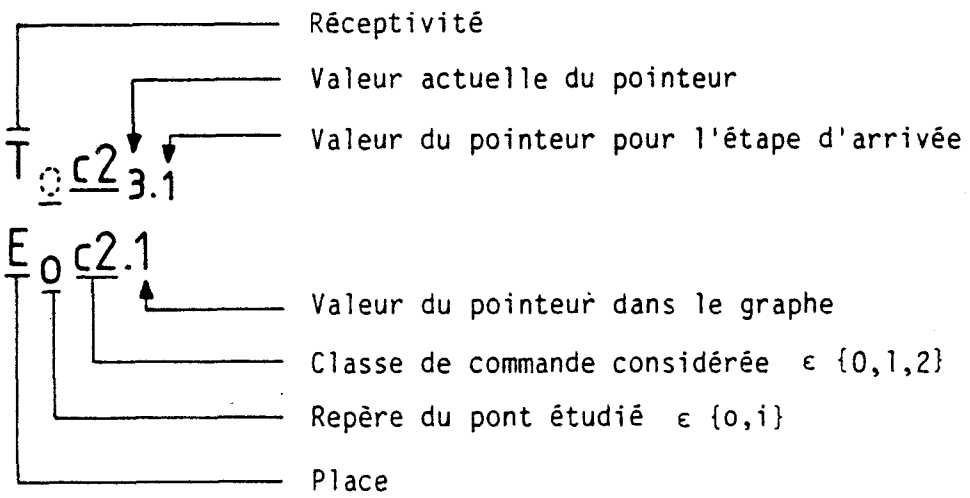


Figure 1.11b
Macroplaces de classes de commande (sortie)

- Le schéma conduisant à l'ensemble des configurations associées,
- La tension de sortie,
- Les réceptivités de sortie et la place associée lorsque celles-ci sont validées.

Les indices des réceptivités et places sont définis comme sur l'exemple ci-dessous :



Lorsque le courant en sortie du pont est nul, aucun composant ne conduit ; la réceptivité de sortie, dans ce cas, est déterminée au moyen du principe de superposition des sources (contribution de la source d'entrée, contribution de la source de sortie de convertisseur) en considérant que chaque interrupteur bidirectionnel présente une même impédance trés élevée.

Une variable notée br permet de parcourir tout le domaine de variation de l'indice k, ici : {1,2} . Les opérations sur cette variable ainsi que sur l'indice k, sont effectuées modulo 2 comme définies dans le tableau suivant :

k	1	2
k1	2	1

s	0	1
s1	1	0

avec $k1 = (k) \text{ MOD } 2 + 1$

$s1 = \overline{s}$

Tableau 1.12

3.3.2. Structure des macroplaces pour le pont d'entrée

3.3.2.a Classe 0 (Aucun transistor commandé)

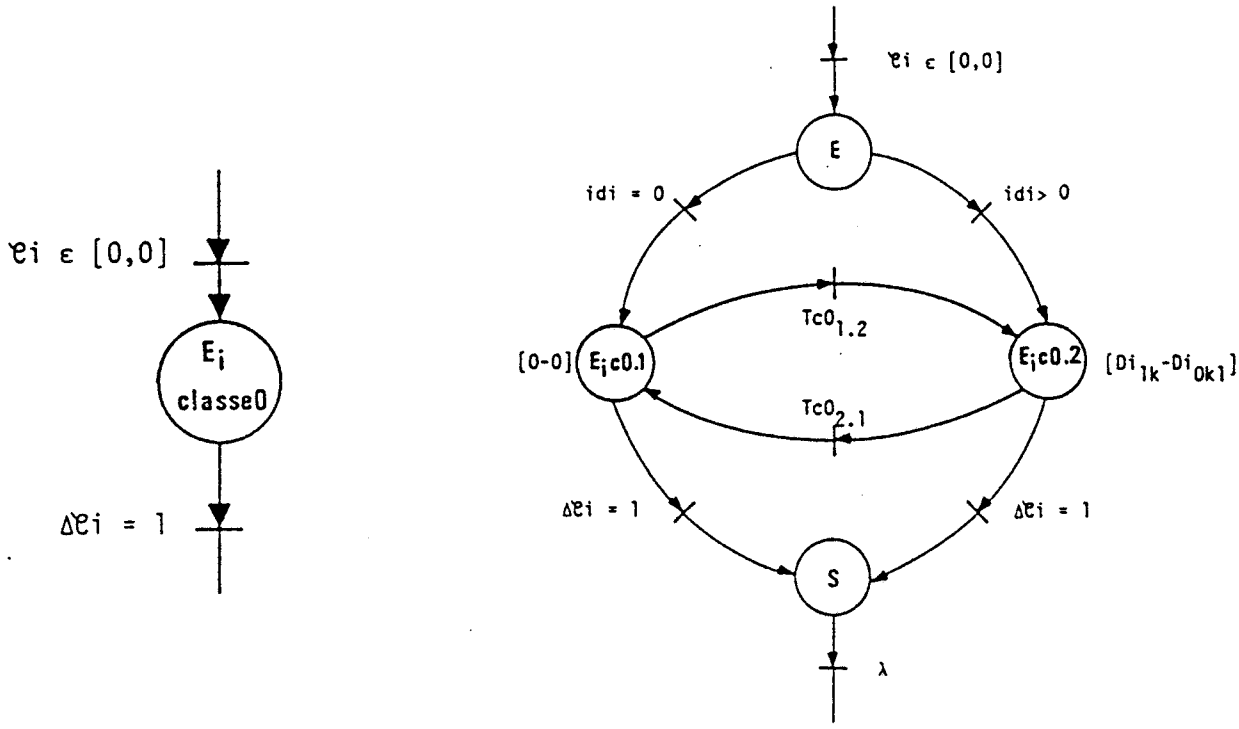


Figure 1.13 : Macroplace classe 0

RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE POINTEUR	GENERATEURS DE CONFIGURATION	TENSION DE SORTIE	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACE DE SORTIE
ℰi ε [0,0] & idi = 0	$E_i c0.1$ $Pc_i 0 = 1$	udi, edi, ui_{1k}	udi = edi	ui(br) - edi = 0 ↓ (k ↓br)	$E_i c0.2$
ℰi ε [0,0] & idi > 0	$E_i c0.2$ $Pc_i 0 = 2$	idi, ui_{1k}, Di_{1k}, Di_{0k1}	udi = ui_{1k}	idi = 0↓	$E_i c0.1$
				ui_{1k1} >= 0 & idi> 0 (k ↓br)	$E_i c0.2$

Tableau 1.14

3.3.2.b Classe 2 (Deux transistors commandés)

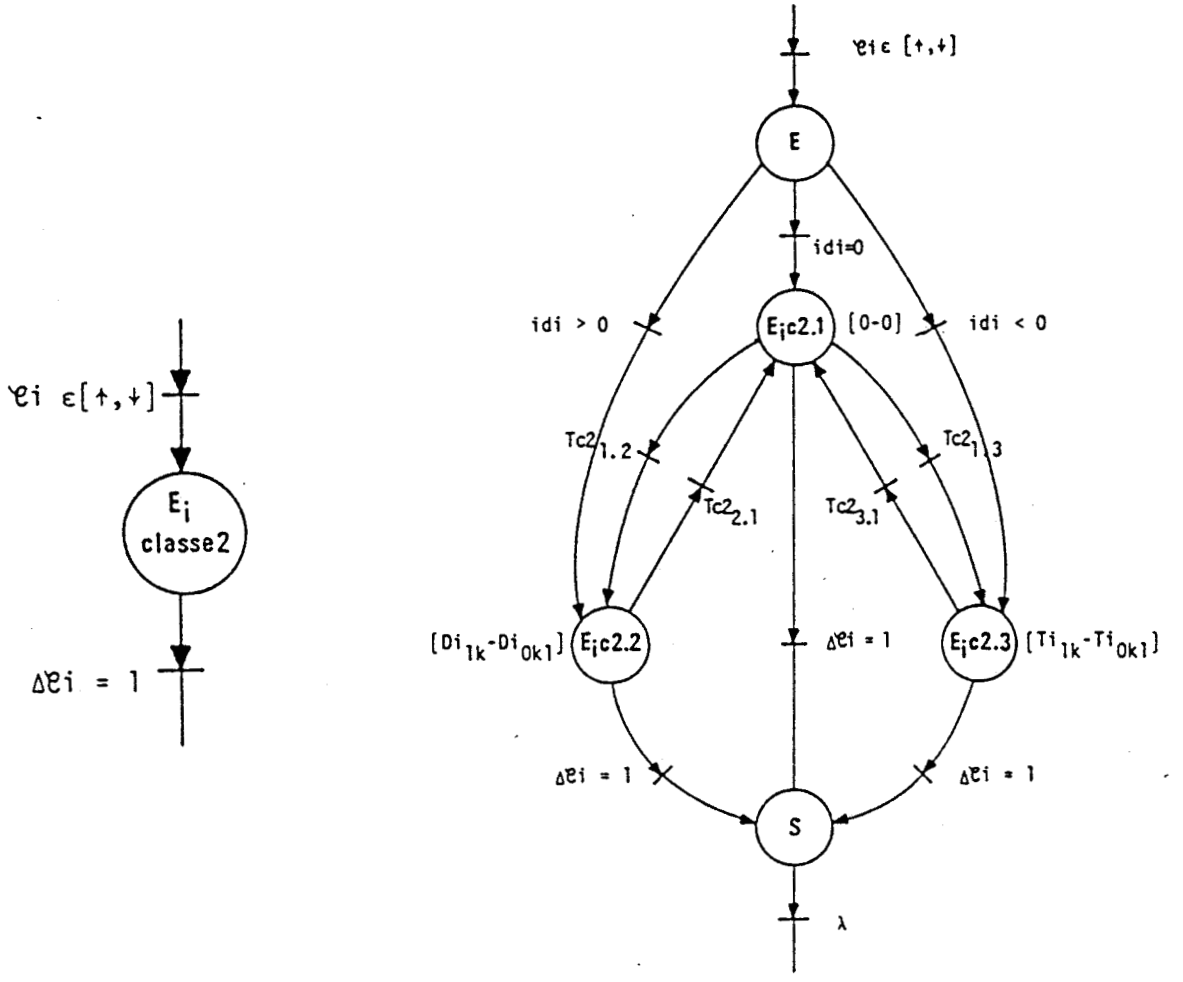


Figure 1.15 : Macroplace classe 2

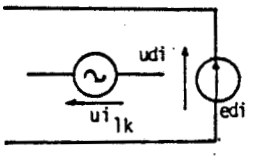
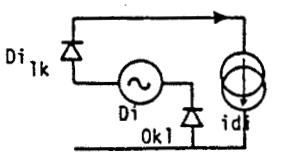
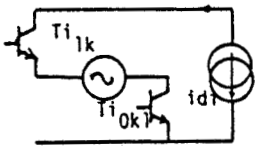
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE POINTEUR	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSION DE SORTIE	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACE DE SORTIE
ℰi ε [↑,↓] & idi = 0	$E_I c2.1$ $Pc_i 2 = 1$		udi = edi	ui(br) - udi = 0+ (k←br)	$E_i c2.2$
				$Bi_{1br} \cdot Bi_{0br} = 1$ & ui(br) - udi < 0 (k ←br)	$E_i c2.3$
ℰi ε [↑,↓] & idi > 0	$E_i c2.2$ $Pc_i 2 = 2$		$udi = ui_{1k}$	idi > 0 & $ui_{1kl} = 0+$ (k←kl)	$E_i c2.2$
				$Bi_{1k} \cdot Bi_{0kl} = 1$ & idi < 0	$E_i c2.3$
				$Bi_{1kl} \cdot Bi_{0k} = 1$ & idi < 0 & $ui_{1kl} < 0$ (k ←kl)	$E_i c2.3$
ℰi ε [↑,↓] & idi < 0	$E_i c2.3$ $Pc_i 2 = 3$		$udi = ui_{1k}$	idi = 0+	$E_i c2.1$
				$Bi_{1kl} \cdot Bi_{0k} = 1$ & idi < 0 & $ui_{1kl} < 0$ (k ←kl)	$E_i c2.3$

Tableau 1.16

3.3.3. Structure des macroplaces pour le pont de sortie

3.3.3.a Classe 0 (Aucun transistor commandé)

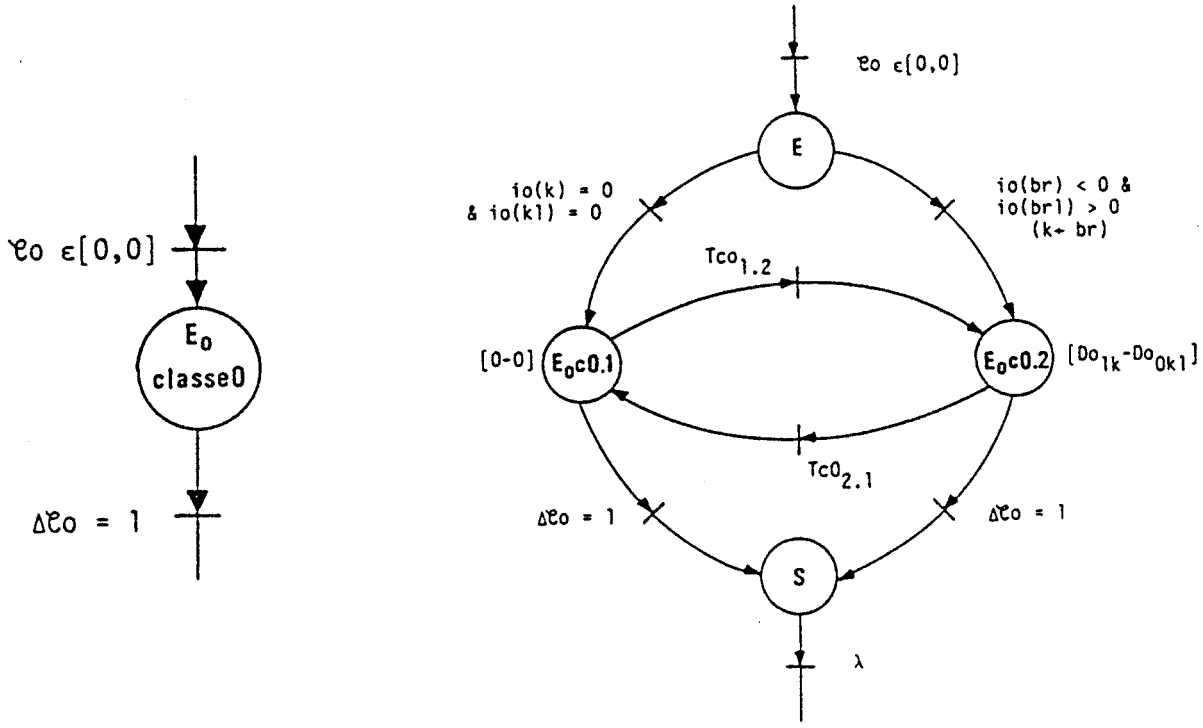


Figure 1.17 : Macroplace classe 0

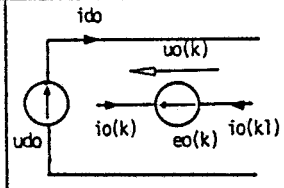
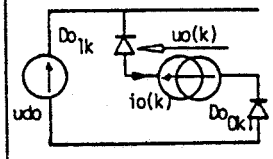
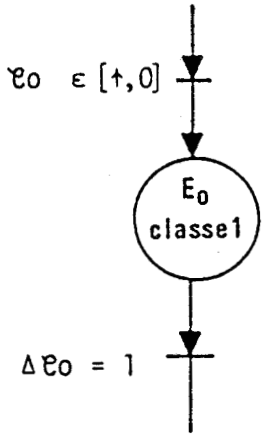
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE POINTEUR	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSION DE SORTIE	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACE DE SORTIE
ℰo ε [0,0] & (io(k)=0 io(kl)=0)	$E_0c0.1$ $Pc_0 0 = 1$		$[uo_{sk}] = [eo_{sk}]$ $[io_{sk}] = [0]$	eo(br) - udo = 0+ (k +br)	$E_0c0.2$
ℰo ε [0,0] & (io(br) <0 io(brl) >0) (k +br)	$E_0c0.2$ $Pc_0 0 = 2$		uo(k) = udo uo(kl)= -udo	io(k) = -io(kl) = 0+	$E_0c0.1$

Tableau 1.18

3.3.3.b Classe 1 (Un transistor commandé)



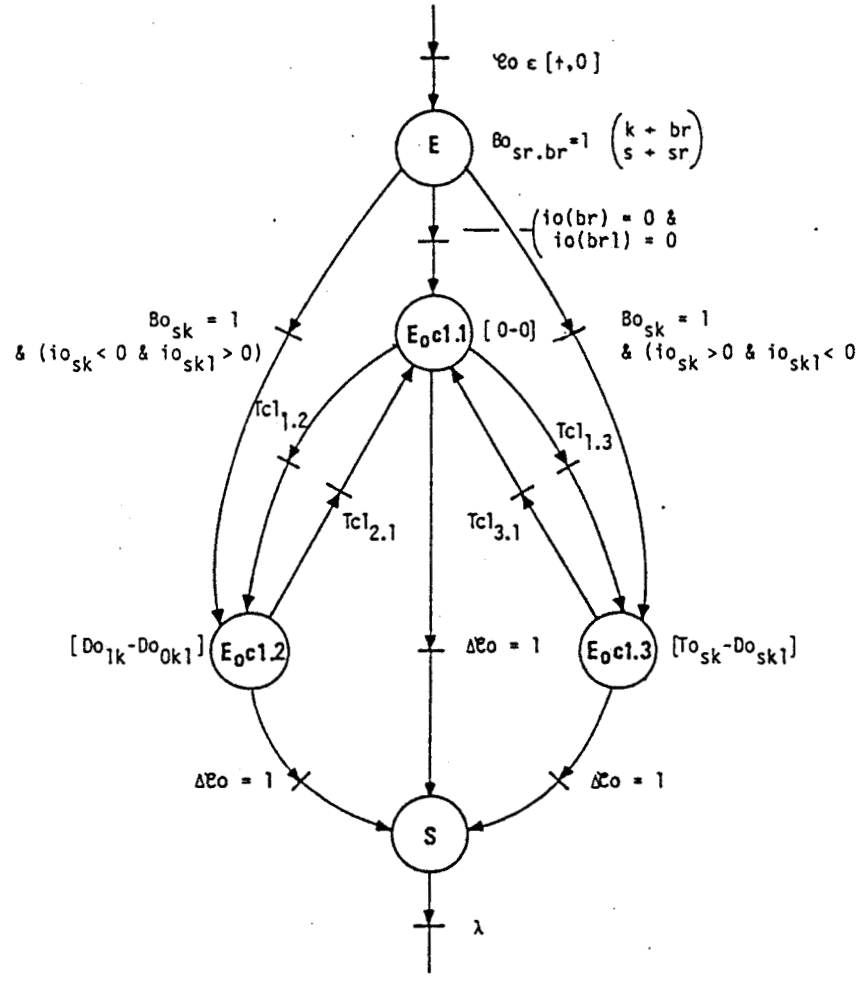


Figure 1.19 :
Macroplace classe 1

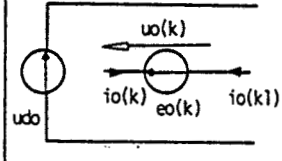
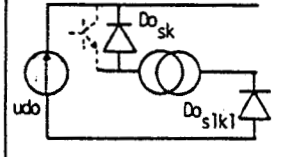
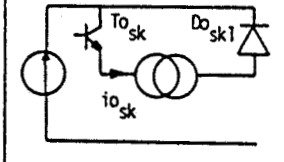
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE POINTEUR	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSION DE SORTIE	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACE DE SORTIE
$\mathcal{E}o \in [\uparrow,0]$ & (io(k)=0 io(k1)=0)	$E_0c1.1$ $Pc_01 = 1$		$[uo_{sk}]=[eo_{sk}]$ $[io_{sk}] = [0]$	eo(br) - udo = 0+ (k← br)	$E_0c1.2$
				$Bo_{sr.br}=1$ & $(eo_{sr.br}$ - udo <0) & ($eo_{sr.br1}$ - udo> 0) (k← br) et (s← sr)	$E_0c1.3$
$\mathcal{E}o \in [\uparrow,0]$ & ($io_{s.br}$< 0 $io_{s.br1}$> 0) (k ←br) et (s ←sr)	$E_0c1.2$ $Pc_01 = 2$		uo_{sk}= (2.s-1). udo uo_{sk1}= -(2.s-1). udo	$-io_{sk} = io_{sk1} = 0\uparrow$	$E_0c1.1$
$\mathcal{E}o \in [\uparrow,0]$ & ($io_{s.br}$> 0 $io_{s.br1}$< 0) (k ←br) et (s ←sr)	$E_0c1.3$ $Pc_01 = 3$		$[uo_{sk}] = [0]$	$-io_{sk} = io_{sk1} = 0\uparrow$	$E_0c1.1$

Tableau 1.20

3.3.3.c Classe 2 (Deux transistors commandés)

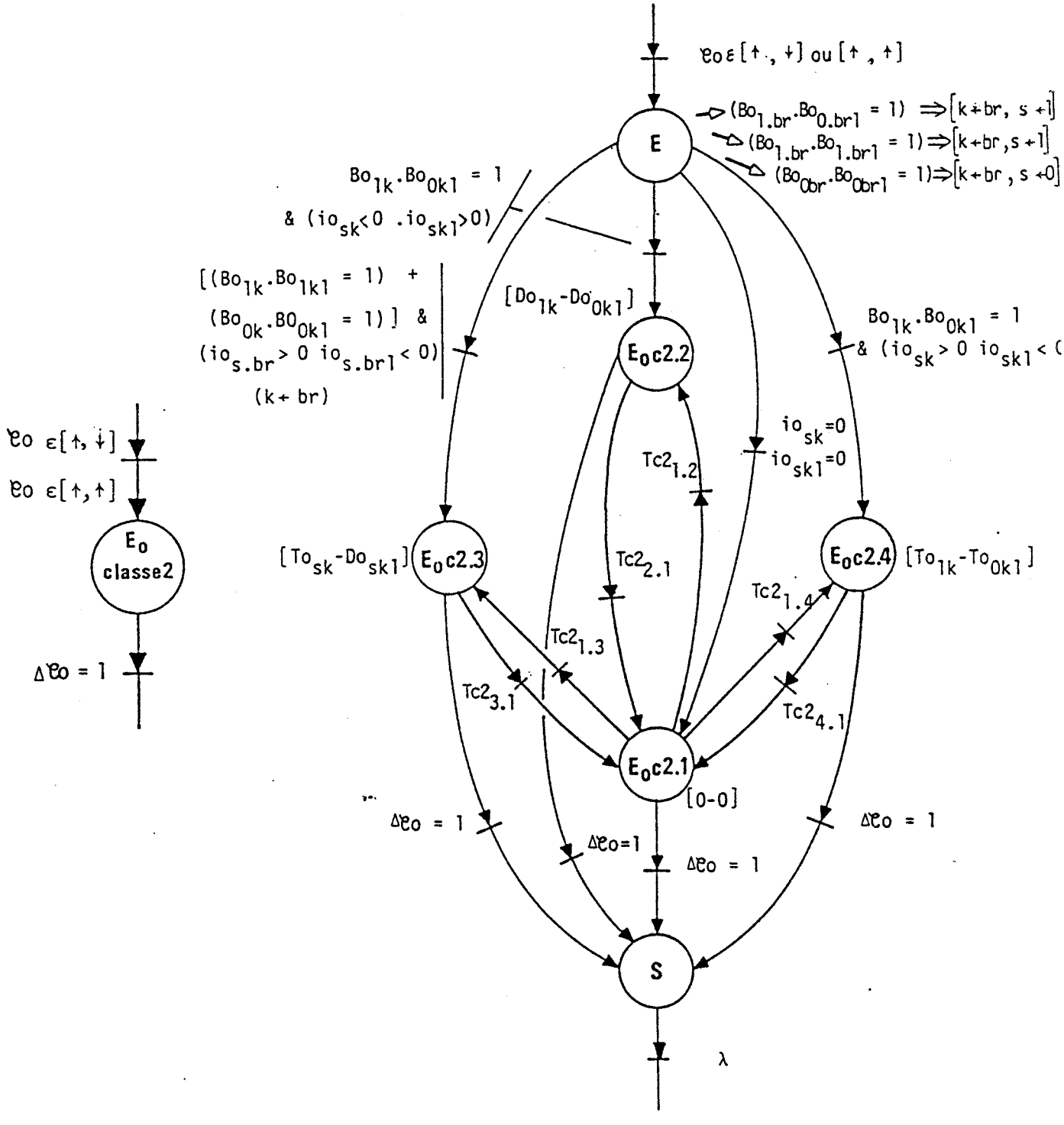


Figure 1.21 : Macroplace classe 2

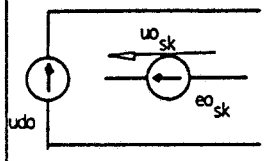
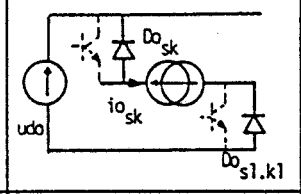
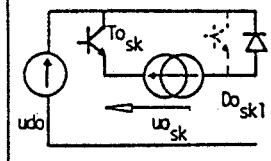
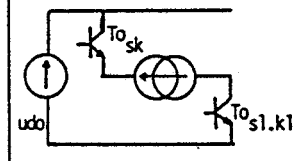
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE POINTEUR	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSION DE SORTIE	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACE DE SORTIE
$\mathcal{E}o \in [+,+]$ & $(io(k)=0$ $io(kl)=0)$	$E_oc2.1$ $Pc_o2 = 1$		$[uo_{sk}] = [eo_{sk}]$ $[io_{sk}] = [0]$	$(Bo_{lbr}.Bo_{Obrl})$ & $(eo_{sbr} - udo \geq 0)$ $(k \leftarrow br)$	$E_oc2.2$
				$(Bo_{sr.br}.Bo_{sr.brl})$ & $(eo_{s.br} - udo < 0)$ & $(eo_{s.brl} - udo \geq 0)$ $(k \leftarrow br)$ et $(s \leftarrow sr)$	$E_oc2.3$
				$(Bo_{lbr}.Bo_{Obrl})$ & $(eo_{s.br} - udo < 0)$ $(k \leftarrow br)$	$E_oc2.4$
$\mathcal{E}o \in [+,+]$& $(Bo_{lbr}.Bo_{Obrl} = 1)$ & $(io_{lbr} < 0$ $io_{lbrl} > 0)$ $(k \leftarrow br)$	$E_oc2.2$ $Pc_o2 = 2$		$uo_{sk} = (2.s-1).udo$ $uo_{skl} = -(2.s-1).udo$	$io_{sk} = -io_{skl} = 0+$	$E_oc2.1$
$\mathcal{E}o \in [+,+]$ & $(Bo_{sr.br}.Bo_{sr.brl})$ & $(io_{sr.br} > 0$ $io_{sr.brl} < 0)$ $(k \leftarrow br)$ et $(s \leftarrow sr)$	$E_oc2.3$ $Pc_o2 = 3$		$[uo_{sk}] = [0]$	$io_{sk} = -io_{skl} = 0+$	$E_oc2.1$
$\mathcal{E}o \in [+,+]$ & $(Bo_{lbr}.Bo_{Obrl} = 1)$ & $(io_{lbr} > 0$ $io_{lbrl} < 0)$ $(k \leftarrow br)$	$E_oc2.4$ $Pc_o2 = 4$		$uo_{sk} = (2.s-1).udo$ $uo_{skl} = -(2.s-1).udo$	$io_{sk} = -io_{skl} = 0+$	$E_oc2.1$

Tableau 1.22 : Description de la macroplace pour la classe 2

4 -STRATEGIE DE COMMANDE

4.1. Affectation des fonctions de conversion

La structure proposée est du type indirecte, elle résulte de l'association de deux blocs de conversion distincts : un redresseur et un onduleur (figure 1.22).

Le redresseur est chargé de délivrer une tension udi positive quel que soit le sens du courant de sortie idi, il peut donc être assimilé à un redresseur bidirectionnel en courant.

L'onduleur assure à la fois les variations d'amplitude et de fréquence de la tension appliquée à la charge.

Un filtre intermédiaire relie ces deux montages, réduit l'ondulation de la tension redressée, et assure pour chaque bloc l'alternance tension-courant des sources amont et aval.

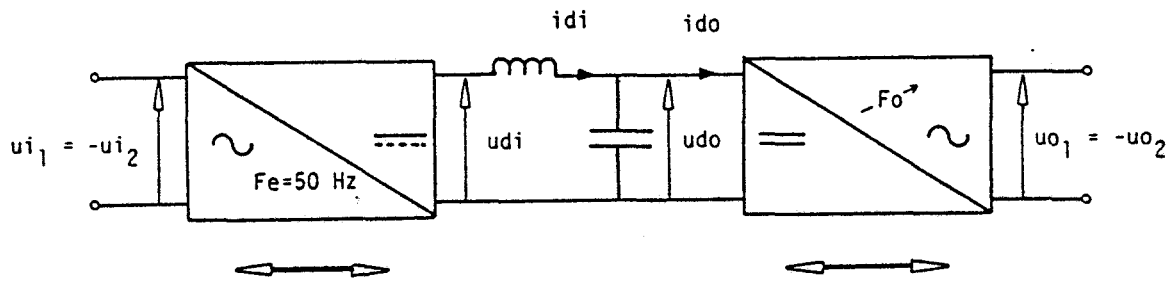


Figure 1.22 : Blocs de conversion

4.2. Commande du redresseur

La réversibilité en courant du montage redresseur exige qu'il y ait toujours deux transistors d'une même diagonale du pont commandés, afin de permettre le changement de sens du courant idi. Pour ce faire, chaque paire de transistors est commandée pendant une demi-période de la tension d'alimentation (commande à 180°), de sorte que cet intervalle coïncide avec la commutation naturelle de la diode montée en parallèle inverse sur ce dernier (voir chronogramme de la figure 1.23).

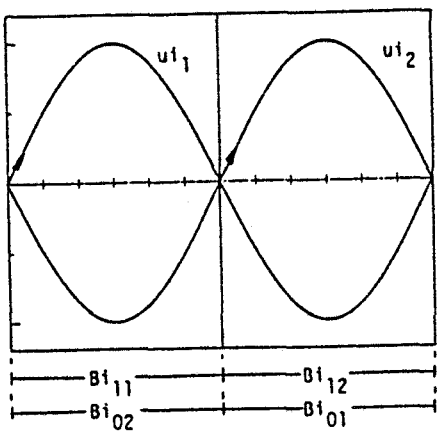


Figure 1.23 :
Chronogramme de commande des transistors du redresseur

4.3. Commande de l'onduleur

De nombreuses stratégies de commande des onduleurs en pont sont proposées dans la littérature et elles ont donné naissance à de multiples réalisations. Nous en présentons ici quelques unes dans le but de montrer l'adaptation facile du modèle numérique précédemment établi aux stratégies les plus utilisées.

La commande la plus simple pour obtenir une tension alternative de fréquence et d'amplitude variables à partir d'une tension continue est la commande dite "décalée" /15/ ; la figure 1.24 en rappelle le principe. Le réglage de la valeur efficace de l'onde de sortie s'effectue aisément en introduisant des paliers de tension nulle par action sur l'angle de décalage β.

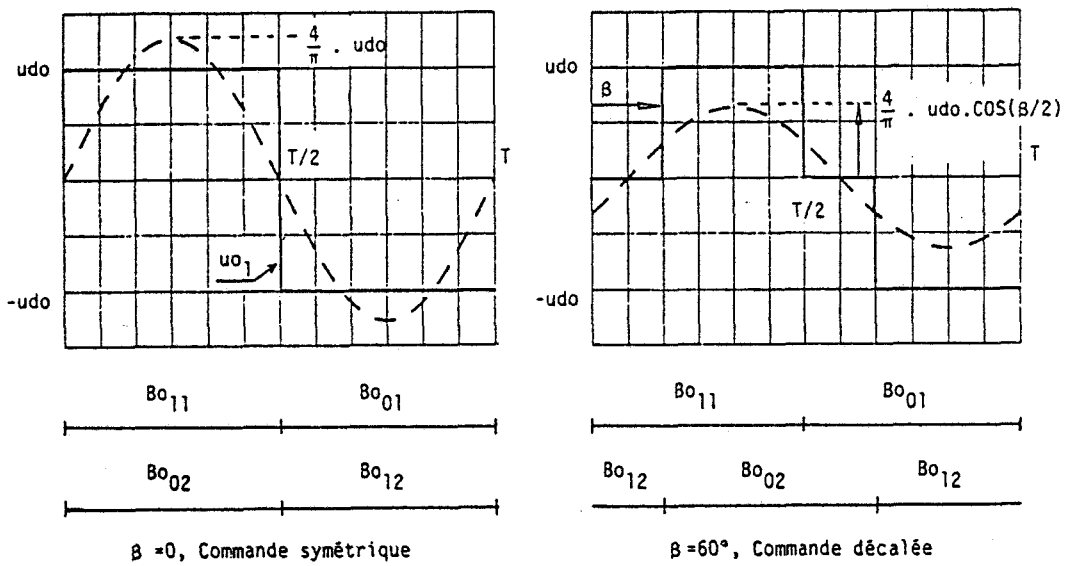


Figure 1.24 : Chronogrammes d'une commande décalée pour onduleur

Avec cette commande, le taux d'harmonique introduit dans l'onde de sortie est important. Il diminue si l'on augmente le nombre de commutations par période. C'est pourquoi, lorsque l'on recherche une onde voisine de la sinusoïde ou plus facilement filtrable, on a recours aux techniques de modulation de largeur d'impulsions (MLI). La tension de sortie est alors constituée de trains d'impulsions de largeur et d'espacement variables. Les signaux de commande de base des transistors sont élaborés de différentes façons selon que l'on souhaite minimiser le contenu harmonique ou neutraliser certains harmoniques.

Si l'on écarte les systèmes opérant en boucle fermée, ces deux approches donnent lieu à deux stratégies de commande /16/ /17/ :

- MLI à échantillonnage (naturel ou régulier)
- MLI optimisée.

L'échantillonnage naturel consiste en une comparaison directe entre une sinusoïde (signal modulant de fréquence Fo et image du fondamental de la tension souhaitée) et un signal triangulaire (signal porteur de fréquence 2.N.Fo) pour déterminer les angles de commutation et donc la largeur des impulsions résultantes (figure 1.25). Cette stratégie est l'une des plus anciennes puisqu'elle dérive des techniques des circuits analogiques /18/ /19/. De nombreux articles traitent de l'influence de la forme d'onde de la porteuse ou de la modulante et de la manière de les comparer (modulation du front montant, du front descendant, ou des deux fronts), Mathys en propose une classification /20/.

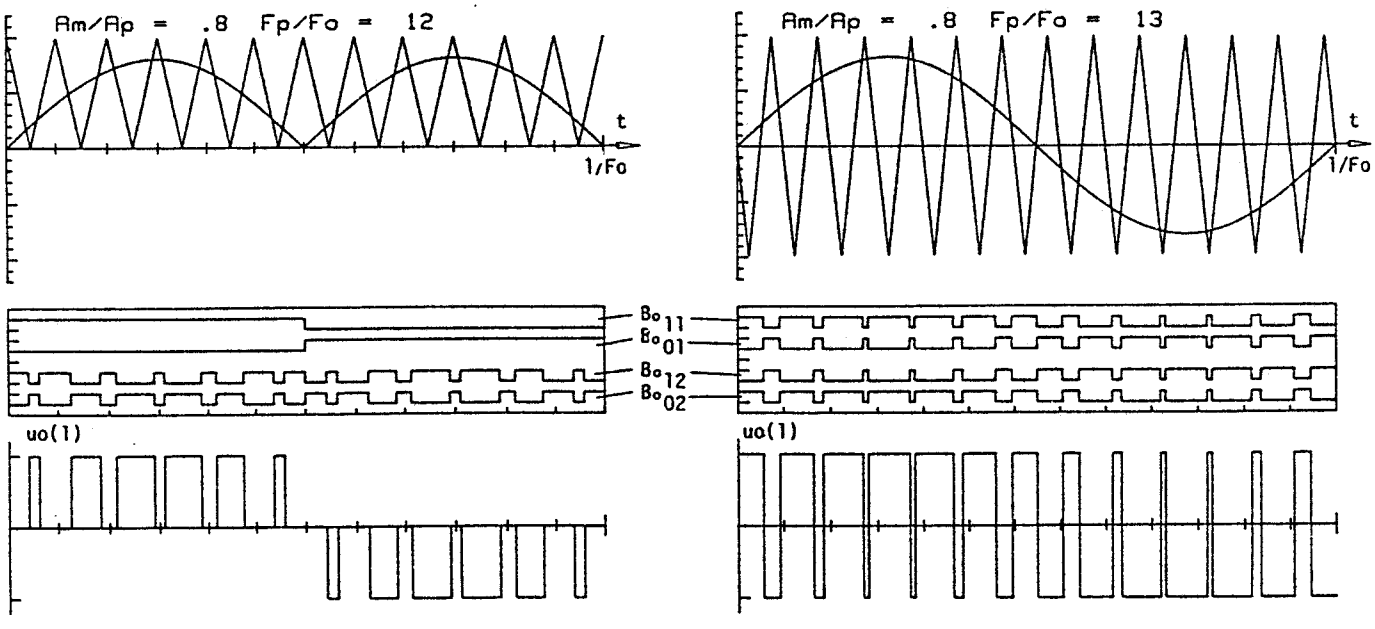


Figure 1.25 : M.L.I. par échantillonnage naturel (tension à 3 niveaux et à 2 niveaux)

La MLI à échantillonnnage régulier est née avec l'implantation de ces stratégies de contrôle sur microprocesseur. La modulante est d'abord échantillonnée, à la même fréquence, 2.N.Fo, que le signal porteur par un échantillonneur bloqueur d'ordre 0 ; ensuite le signal sinusoïdal converti est comparé au signal porteur (figure 1.26).

Des techniques plus récentes /21/ utilisent un échantillonneur bloqueur d'ordre 1 afin d'obtenir une image plus proche de la sinusoïde (figure 1.27).

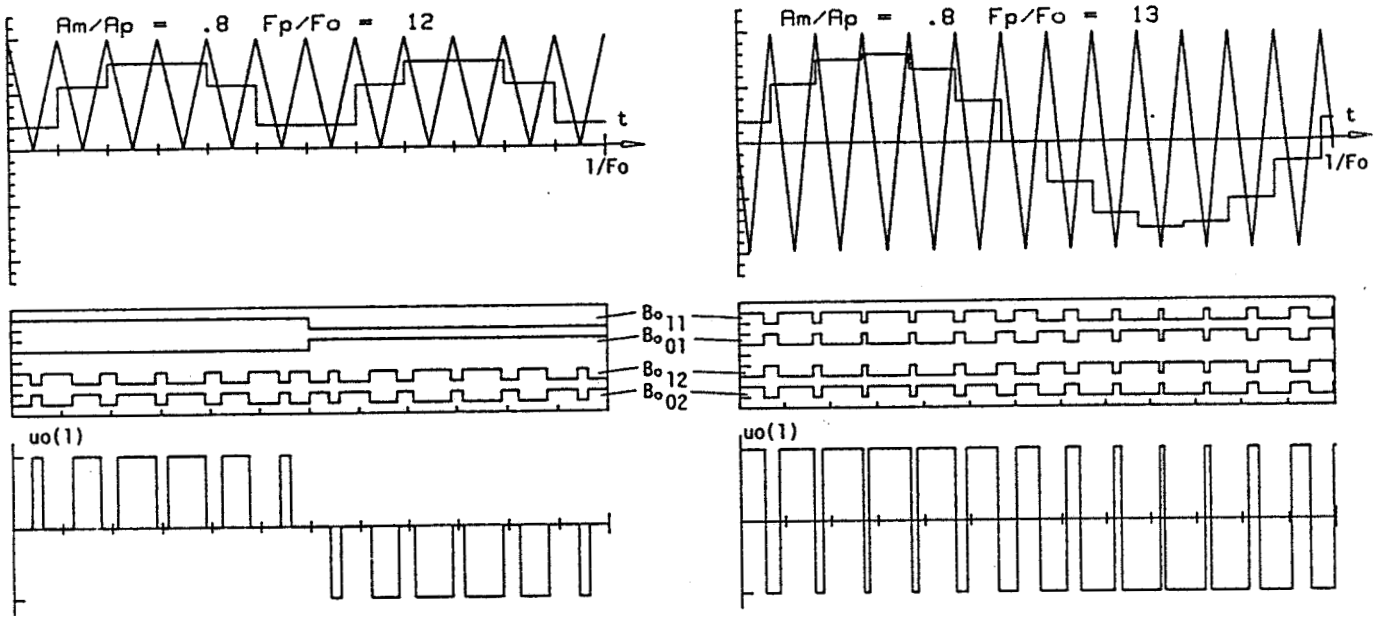


Figure 1.26 : M.L.I. par échantillonnage régulier (ordre 0)
Tension à 3 niveaux et 2 niveaux

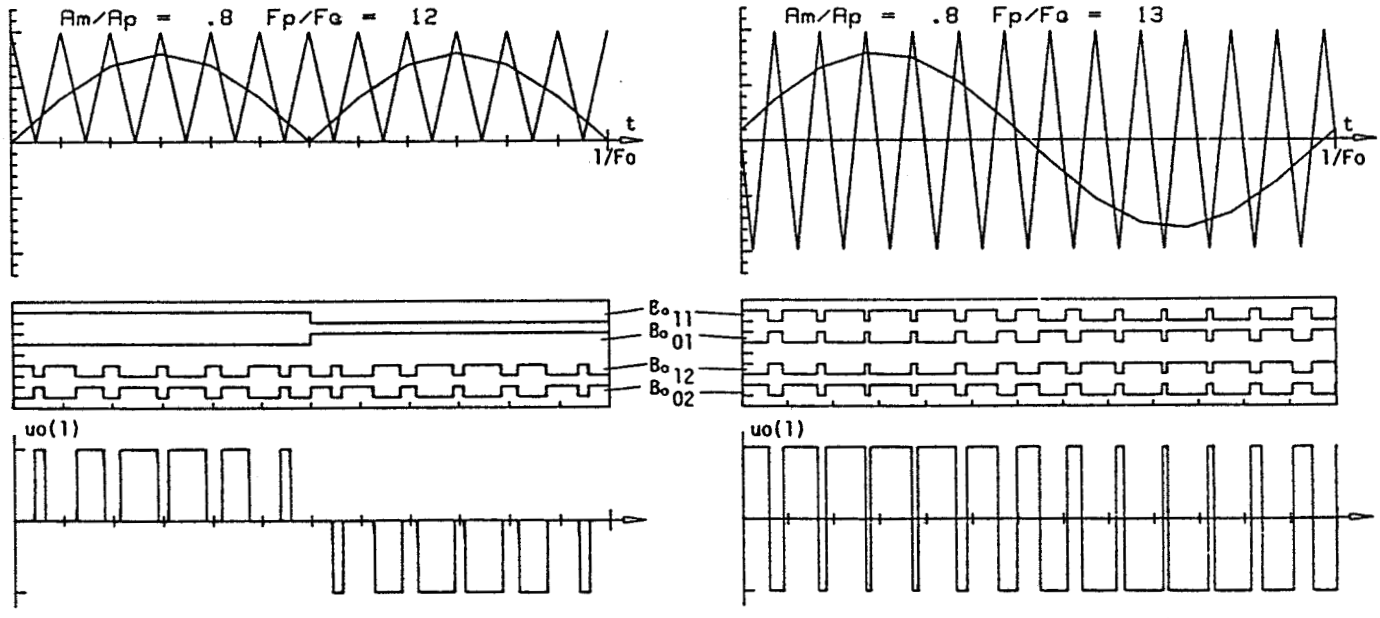


Figure 1.27 : M.L.I. par échantillonnage régulier (ordre 1)
Tension à 3 niveaux et à 2 niveaux

La stratégie de commande à "MLI optimisée" initialement étudiée par Patel et Hoft /22/ /23/ permet d'annuler un nombre fini d'harmoniques de tension. Pour cela, à partir d'une onde formée de 2.M impulsions ($\alpha_1 \ldots \alpha_{2M}$), en choisissant correctement les symétries de l'onde, symétrie par rapport au quart de période et antisymétrie par rapport à la demi - alternance ; on détermine la valeur des 2.M angles annulant les expressions de M harmoniques gênants (figure 1.28). La mise en équation du problème conduit à un système d'équations transcendantes dont la résolution n'est envisageable que par calcul numérique. La méthode du gradient, développée en annexe 1, évite une recherche systématique et permet d'accéder plus ou moins rapidement à une solution (celle-ci n'étant pas forcément unique).
Cette stratégie s'applique facilement au système de commande à microprocesseur puisqu'une fois les angles calculés, il suffit de les tabuler dans des mémoires /24/ /25/.

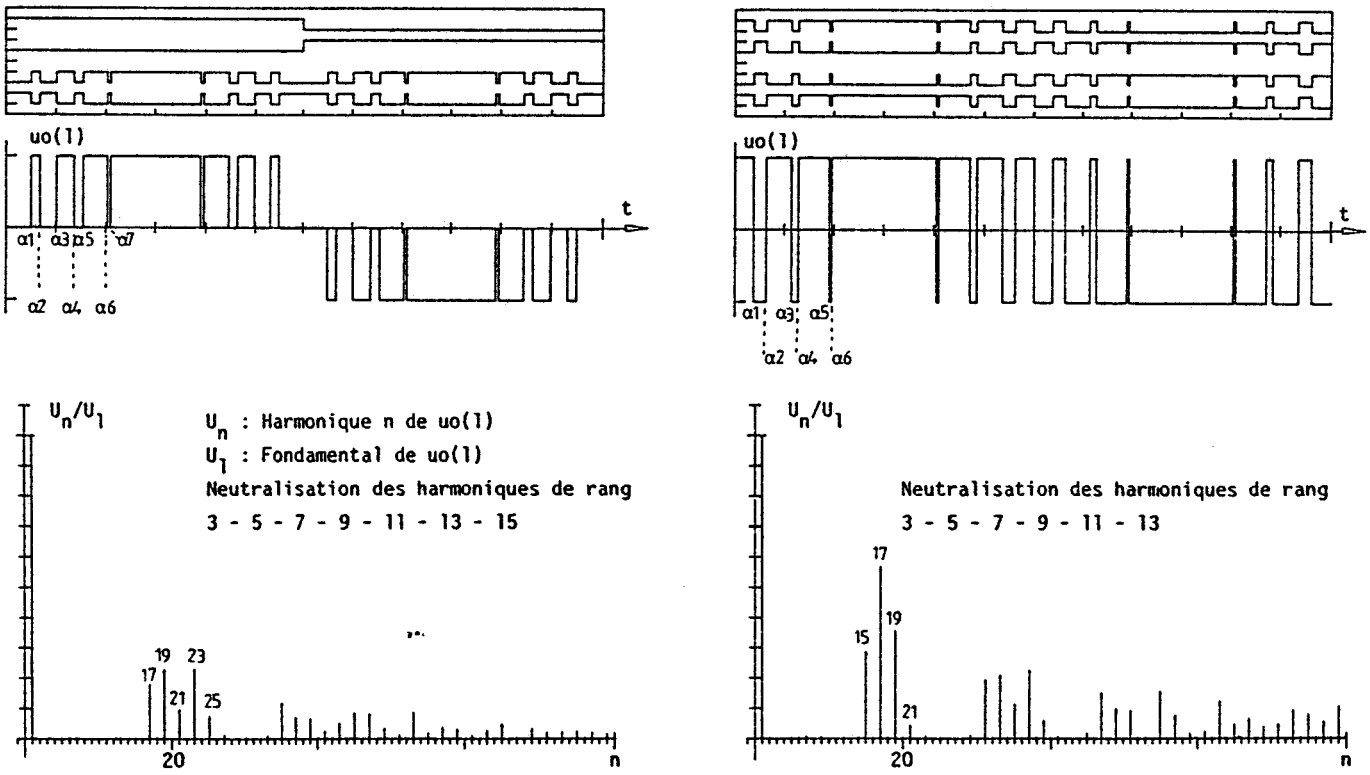
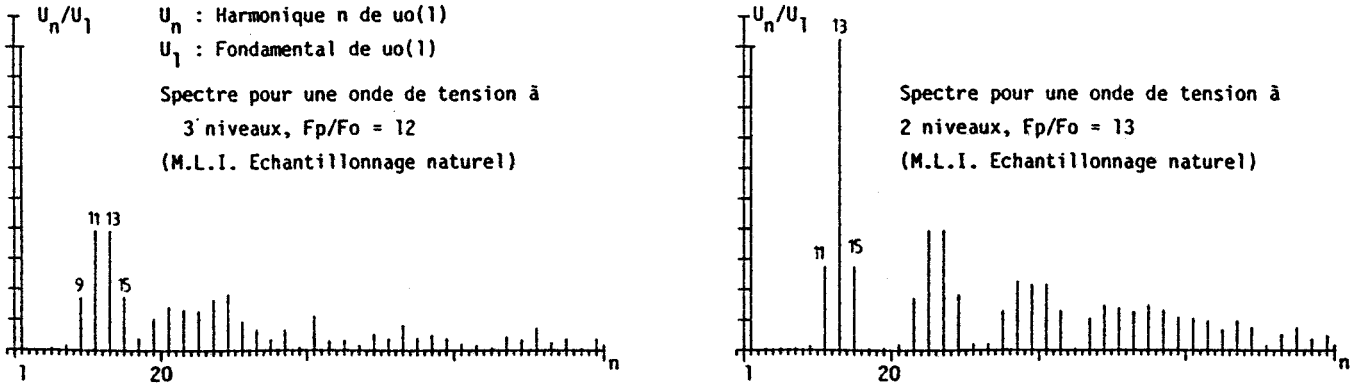


Figure 1.28 : M.L.I. optimisée, onde de tension à 3 niveaux et 2 niveaux



5 - MODELE NUMERIQUE DU CONVERTISSEUR

La transcription des graphes sur calculateur s'inspire des méthodes d'implantation utilisées pour les automates programmables /26/. L'emploi d'un langage évolué tel que le BASIC /27/ /28/ ou le PASCAL /11/ nous permet, de plus, d'accroître la complexité des graphes tout en conservant la souplesse propre à celui-ci.

La transcription, pour une programmation en langage Basic s'effectue en associant à chacune des places d'un graphe d'état deux sous-programmes :

- le premier regroupe les conditions de franchissement de toutes les réceptivités de sortie de la place concernée et assure la modification d'un pointeur désignant la place active,

- le second spécifie l'ensemble de tâches affectées à la place.

L'instruction : ON <pointeur> GOSUB <sous-programme, >, nous permet d'exécuter l'un des sous-programmes de la liste selon la valeur du pointeur. Nous retrouverons donc pour chaque graphe la structure de programmation suivante, qui respecte les règles de franchissement dans les réseaux de Pétri :

ON <pointeur> GOSUB <réceptivité 1,..., réceptivité n>
ON <pointeur> GOSUB <place 1, place 2,..., place n>

La figure 1.29 représente l'organigramme général du programme de simulation, et met en évidence l'approche arborescente utilisée au cours de la description.

Pour faciliter le repérage, les étiquettes attribuées aux sous-programmes sont celles utilisées pour le codage des places et réceptivités.

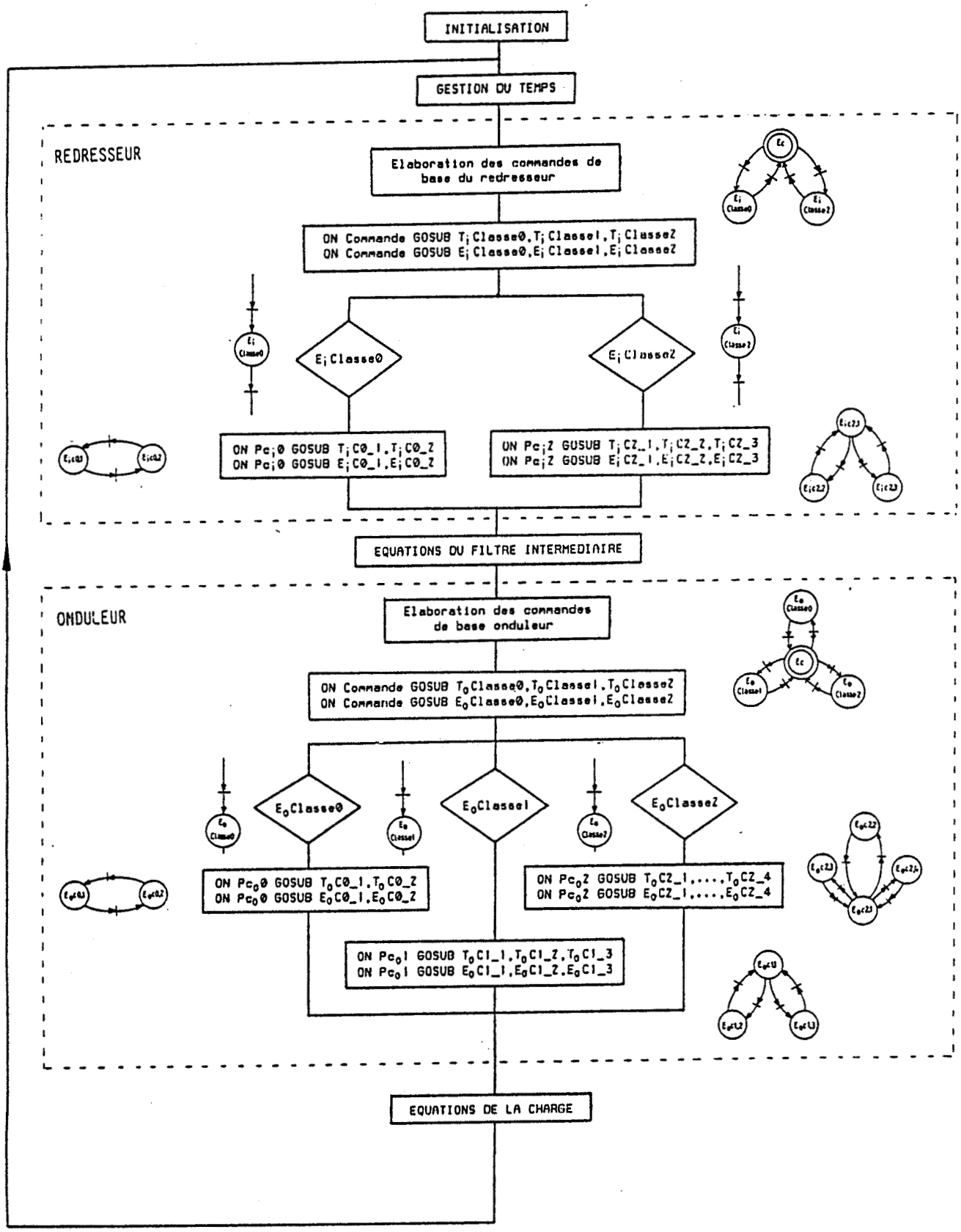


Figure 1.29 : Organigramme général du programme de simulation

Les figures 1.30 et 1.31 représentent les différentes modifications apportées à l'organigramme général.

La première réduit considérablement le temps de calcul. En effet, s'il n'y a pas eu de changement de commande par rapport au pas précédent, le pointeur de classe conserve la même valeur ; par conséquent il est inutile de tester les transitions inter-classes de commande.

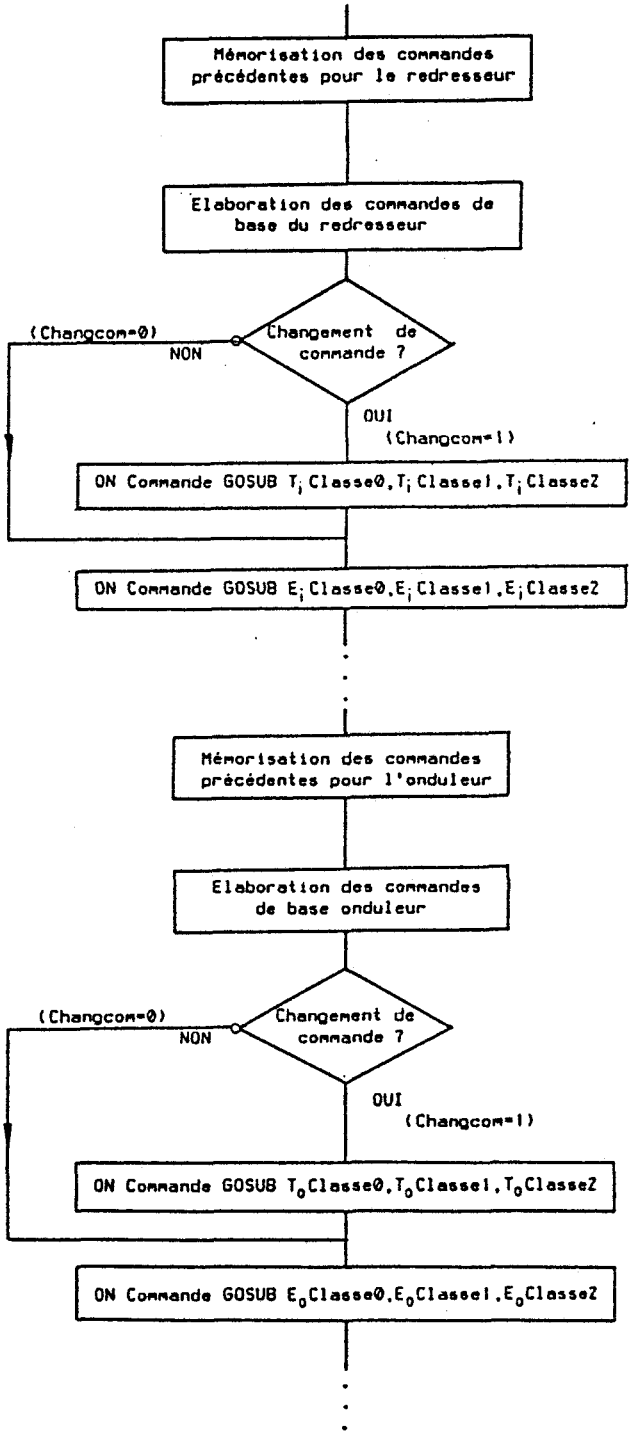


Figure 1.30 : Détection du changement de commande

La seconde modification permet de différencier au moyen d'inhibiteurs l'évolution des grandeurs liées au temps, des évolutions instantanées, indépendantes du temps.

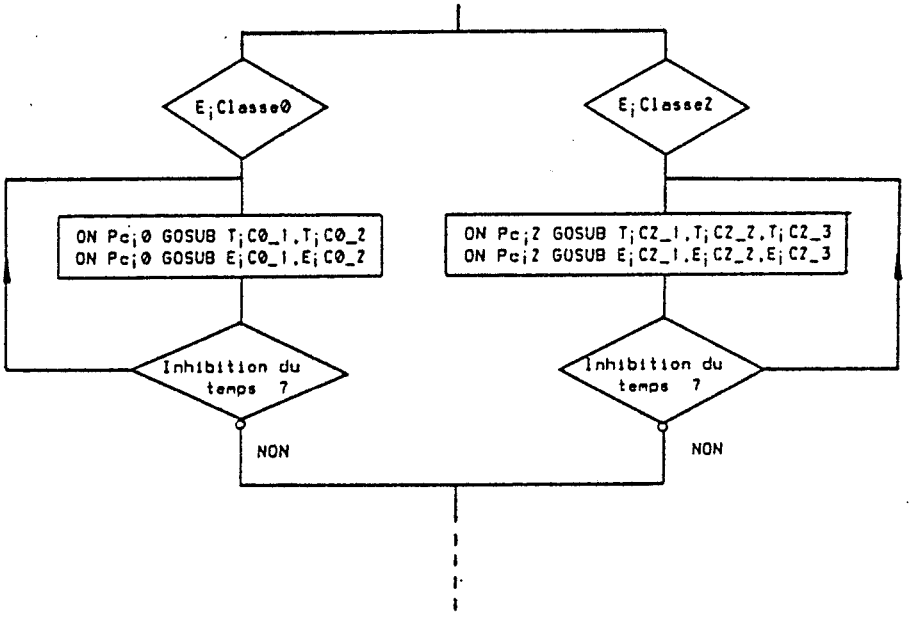
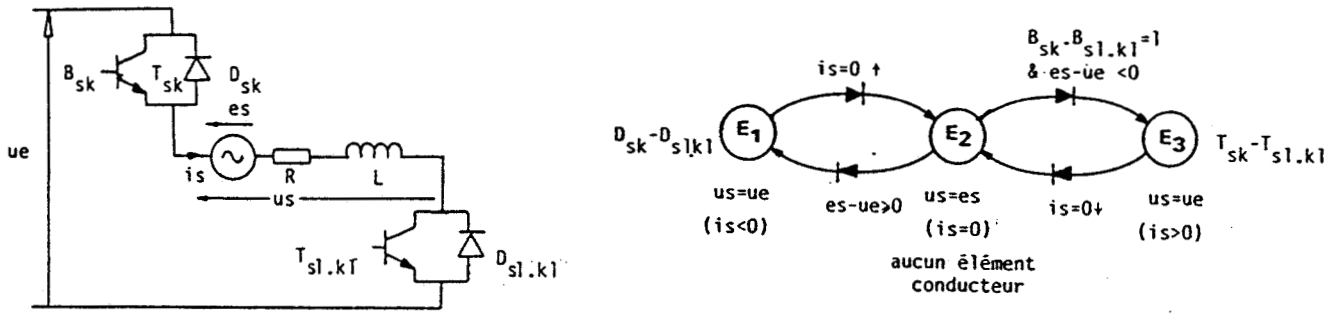


Figure 1.31 : Prise en compte des inhibitions du temps

Au cours de simulations, nous avons en effet remarqué qu'il convenait de distinguer l'annulation du courant dans l'interrupteur, de son simple passage par zéro avant son inversion. Dans le premier cas, le composant qui assurait la liaison avec la source cesse de conduire, la tension aux bornes de la charge (si celle-ci est active) prend alors la valeur de la FCEM. Dans le second cas, la phase transitoire où aucun élément n'est conducteur peut être fugitive si les conditions de tension et de commande du composant monté en antiparallèle sont favorables à sa mise en conduction. La phase de déconnexion du réseau, dans ces conditions ne dure qu'un pas de calcul. Pour ce cas, il convient d'inhiber le temps pour effectuer un second passage dans le réseau de Pétri. Nous avons représenté ces différentes phases de fonctionnement sur les figures 1.33 et 1.34 dans le cas d'un onduleur alimenté sous tension constante (figure 1.32).

Ces constations nous permettent de conclure que l'association d'un transistor et d'une diode en antiparallèle possède des propriétés bien particulières qui peuvent être différentes de celles des deux composants pris isolément. On observe une dégradation de la structure due à la commande, en effet, lorsque le transistor est commandé, cet ensemble devient NON RECEPTIF à l'annulation du courant et il peut dans ces conditions être remplacé par une liaison bidirectionnelle.



R = 10 Ω, L = 50 mH, ue = 220 V

Figure 1.32 : Réseau de Pétri relatif à l'inversion du courant dans la charge

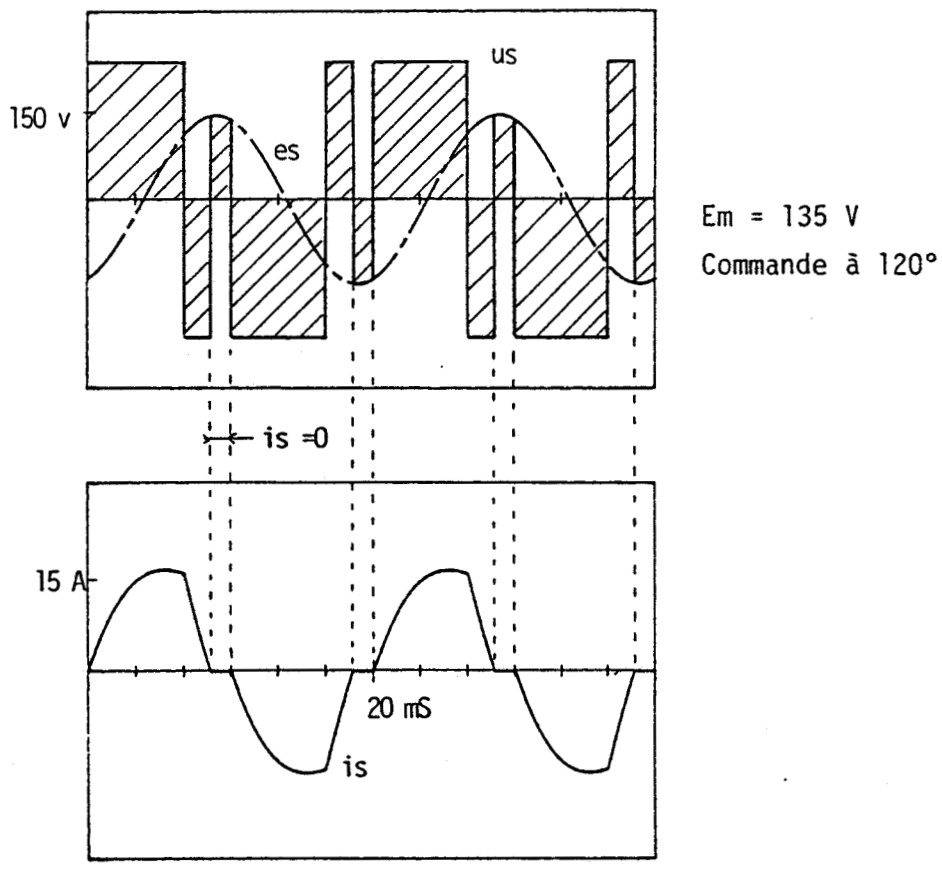
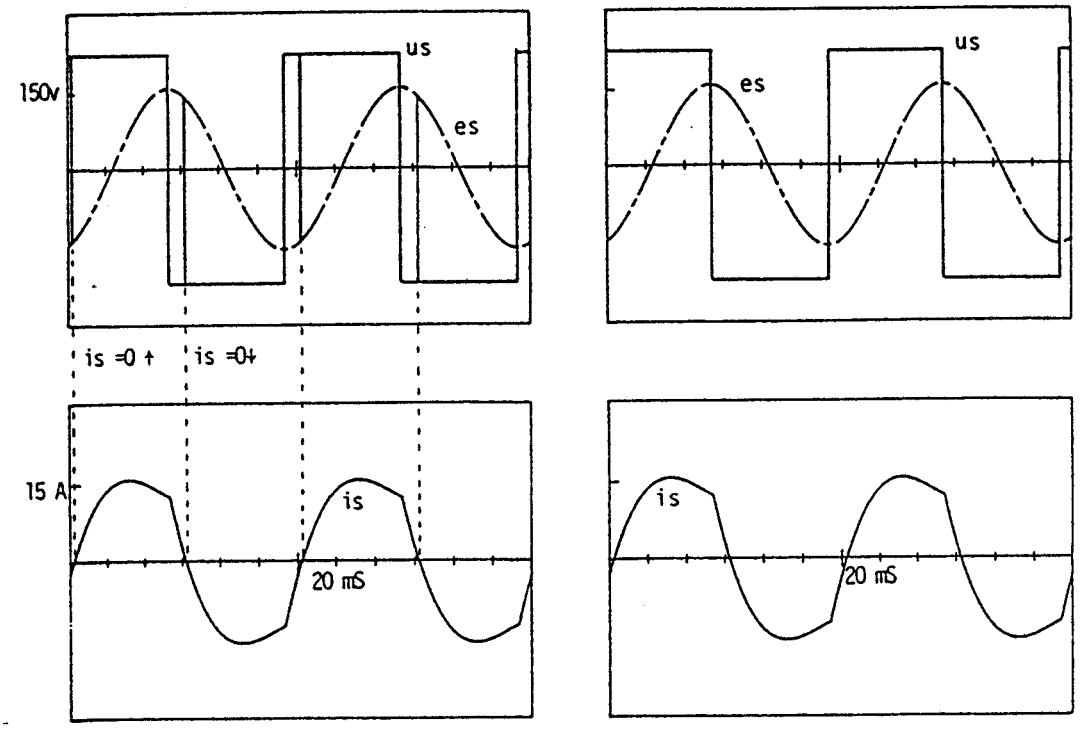


Figure 1.33 : Cas de l'annulation du courant dans la charge



a- Sans inhibition du temps b- avec inhibition du temps

Figures 1.34 : Cas du passage par zéro du courant

6 - RESULTATS

Le programme de simulation globale permet d'accéder à tout instant aux différentes grandeurs électriques du montage ; les figures 1.36 à 1.39 présentent l'évolution de ces grandeurs lorsque l'onduleur est soumis à différentes lois de commande. Le changeur de fréquence, dans le cas présent, alimente une charge inductive monophasée comportant une fcem sinusoidale (Voir figure ci-dessous).

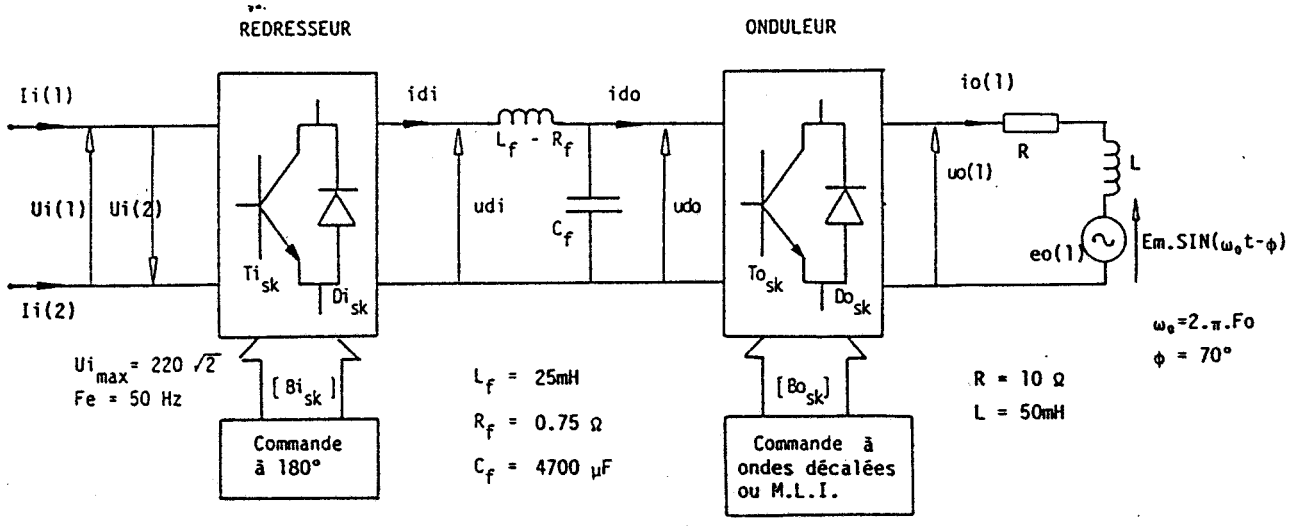


Figure 1.35 : Notations et conditions de simulation

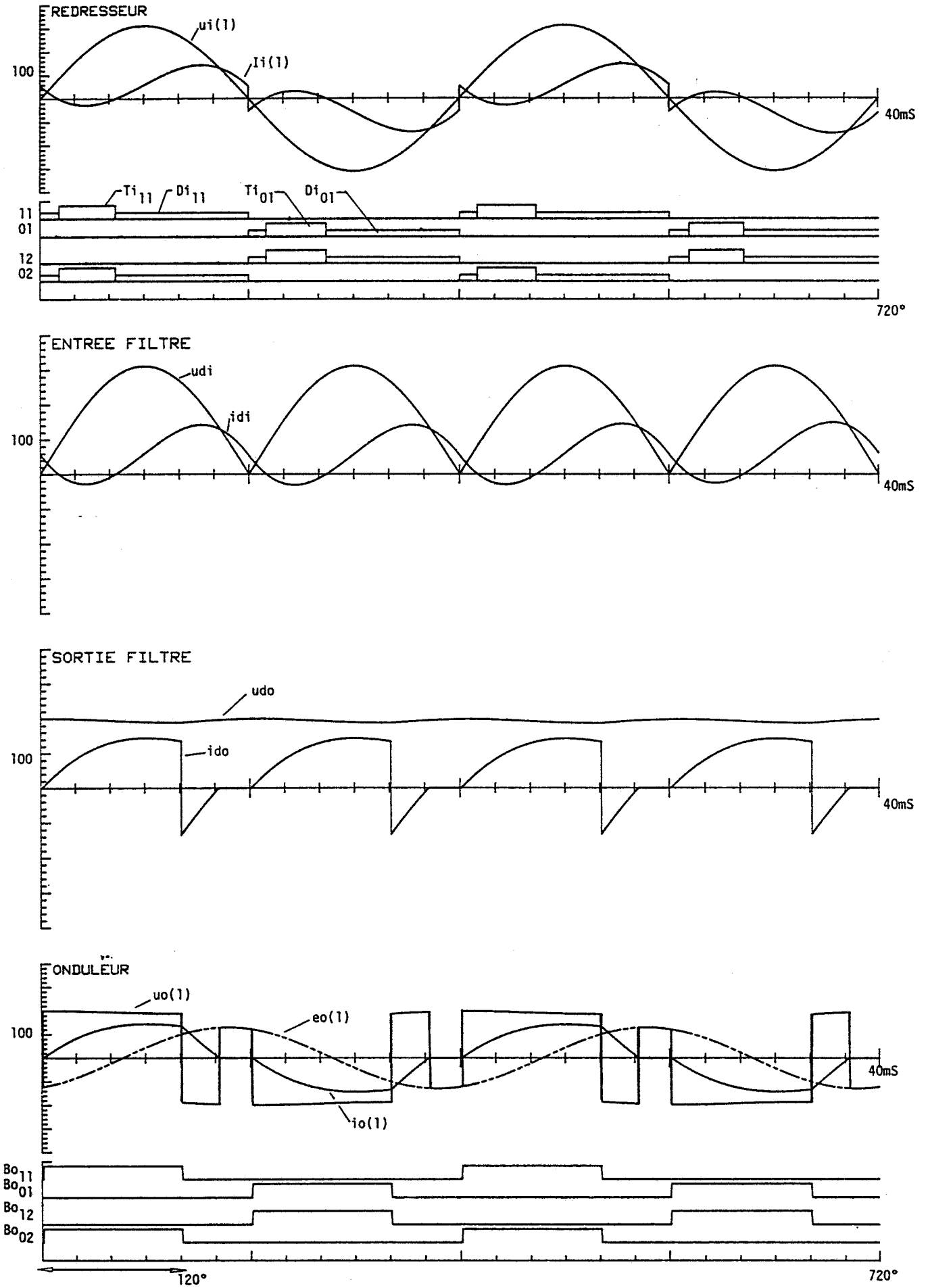


Figure 1.36 : Commande onduleur sur 120°, Fo=50Hz

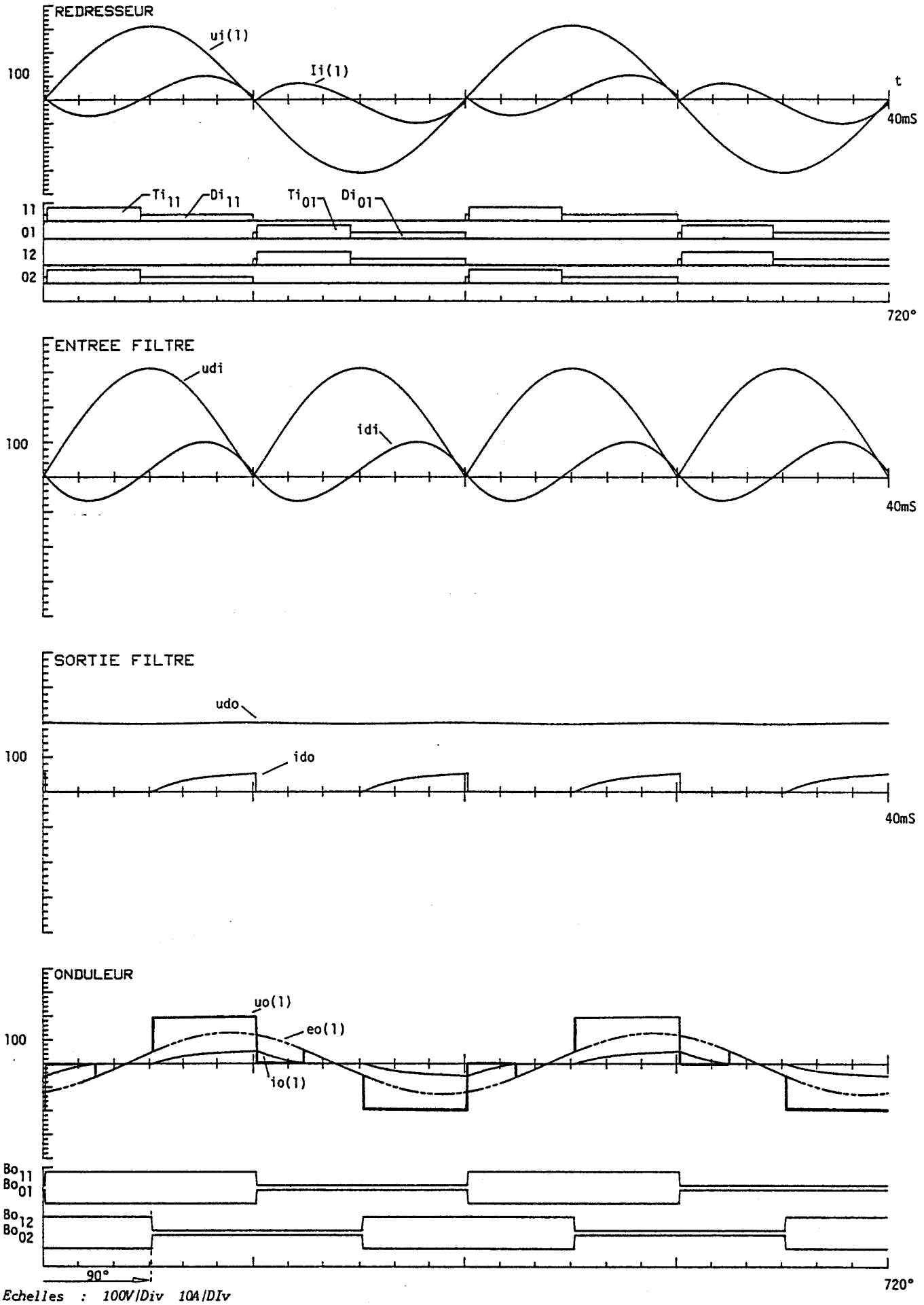


Figure 1.37 : Commande pleine onde décalée (90°), Fo=50Hz

Figure 1.38 : Commande de l'onduleur par MLI (Tension bipolaire)

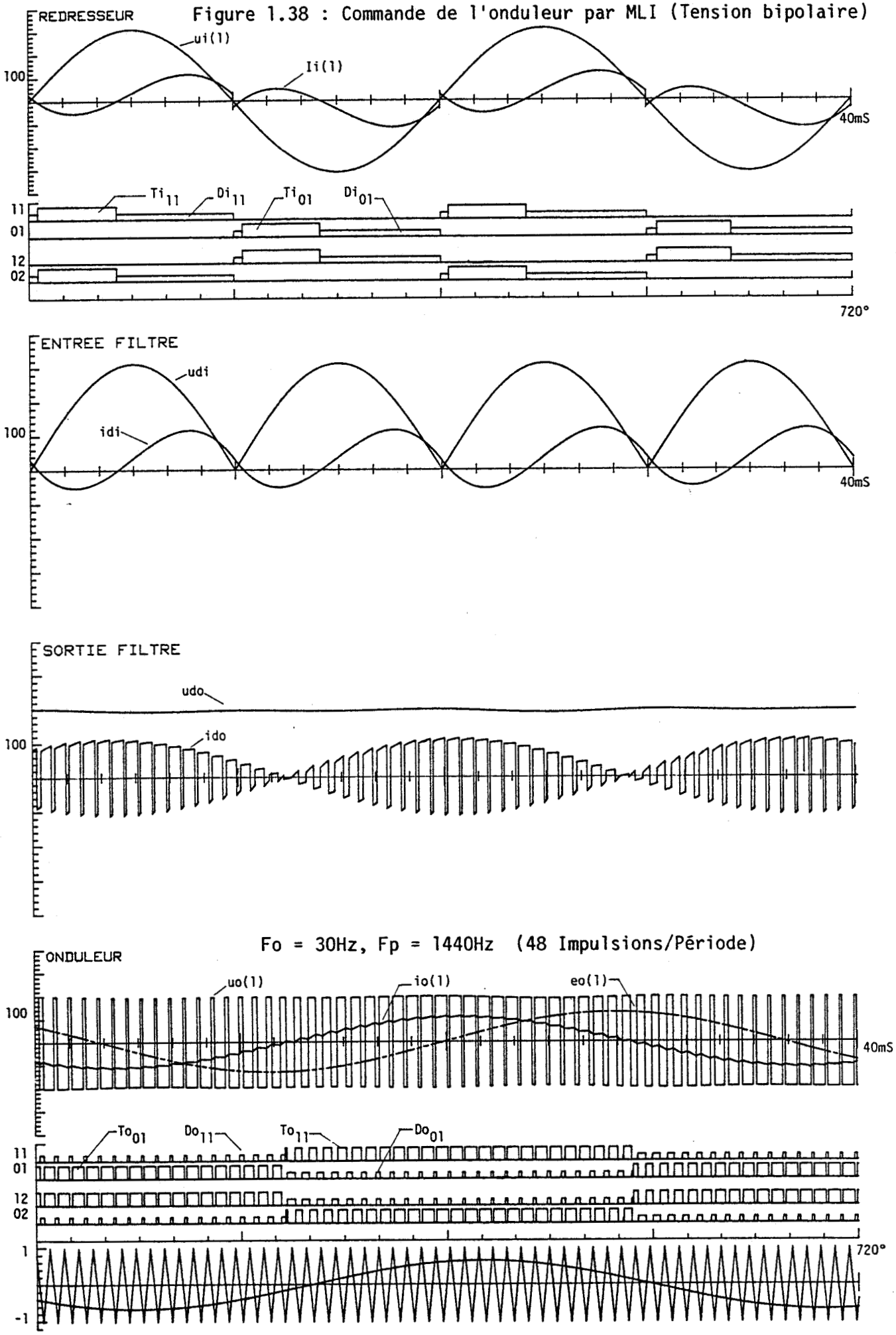
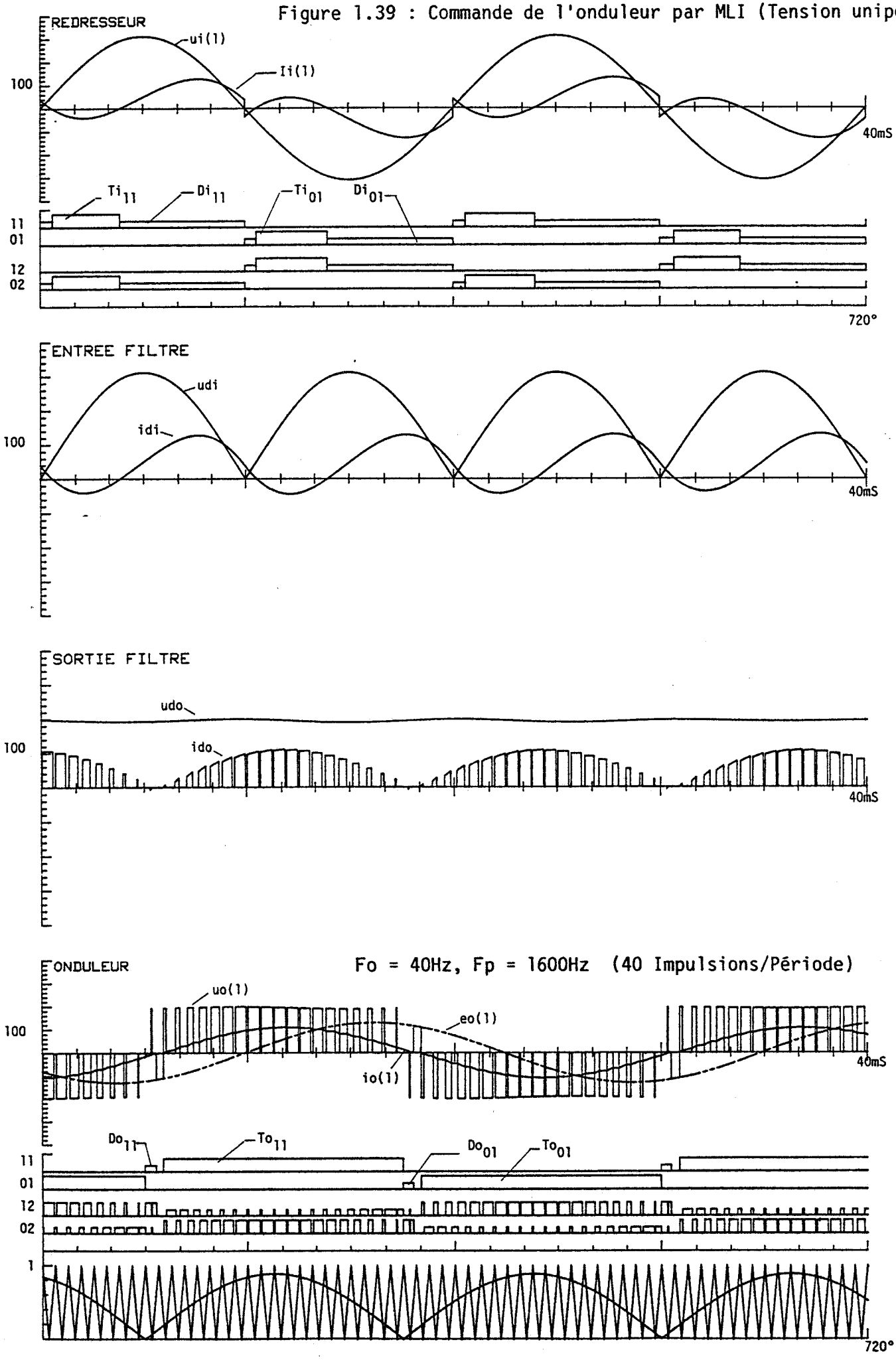


Figure 1.39 : Commande de l'onduleur par MLI (Tension unipolair



7 - CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'énoncer les principes de fonctionnement et de modélisation du changeur de fréquence réversible dans le cas simple de structures monophasées.

Le programme de simulation globale proposé, répond à la double exigence d'une modélisation indépendante de la charge et de la loi de commande de interrupteurs. Il permet d'observer le comportement de la structure sans a priori sur les séquences de fonctionnement (voir les figures 1.36 et 1.37 par exemple).

En dehors de l'intérêt didactique pour la définition des techniques d'analyse, la version monophasée d'un tel changeur de fréquence reste cependant limitée dans ses applications. En effet, le montage redresseur génère une tension dont l'ondulation importante ne peut être atténuée qu'au prix de composants réactifs intermédiaires de valeur importante qui tentent à dégrader les performances dynamiques de l'association proposée. C'est pourquoi nous nous proposons, dans le chapitre suivant, d'étendre cette étude au cas de structures triphasées.

CHAPITRE 2

ETUDE D'UN CHANGEUR DE FREQUENCE REVERSIBLE TRIPHASE - TRIPHASE

L'étude précédente nous a permis de modéliser et d'étudier le comportement de la mise en cascade de deux convertisseurs dans le cas simple de l'association de deux structures monophasées.

Nous nous proposons à présent d'étendre cette étude au cas du triphasé.

1 - PRESENTATION DE LA CASCADE DE CONVERSION ETUDIEE

Le convertisseur de fréquence résulte de la mise en cascade de deux ponts triphasés comportant chacun six interrupteurs de puissance (figure 2.1). Cette disposition permet la séparation des fonctions de commande à réaliser ; ainsi le premier pont est utilisé en REDRESSEUR, tandis que le second fonctionne en ONDULEUR. Le filtre intermédiaire (L_f, C_f) assure une meilleure cohabitation entre les ponts et permet la réduction du filtre à l'entrée /29/.

L'obtention d'un échange réversible de puissance entre les sources de tension d'entrée du montage et les sources de courant de sortie, impose l'utilisation, pour chaque pont, d'interrupteurs bidirectionnels.

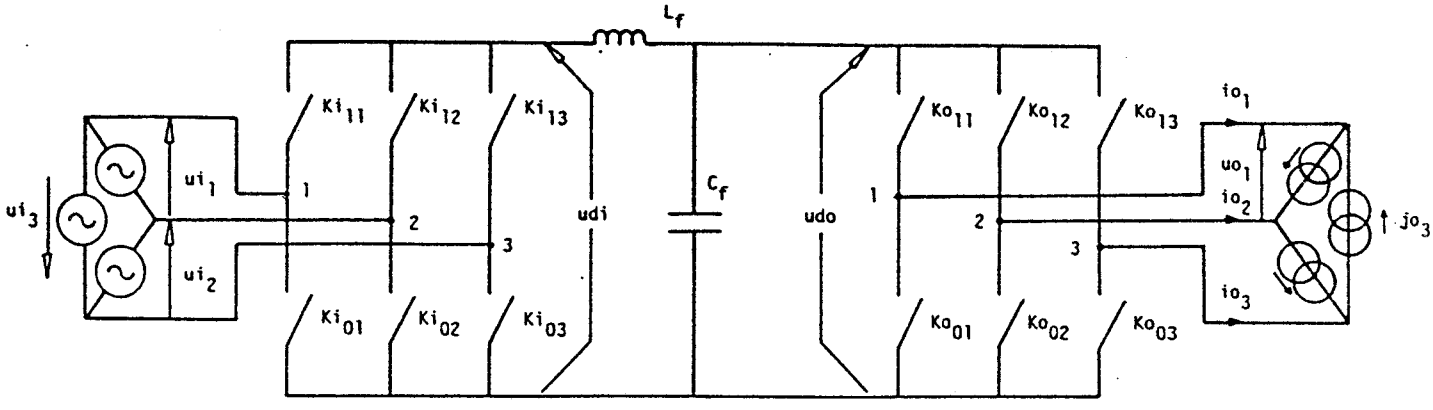


Figure 2.1 : Schéma de principe du changeur de fréquence

Des études antérieures menées au laboratoire /30/ /31/ ont montré que pour une structure classique d'onduleur à transistors, le choix d'interrupteurs totalement contrôlés, au niveau du redresseur (figure 2.2), ne présentait pas que des avantages.

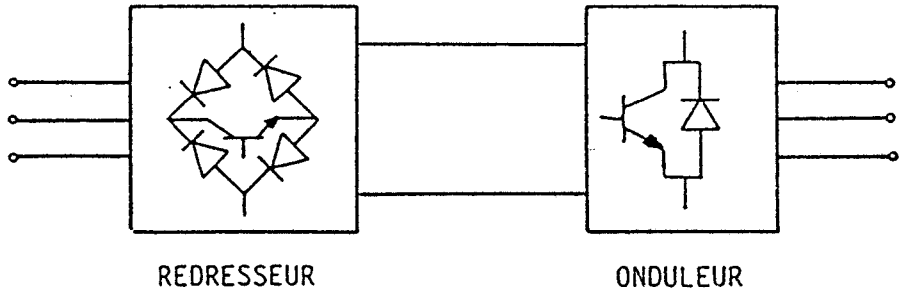


Figure 2.2 : Redresseur totalement contrôlé

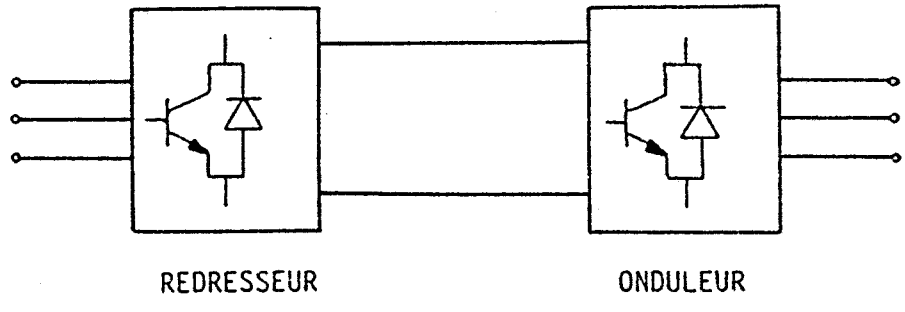


Figure 2.3 Redresseur partiellement contrôlé

L'adoption d'une structure minimale pour chaque interrupteur (figure 2.3) diminue considérablement le nombre de composants de puissance pour le montage redresseur et nous permet de tirer profit du fonctionnement en commutation naturelle des diodes. En revanche, elle impose une contrainte pour la commande des transistors du redresseur, à savoir un fonctionnement SYNCHRONE avec la commutation naturelle des diodes ; la variation de tension devra donc être réalisée par l'onduleur.

La figure 2.4 précise les principales notations ; les grandeurs des montages redresseur et onduleur sont respectivement affectées des indices i et o.

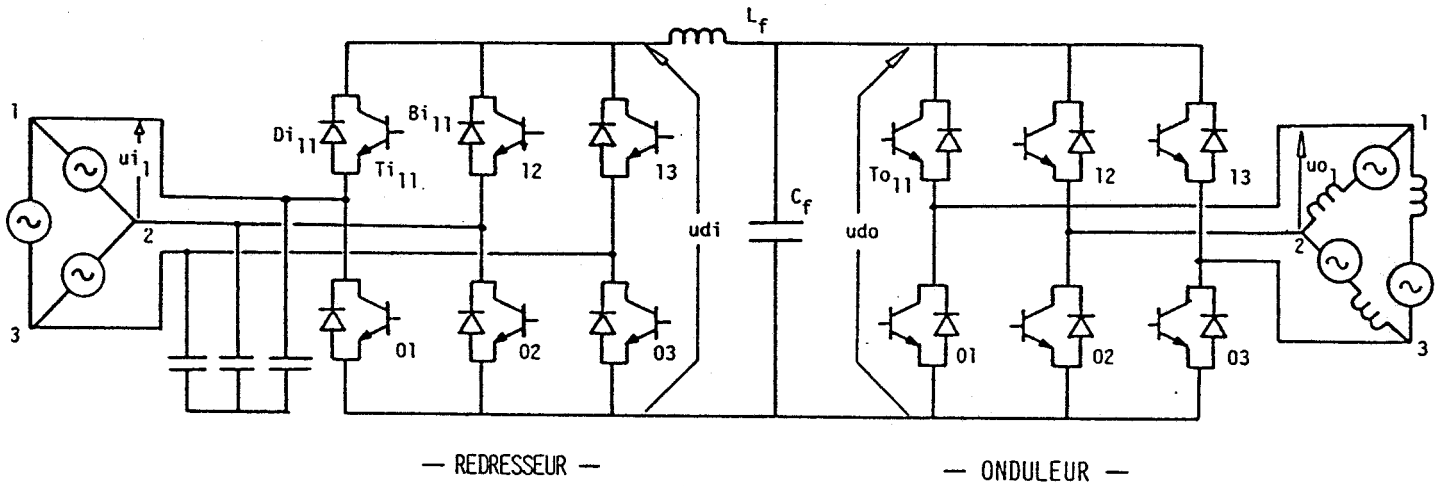


Figure 2.4 : Montage étudié

Afin de concevoir un modèle numérique du changeur de fréquence, nous procèderons dans un premier temps à l'analyse fonctionnelle et à la description par réseau de Pétri de chacun des montages.

2 - MODELISATION DE L'ONDULEUR TRIPHASE

2.1. Dénombrement des différentes connexions possibles - Configurations de fonctionnement /4 /

La recherche des différentes connexions possibles commence nécessairement par une observation de la nature des sources qui imposent des contraintes structurelles. Ainsi, la présence d'une source de tension unidirectionnelle à l'entrée de l'onduleur (figure 2.5) interdit la fermeture simultanée de deux interrupteurs d'une même branche (Ko_{sk} - $Ko_{s+1.k}$) avec $k \in \{1,2,3\}$.

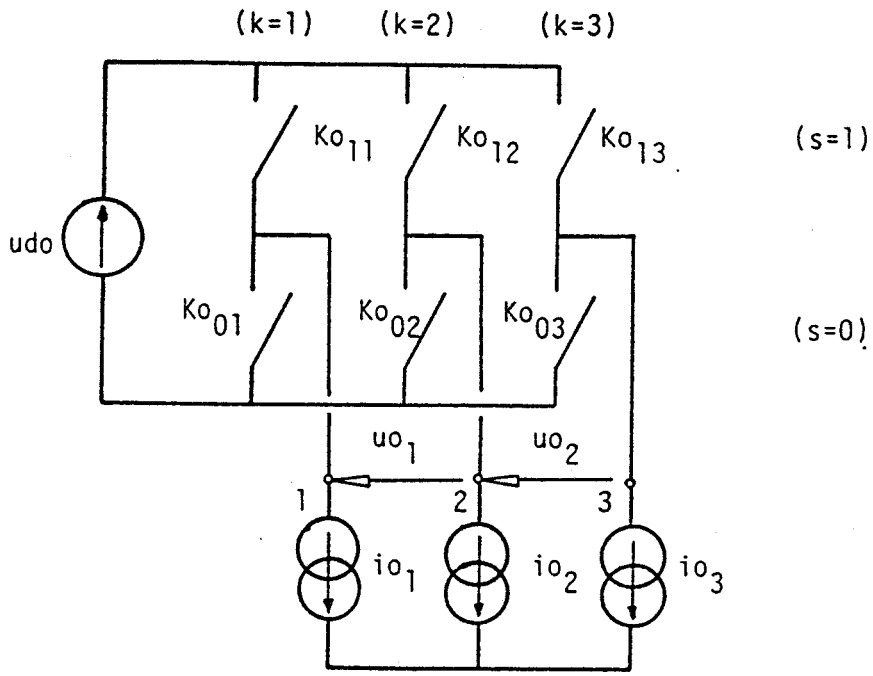


Figure 2.5 Schéma de principe de l'onduleur

La partie électrique fournit d'autres contraintes, puisque le récepteur de courant triphasé (3 fils) obéit aux équations suivantes :

$$io_1 + io_2 + io_3 = 0 \qquad (2.1)$$
$$uo_1 + uo_2 + uo_3 = 0 \qquad (2.2)$$

A partir de celles-ci, il est aisé de distinguer trois cas :

1 - Tous les courants de sortie sont différents de zéro : dans chaque branche un élément est conducteur, ce qui assure une alimentation triphasée de la charge. Les tensions de sortie s'expriment alors directement en fonction de la tension d'entrée.

2 - Un courant de sortie est nul : l'état électrique de la phase concernée est fixé par la tension qu'impose la charge (si celle-ci est active) alimentée dans ces conditions en monophasé.

3 - Les trois courants de sortie sont nuls : l'état électrique des interrupteurs ouverts est conditionné par trois générateurs de tension : eo_1, eo_2, eo_3 représentant les forces électromotrices de la charge lorsque celle-ci est apparemment déconnectée.

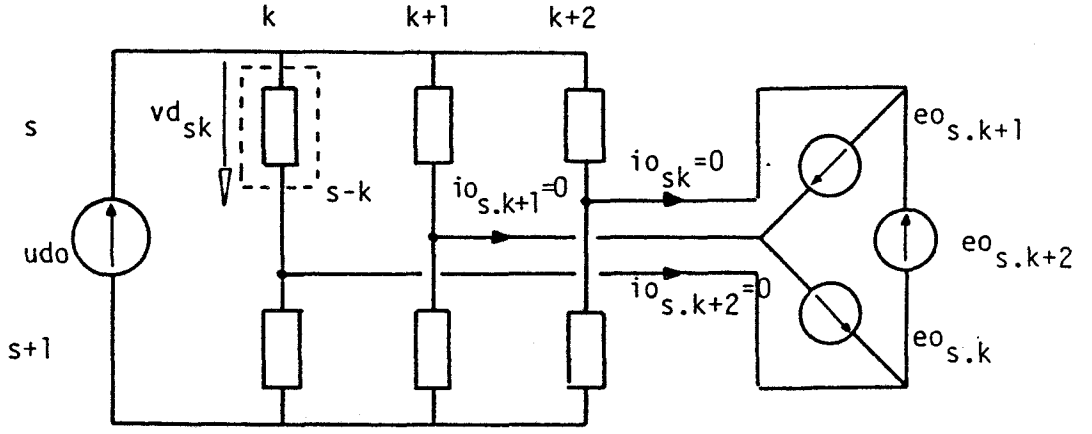


Figure 2.6 : - Aucun élément conducteur -
Etat électrique des interrupteurs

La répartition des tensions aux bornes de chaque interrupteur ouvert (figure 2.6) est calculée en remplaçant ceux-ci par des impédances identiques de valeur importante, et en appliquant le principe de superposition. Deux contributions sont considérées :

- l'application de la tension continue, udo, seule,
- la contribution du système de tensions triphasées eo_{sk}, $eo_{s.k+1}$, $eo_{s.k+2}$ qui forme un ensemble de tensions liées.

La tension aux bornes de l'interrupteur indicé s - k s'écrit donc :

$$vd_{sk} = \frac{-udo}{2} + \frac{eo_{sk} - eo_{sk+2}}{3} \qquad (2.3)$$

Le dénombrement systématique des différentes configurations de fonctionnement s'obtient facilement, au moyen d'arbres de choix. La figure 2.7 donne toutes les classes de fonctionnement possibles, lorsque dans chaque branche un composant (quelle qu'en soit sa nature) est conducteur. Nous avons préféré l'utilisation de flèches visualisant directement la position de l'élément concerné dans le pont, à la notation indicée.

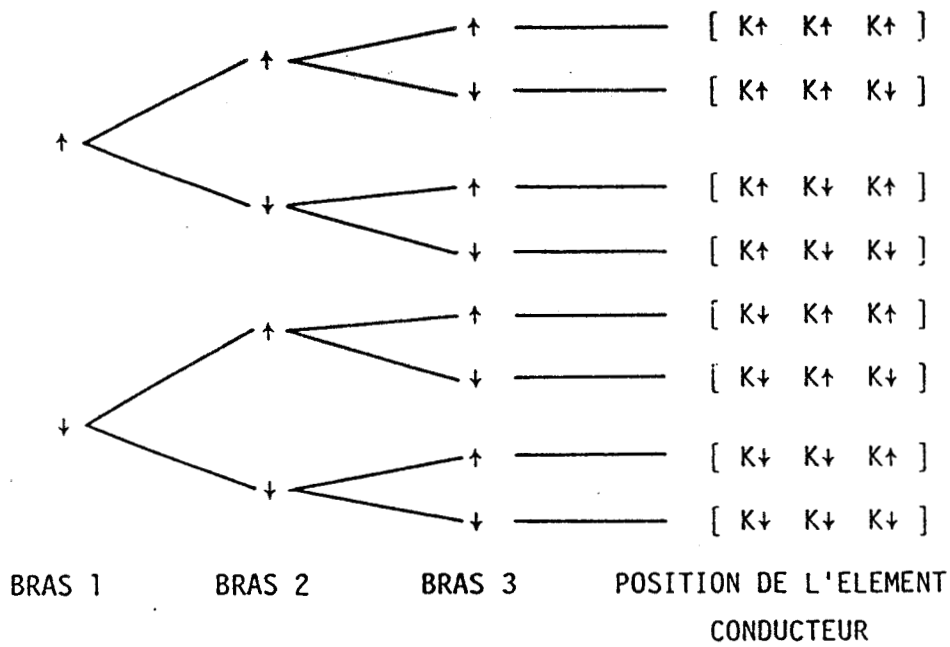


Figure 2.7 : Différentes classes de fonctionnement
(3 composants conducteurs)

Lorsque le courant io_1 est nul, aucun composant n'est conducteur dans le premier bras (position repérée par : 0 sur la figure 2.8) , les différentes classes de fonctionnement sont déterminées par un arbre de choix affectant les bras 2 et 3. Une permutation circulaire sur les bras nous donne toutes les autres possibilités (figure 2.8).

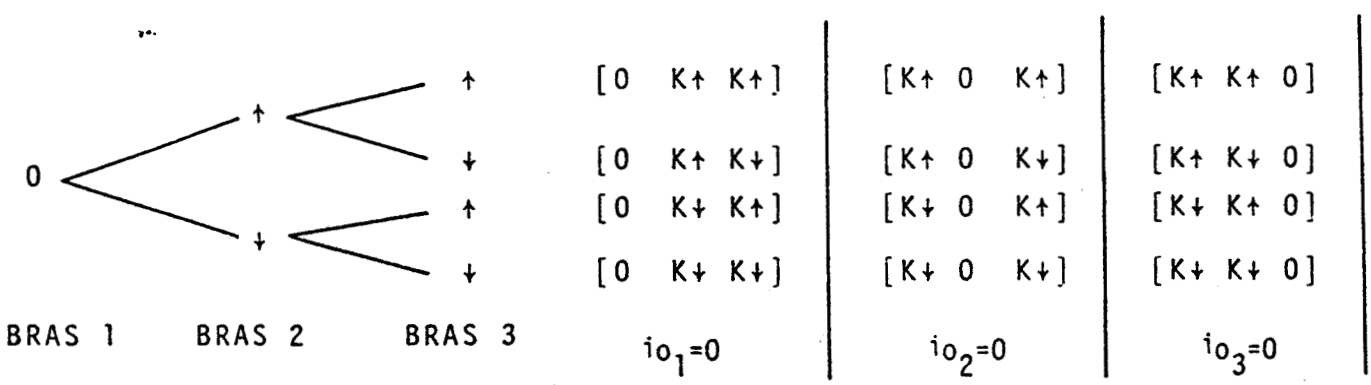


Figure 2.8 : Différentes classes de fonctionnement
(2 composants conducteurs)

* ALIMENTATION TRIPHASEE

[K+ K+ K+] :	[T+ T+ T+]	[K+ K+ K+] :	[T+ T+ T+]
	[T+ D+ T+]		[T+ T+ D+]
	[T+ D+ D+]		[T+ D+ D+]
	[D+ T+ T+]		[D+ T+ T+]
	[D+ T+ D+]		[D+ D+ T+]
	[D+ D+ D+]		[D+ D+ D+]
[K+ K+ K+] :	[T+ T+ T+]	[K+ K+ K+] :	[T+ T+ T+]
	[T+ T+ D+]		[T+ T+ D+]
	[T+ D+ T+]		[T+ D+ T+]
	[D+ T+ D+]		[D+ T+ D+]
	[D+ D+ T+]		[D+ D+ T+]
	[D+ D+ D+]		[D+ D+ D+]
[K+ K+ K+] :	[T+ T+ T+]	[K+ K+ K+] :	[T+ T+ T+]
	[T+ T+ D+]		[T+ D+ T+]
	[T+ D+ D+]		[T+ D+ D+]
	[D+ T+ T+]		[D+ T+ T+]
	[D+ D+ T+]		[D+ T+ D+]
	[D+ D+ D+]		[D+ D+ D+]
[K+ K+ K+] :	[T+ T+ D+]	[K+ K+ K+] :	[T+ T+ D+]
	[T+ D+ T+]		[T+ D+ T+]
	[T+ D+ D+]		[T+ D+ D+]
	[D+ T+ T+]		[D+ T+ T+]
	[D+ T+ D+]		[D+ T+ D+]
	[D+ D+ T+]		[D+ D+ T+]

* ALIMENTATION MONOPHASEE

[0 K+ K+] :	[0 T+ T+]	[0 K+ K+] :	[0 T+ T+]
	[0 D+ D+]		[0 D+ D+]
[0 K+ K+] :	[0 T+ D+]	[0 K+ K+] :	[0 T+ D+]
	[0 D+ T+]		[0 D+ T+]
[K+ 0 K+] :	[T+ 0 T+]	[K+ 0 K+] :	[T+ 0 T+]
	[D+ 0 D+]		[D+ 0 D+]
[K+ 0 K+] :	[T+ 0 D+]	[K+ 0 K+] :	[T+ 0 D+]
	[D+ 0 T+]		[D+ 0 T+]
[K+ K+ 0] :	[T+ T+ 0]	[K+ K+ 0] :	[T+ T+ 0]
	[D+ D+ 0]		[D+ D+ 0]
[K+ K+ 0] :	[T+ D+ 0]	[K+ K+ 0] :	[T+ D+ 0]
	[D+ T+ 0]		[D+ T+ 0]

* CHARGE APPAREMMENT DECONNECTEE

[0 0 0]

Figure 2.9 : Configurations de fonctionnement de l'onduleur triphasé

Les interrupteurs étant constitués d'un transistor monté en antiparallèle sur une diode, pour chaque triplet précédemment défini, il convient d'envisager toutes les associations transistor-diode possibles. Le tableau 2.9 résume toutes les configurations de fonctionnement respectant l'équation (2.1) ; 73 configurations différentes sont ainsi recensées. La modélisation et l'étude d'un tel montage ne peuvent s'envisager directement, la recherche d'une classification et d'un formalisme plus appropriés à la réduction du nombre de cas s'avère donc nécessaire.

2.2. Description fonctionnelle de l'onduleur

Procédons alors, comme au chapitre 1, à un regroupement par la commande puis à l'étude d'une configuration génératrice indicée par les variables s et k.

2.2.1 Notations et définition des indices

L'état de la variable binaire s définit le commutateur supérieur ou inférieur du pont (figure 2.10a) tandis que la variable k désigne le bras étudié (figure 2.10b). Pour simplifier les écritures on notera :

$$k1 = (k) \text{ MOD } 3 + 1$$

$$k2 = (k+1) \text{ MOD } 3 + 1 \qquad \text{avec } k \in \{1,2,3\} \qquad (2.4)$$

$$s1 = (s+1) \text{ MOD } 2 = \overline{s} \qquad \text{avec } s \in \{0,1\} \qquad (2.5)$$

Les opérateurs MOD 3 et MOD 2 sont tels que :

(3) MOD 3 = 0 (1) MOD 2 = 1
(2) MOD 3 = 2 (2) MOD 2 = 0
(1) MOD 3 = 1

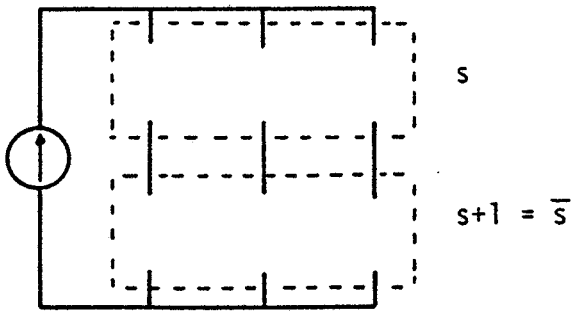


Figure 2.10a

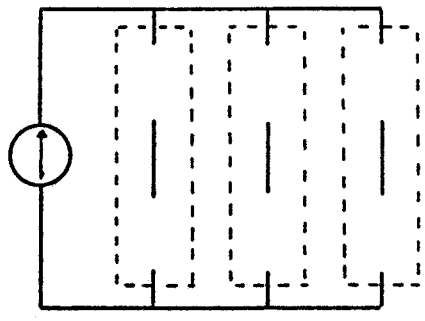


Figure 2.10b

Définition des indices s et k

2.2.2 Décomposition en classes de commande

Pour une branche k, la commande peut être représentée par le couple $(Bo_{sk}, Bo_{s1.k})$; au niveau de l'onduleur, une observation branche par branche définit donc totalement celle-ci par le triplet :

$$\mathcal{C}o = [\,(Bo_{sk}, Bo_{s1k}), (Bo_{sk1}, Bo_{s1.k1}), (Bo_{sk2}, Bo_{s1.k2})\,]$$

Le domaine de définition de chaque couple est restreint à l'ensemble : { (0,0), (0,1), (1,0) } puisque la source de tension udo interdit la combinaison (1,1). En utilisant les notations condensées définies au paragraphe 3.2 (chapitre 1), cet ensemble s'écrit : { 0,↓,↑ } (figure 2.11)

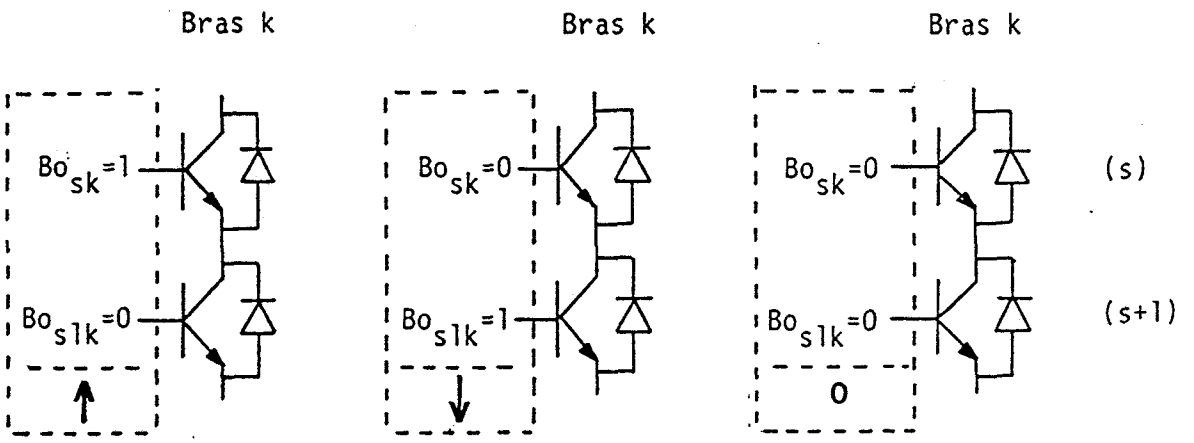


Figure 2.11 : Notation pour la commande d'un bras

Les différentes possibilités de commander l'onduleur se scindent en quatre classes établies à partir du nombre de transistors commandés :

- classe 0 : aucun transistor commandé, le triplet $\mathcal{C}o \in$ [0,0,0]
- classe 1 : un transistor commandé, le triplet $\mathcal{C}o \in$ [↑,0,0]
- classe 2 : deux transistors commandés, le triplet $\mathcal{C}o \in$ [↑,↓,0]
  ou $\mathcal{C}o \in$ [↑,↑,0]
- classe 3 : trois transistors commandés, le triplet $\mathcal{C}o \in$ [↑,↓,↓]
  ou $\mathcal{C}o \in$ [↑,↑,↑]

Chacun des triplets de commande est représenté par son "terme générateur", choisi arbitrairement. Il ne faut donc par perdre de vue que, sous cette "étiquette", se regroupent en fait six mots de commande.

Le tableau ci-dessous explicite comment, à partir du terme générateur [↑,↓,0] , on déduit les autres triplets.

	k	k+1	k+2	
Terme générateur	[↑ ↓ o]	[o ↑ ↓]	[↓ o ↑]	s
	[↓ ↑ o]	[o ↓ ↑]	[↑ o ↓]	s+1

Tableau 2.12
Classe de commande : $\mathcal{C}o \in$ [↑ ↓ o]

Le passage d'une ligne à la seconde s'effectue en complémentant la variable s ; le passage d'une colonne à la suivante s'accompagne d'une incrémentation de l'indice k, les opérations sur ce dernier s'effectuent modulo 3.

2.2.3 Réseaux de Pétri

2.2.3.a Réseau des macroplaces

La figure 2.13 donne le réseau de Pétri qui découle directement de la décomposition précédente.

Le pointeur, initialement dans la place centrale de choix (Ec), se dirige vers l'une des macroplaces périphériques selon la valeur du triplet de commande $\mathcal{C}o$; ce triplet générateur est dès lors mémorisé, et le changement de classe (par retour à la place centrale) n'est autorisé que s'il y a un changement de commande : $\Delta\mathcal{C}o = 1$.

Pour ne pas compliquer les réseaux de Pétri de chacune des macroplaces, nous avons préféré les détailler dans un tableau reprenant les caractéristiques essentielles de chaque place, à savoir :

- Réceptivité d'accès,
- Réceptivités et places de sortie,
- Tensions et mode d'alimentation de la charge,
- Générateur de configuration.

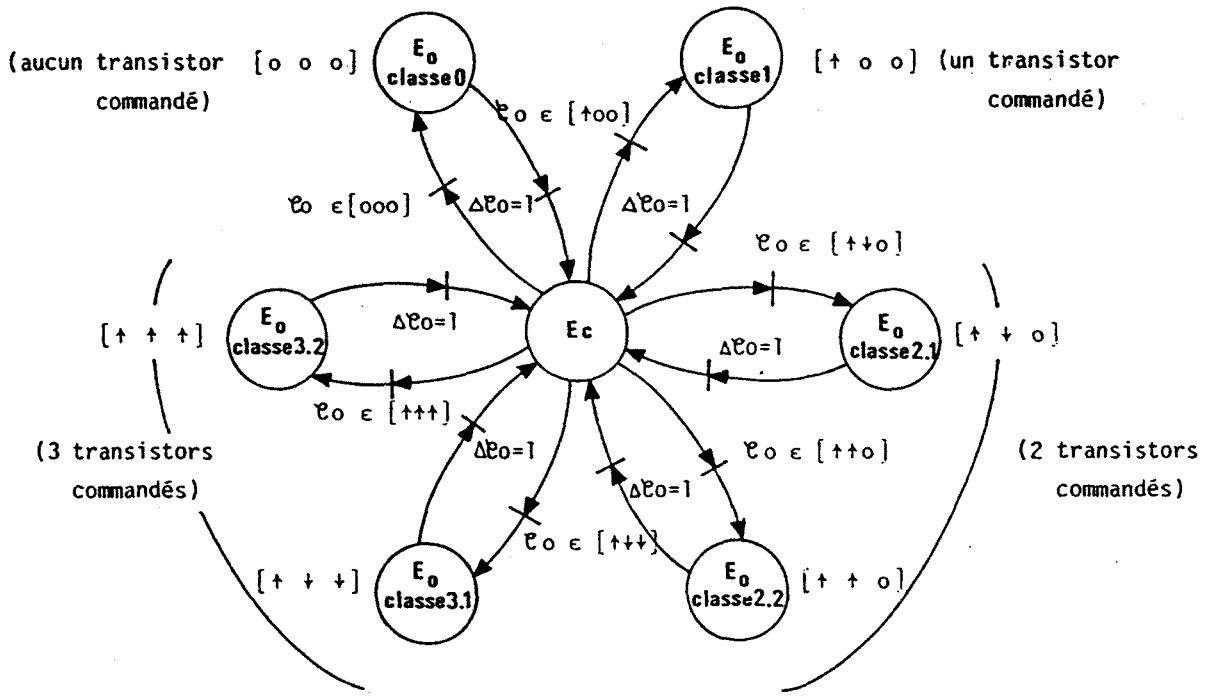


Figure 2.13 : Réseau des macroplaces de commande

2.2.3.b Structure de la macroplace [0 0 0]

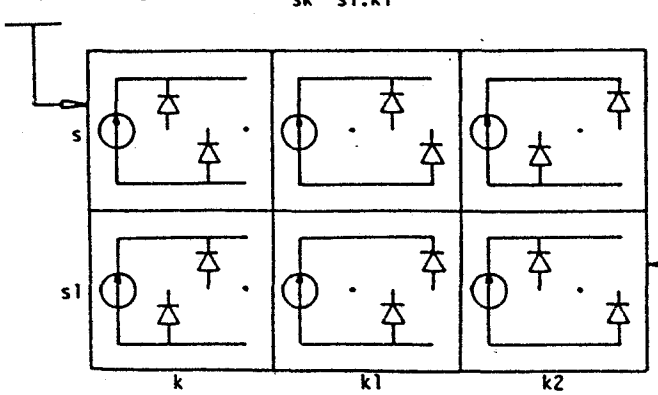
Lorsqu'aucun transistor n'est commandé, l'observation du signe des courants issus de chaque branche nous donne directement les différents cas possibles. Le réseau de Pétri, dans ces conditions, comporte 6 places (tableau 2.14).

Les ensembles des configurations possibles issues des termes générateurs $[D_{sk}-D_{s1.k1}-0]$ (place $E_0$2a) et $[D_{sk}-0-D_{s1.k2}]$ (place $E_0$2b) sont représentés par les tableaux 2.15, ci-après. Ces tableaux sont similaires, aux valeurs d'indices s et k près. En effet, la configuration de fonctionnement $[D_{sk}-0-D_{s1.k2}]$ est obtenue à partir de la configuration génératrice $[D_{sk}-D_{s1.k1}-0]$ en remplaçant s par s+1 et k par k+2. Si l'on tient compte de cette correction d'indice lors du franchissement des réceptivités d'entrée des places ($E_0$2a) et ($E_0$2b), celles-ci peuvent être fusionnées.

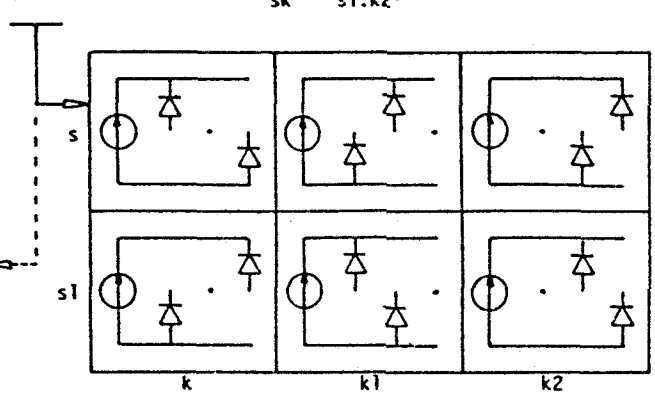
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSIONS DE SORTIE (uo_k, uo_{k1}, uo_{k2}) Mode d'alimentation	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACES DE SORTIE
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}=0$, $io_{sk1}=0$, $io_{sk2}=0$)	E_o†	udo, eo_1, eo_1, eo_2	(eo_k, eo_{k1}, eo_{k2}) Déconnecté	$vd_{sk}=0$† & $vd_{s1.k1}=0$†	E_o2a
				$vd_{sk}=0$† & $vd_{s1.k2}=0$†	E_o2b
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}>0$, $io_{sk2}=0$)	E_o2a	udo, $ue_{s\,k2}$, $ue_{s\,k1}$	(udo, ue_{k1}, ue_{k2}) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk1} = 0$†	E_o1
				$ue_{sk1} = 0$†	E_o3a
				$ue_{sk2} = 0$†	E_o3c
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}=0$, $io_{sk2}>0$)	E_o2b	udo, $-ue_{s\,k}$, $-ue_{s\,k1}$	(ue_k, ue_{k1}, -udo) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk2} = 0$†	E_o1
				$ue_{sk1} = 0$†	E_o3a
				$ue_{sk} = 0$†	E_o3b
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}>0$, $io_{sk2}>0$)	E_o3a	udo	(udo, 0, -udo) Triphasé	$io_{sk} = 0$†	E_o1
				$io_{sk1} = 0$†	E_o2b
				$io_{sk2} = 0$†	E_o2a
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}<0$, $io_{sk2}>0$)	E_o3b		(0, udo, -udo) Triphasé	$io_{sk} = 0$† (k→k+1)	E_o2a
				$io_{sk2} = 0$†	E_o1
				$io_{sk1} = 0$†	E_o2b
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}>0$, $io_{sk2}<0$)	E_o3c		(udo, -udc, 0) Triphasé	$io_{sk} = 0$ † (k →k+2)	E_o2b
				$io_{sk2} = 0$†	E_o2a
				$io_{sk1} = 0$†	E_o1

Tableau 2.14 : Macroplace [0 0 0]

Configuration génératrice [D_{sk} $D_{s1.k1}$ 0]



Configuration génératrice [D_{sk} 0 $D_{s1.k2}$]



Tableaux 2.15 : Configurations de fonctionnement associées aux places E_o2a et E_o2b

De même, pour les places $E_0 3b$ et $E_0 3c$, les configurations $[D_{sk}-D_{sk1}-D_{s1.k2}]$ et $[D_{sk}-D_{s1.k1}-D_{sk2}]$ sont obtenues à partir de la configuration génératrice $[D_{sk}-D_{s1.k1}-D_{s1.k2}]$ en remplaçant respectivement les indices s et k par s+1, k+2 et s+1, K+1 (voir tableau 2.16)

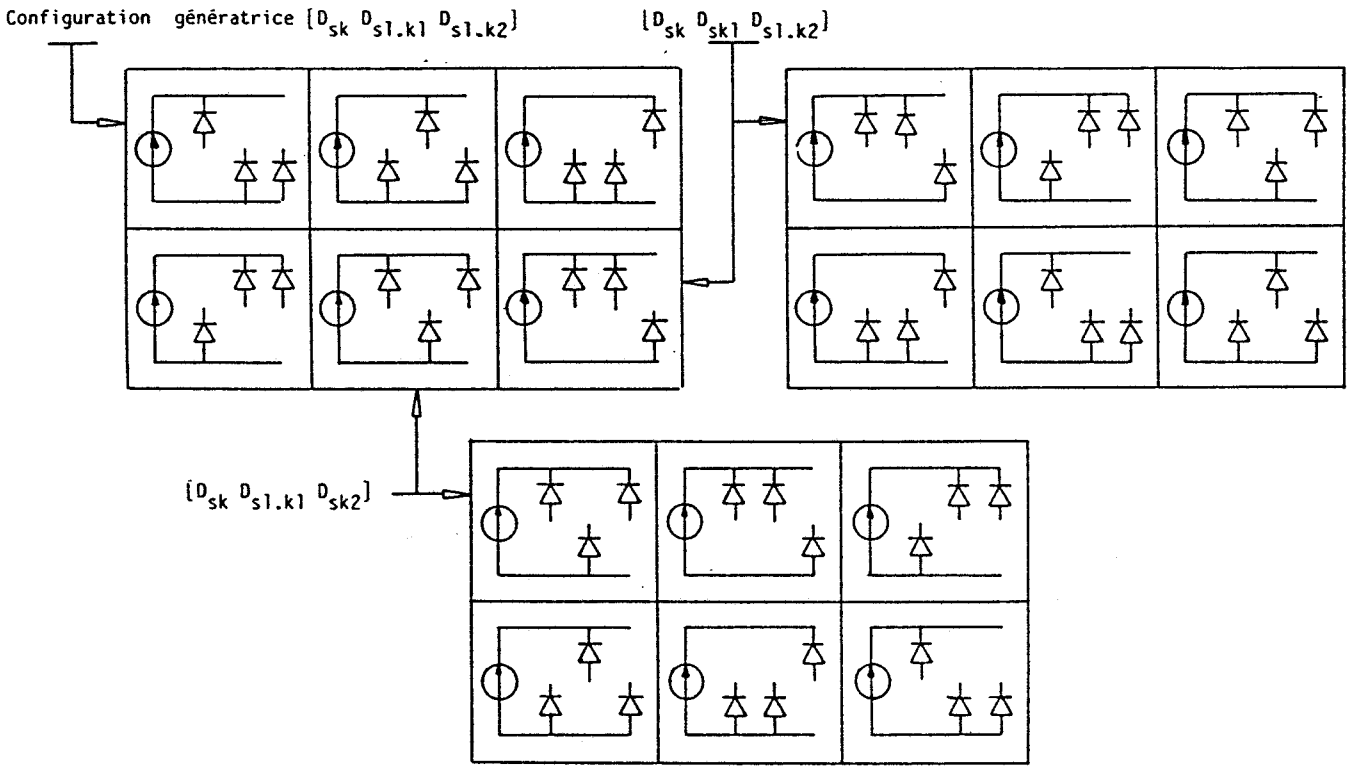


Figure 2.16 : Configurations de fonctionnement associées aux places $E_0 3a$, $E_0 3b$, $E_0 3c$

Après fusionnement, nous observons que le réseau de Pétri associé à la macroplace se réduit à 3 places (voir tableau 2.17 et figure 2.18).

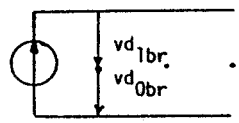
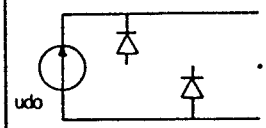
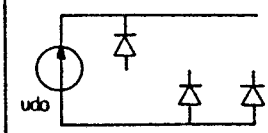
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSIONS DE SORTIE (uo_k, uo_{k1}, uo_{k2}) Mode d'alimentation	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACES DE SORTIE
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}=0$, $io_{sk1}=0$, $io_{sk2}=0$)	E_o1		(eo_k, eo_{k1}, eo_{k2}) Déconnecté	$vd_{1br} = 0\uparrow$ & $vd_{0br1} = 0\uparrow$ $k \leftarrow br$, $s \leftarrow 1$	E_o2a
				$vd_{1br} = 0\uparrow$ & $vd_{0br2} = 0\uparrow$ $k \leftarrow br2$, $s \leftarrow 0$	
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}>0$, $io_{sk2}=0$)	E_o2a		(udo, ue_{k1}, ue_{k2}) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk1} = 0\downarrow$	E_o1
				$ue_{sk1} = 0\downarrow$	E_o3a
				$ue_{sk} = 0\downarrow$ $(k \leftarrow k+1,\ s \leftarrow s+1)$	
$\mathcal{E}o \in [0\ 0\ 0]$ & ($io_{sk}<0$, $io_{sk1}>0$, $io_{sk2}>0$)	E_o3a		(udo, 0, -udo) Triphasé	$io_{sk} = 0\downarrow$	E_o1
				$io_{sk1} = 0\downarrow (k \leftarrow k+2,\ s \leftarrow s+1)$	E_o2a
				$io_{sk2} = 0\downarrow$	

Tableau 2.17 : Macroplàce [0 0 0] aprés regroupement

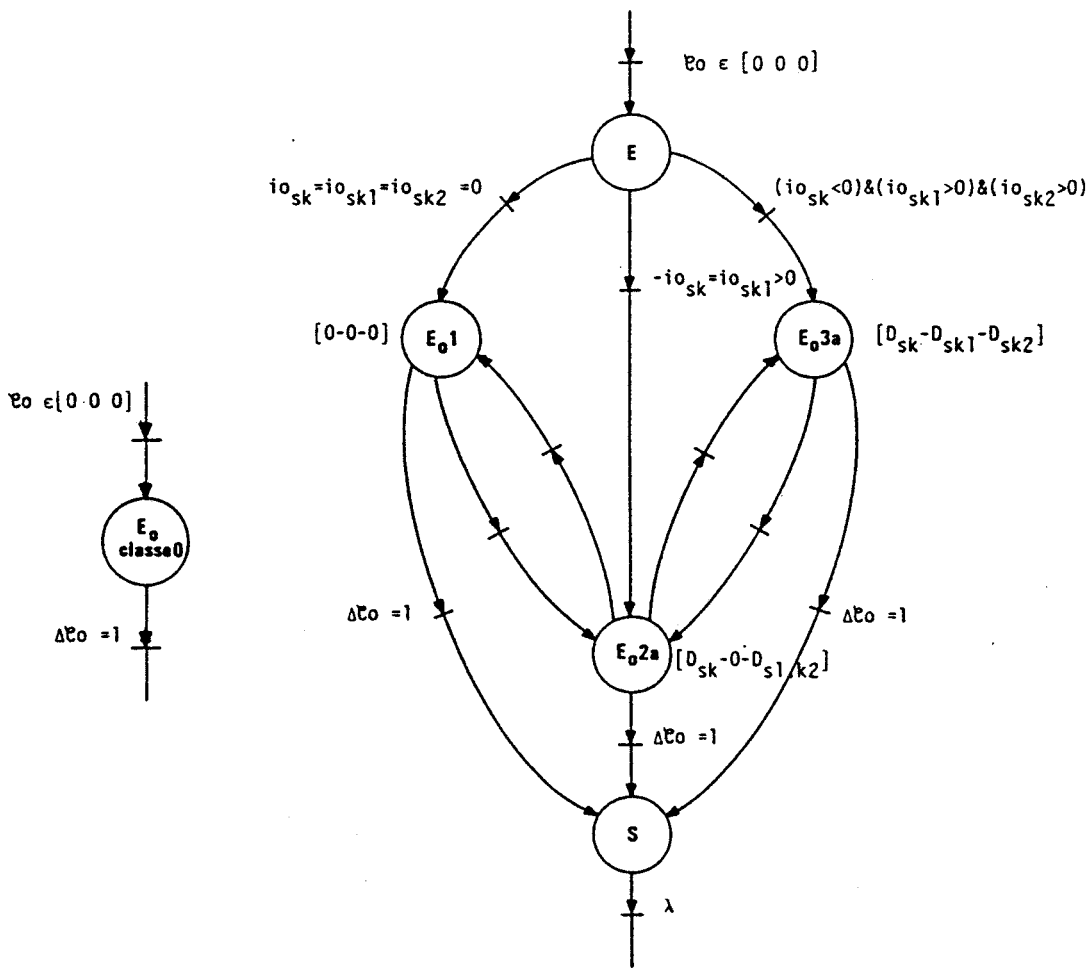


Figure 2.18 : Réseau de Pétri de la macroplace [0 0 0]

La réceptivité de sortie de l'étape $E_0 1$ (aucun élément conducteur) nécessite quelques explications. En effet, pour sortir de cette place, il convient :

- de calculer la tension aux bornes des diodes pour chaque commutateur (équation 2.3) soit :

$$vd_{1br} = \frac{-udo}{2} + \frac{1}{3}(eo_{1br} - eo_{1br2}) \qquad (2.6)$$

$$vd_{obr} = \frac{-udo}{2} + \frac{1}{3}(eo_{0br} - eo_{0br2})$$

$$= \frac{-udo}{2} - \frac{1}{3}(eo_{1br} - eo_{1br2}) \qquad (2.7)$$

avec br, indice de scrutation du domaine de k ; br égale successivement k, k_1, k_2.

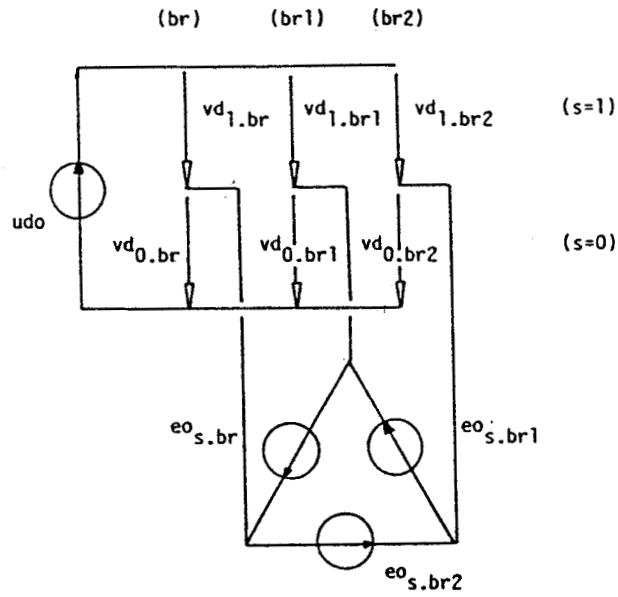


Figure 2.19 : Répartition des tensions
Aucun élément conducteur

- puis de rechercher, pour le commutateur à cathodes communes, la diode susceptible de conduire :

$$vd_{1k} = Sup(vd_{1br}) \qquad \text{avec } vd_{1k} > 0 \ ;$$

ceci donne la valeur de s et de br $\qquad k \leftarrow br$

$\qquad s \leftarrow 1$

- alors deux possibilités sont à envisager :

ou $vd_{0k1} = Sup(vd_{0br})$ et $vd_{0k1} > 0$, auquel cas il y a mise en conducteur de [D_{sk}-D_{s1k1}-0]

ou $vd_{0k2} = Sup(vd_{0br})$ et $vd_{0k2} > 0$, auquel cas il y a mise en conduction de [D_{sk}-0-D_{S1k2}]
et une correction d'indices s'impose $s \leftarrow 0$
$k \leftarrow br+2$

Sinon aucune diode ne conduit : [0-0-0]

2.2.3.c Structure de la macroplace [↑ 0 0]

Lorsqu'un seul transistor (T_{sk}) est commandé, la décomposition se complique puisque la classe de sortie est déterminée par le signe des courants sortant des deux bras non commandés. Ainsi, il ne reste plus qu'un seul terme générateur : [↑ 0 0] mais toutes les combinaisons entre les signes de io_{sk1} et io_{sk2} déterminent 9 cas possibles (tableau 2.20). Les indices s et k s'obtiennent facilement puisqu'ils sont directement fixés par le seul transistor commandé.

Les figures 2.21a et 2.21b donnent la forme du réseau de Pétri associé à cette macroplace. A cause du nombre important de transitions, nous avons choisi de scinder en deux parties la représentation du dit réseau, en séparant les réceptivités d'accès et sortie de la macroplace (figure 2.21a), des réceptivités dites "internes" (figure 2.21b).

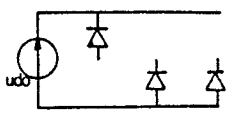
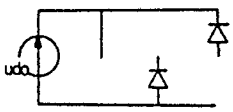
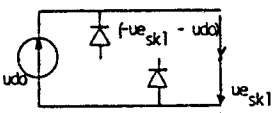
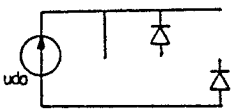
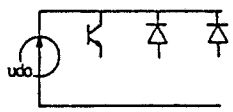
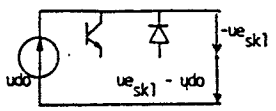
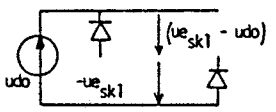
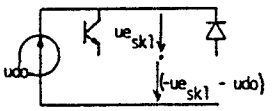
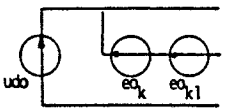
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSIONS DE SORTIE (uo_k, uo_{k1}, uo_{k2}) Mode d'alimentation	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACES DE SORTIE
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} > 0$, $io_{sk2} > 0$)	E_o4		(udo, 0, -udo) Triphasé	$io_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o10
				$io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o6
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} > 0$, $io_{sk2} < 0$)	E_o5		(udo, -udo, 0) Triphasé	$io_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o11
				$io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o6
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} > 0$, $io_{sk2} = 0$)	E_o6		(udo, ue_{k1}, ue_{k2}) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o12
				$ue_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o4
				$ue_{sk1} + udo = 0 \uparrow$	E_o5
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} < 0$, $io_{sk2} > 0$)	E_o7		(0, udo, -udo) Triphasé	$io_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o10
				$io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o9
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} < 0$, $io_{sk2} < 0$)	E_o8		(0, 0, 0) Triphasé	$io_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o11
				$io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o9
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} < 0$, $io_{sk2} = 0$)	E_o9		(0, ue_{k1}, ue_{k2}) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o12
				$ue_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o8
				$ue_{sk1} - udo = 0 \uparrow$	E_o7
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} = 0$, $io_{sk2} > 0$)	E_o10		(ue_k, ue_{k1}, -udo) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o12
				$ue_{sk1} - udo = 0 \uparrow$	E_o7
				$ue_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o4
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} = 0$, $io_{sk2} < 0$)	E_o11		(ue_k, ue_{k1}, 0) Monophasé	$-io_{sk} = io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o12
				$ue_{sk1} = 0 \uparrow$	E_o8
				$ue_{sk1} + udo = 0 \uparrow$	E_o5
$\mathcal{E}o \in [\uparrow o\ o]$ & ($io_{sk1} = 0$, $io_{sk2} = 0$)	E_o12		(eo_k, eo_{k1}, eo_{k2}) Déconnecté	$vd_{sk} = 0\uparrow$ & $vd_{s1.k2} = 0\uparrow$	E_o10
				($Bo_{sk} = 1$, $vd_{sk} < 0$) & $vd_{sk2} = 0\uparrow$	E_o11
				($Bo_{sk} = 1$, $vd_{sk} < 0$) & $vd_{sk1} = 0\uparrow$	E_o9
				$vd_{sk} = 0\uparrow$ & $vd_{s1.k1} = 0\uparrow$	E_o6

Tableau 2.20 : Macroplace [↑ 0 0]

avec : $vd_{sk} = -udo/2 + (1/3).(eo_{sk} - eo_{sk2})$

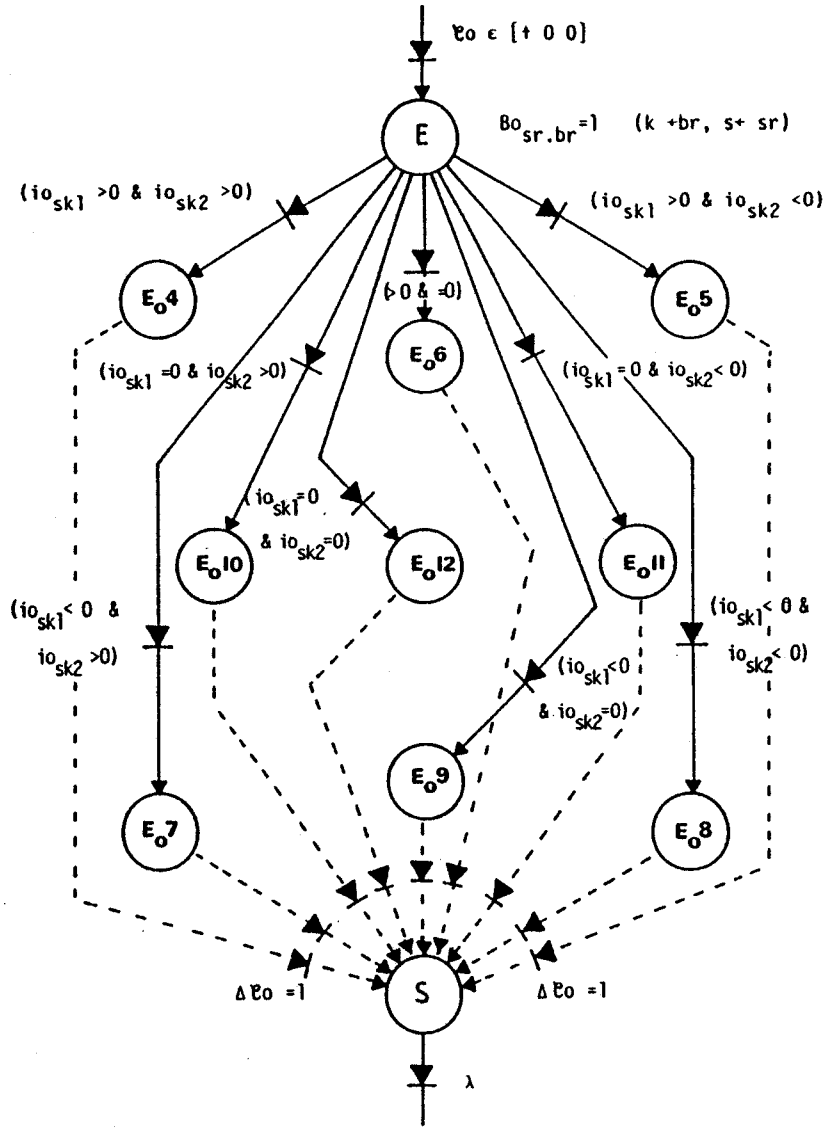


Figure 2.21a : Réceptivités d'accès et de sortie

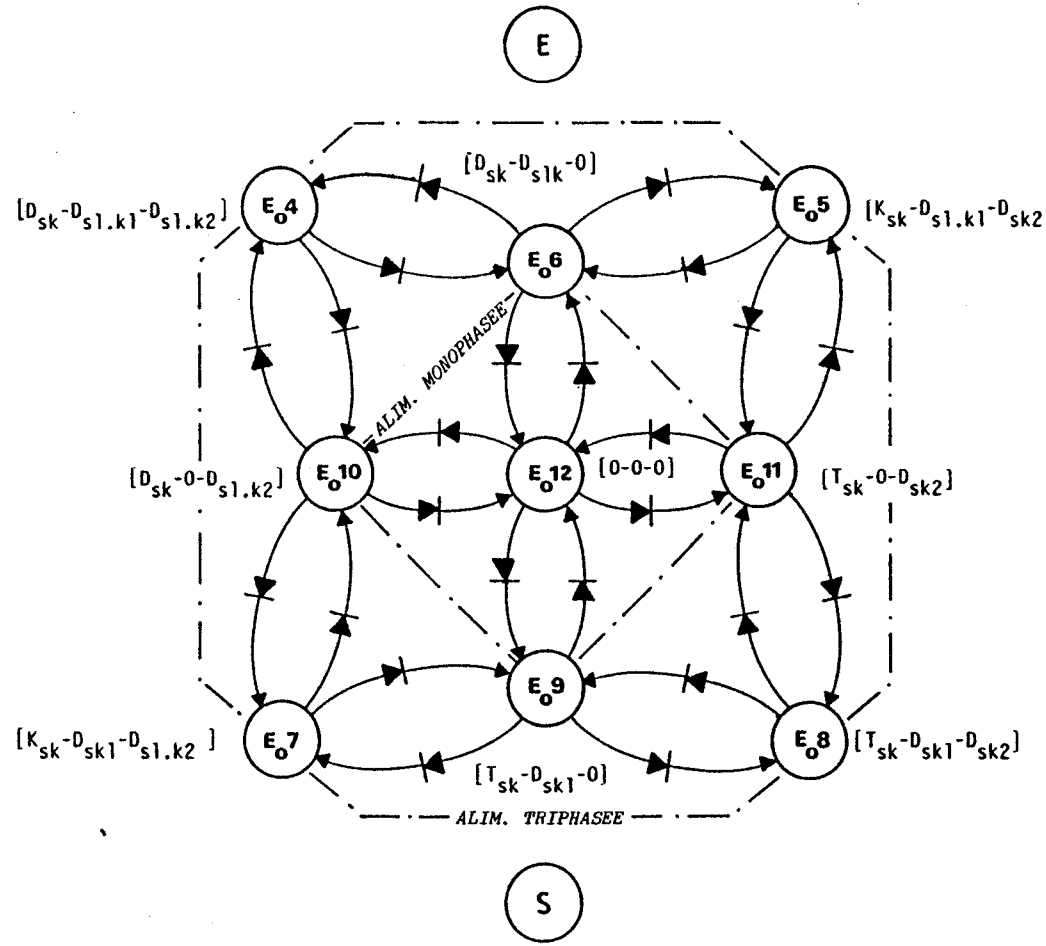


Figure 2.21b : Réceptivités "internes" à la macroplace

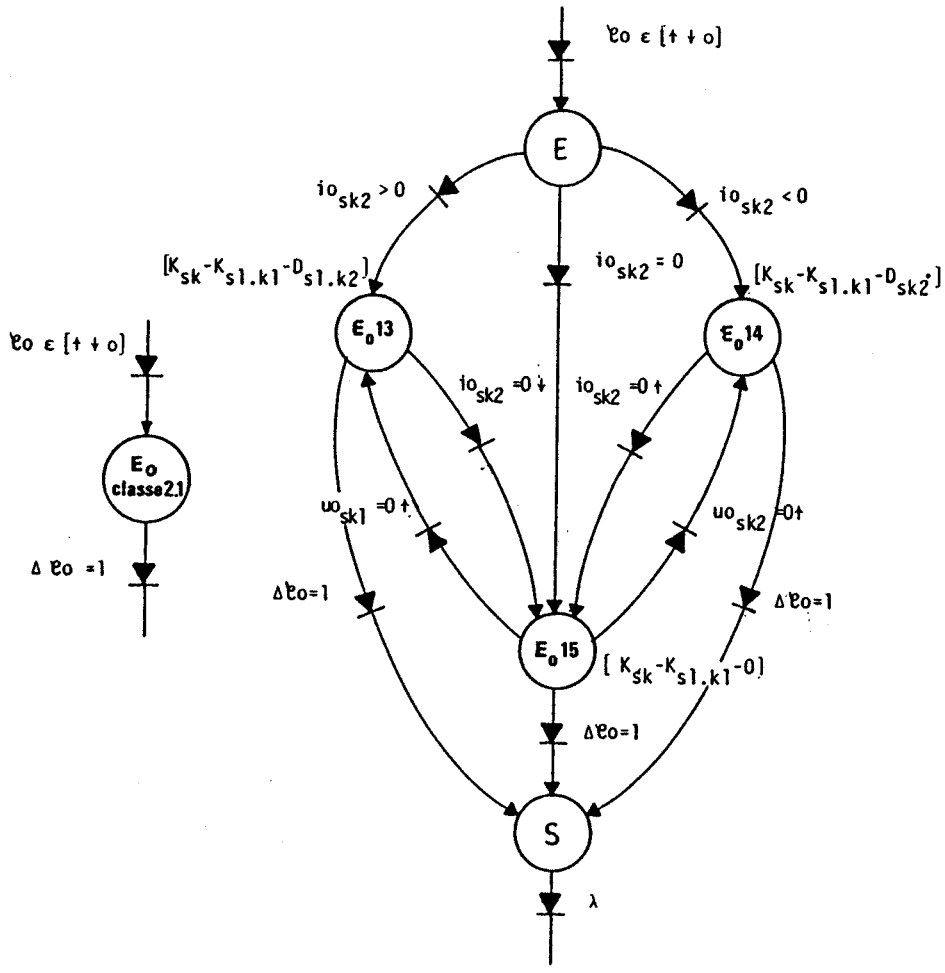


Figure 2.23a

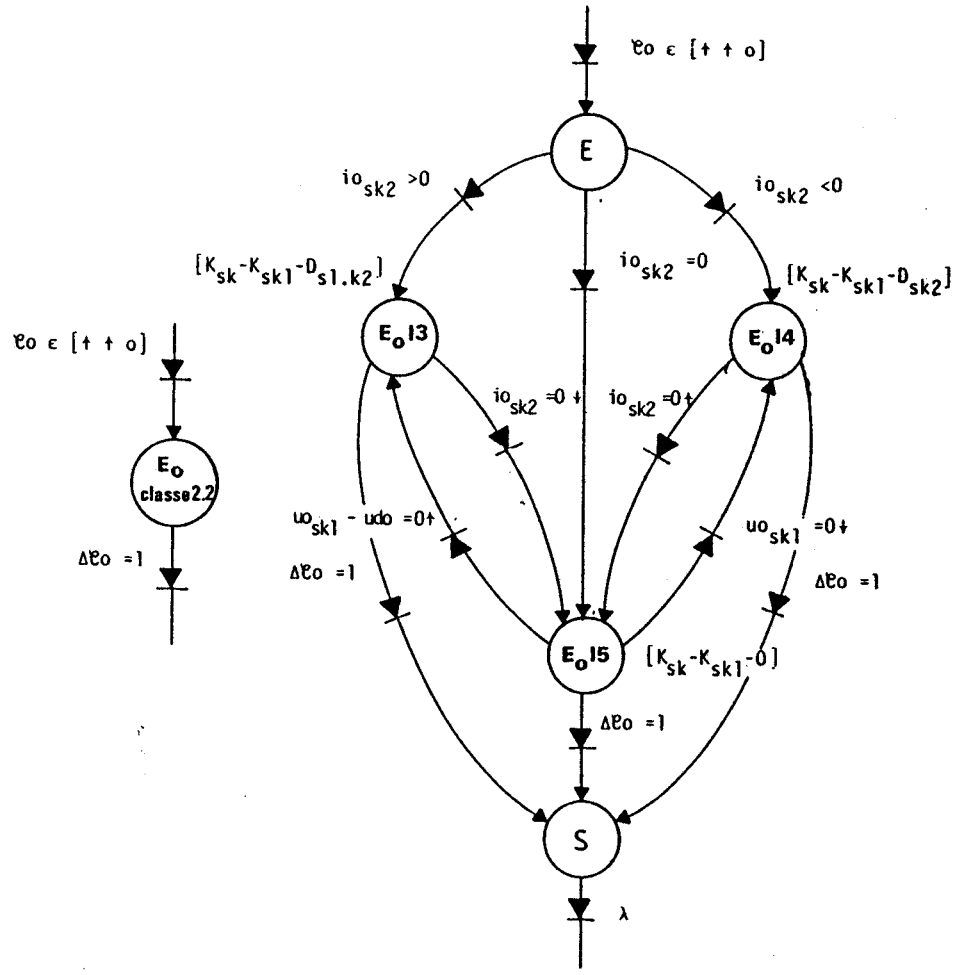


Figure 2.23b

2.2.3.d Macroplaces de la classe 2 : $\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow 0]$ ou $[\uparrow \uparrow 0]$

Pour deux transistors commandés, deux classes de commande sont envisagées : $[\uparrow \downarrow 0]$, et $[\uparrow \uparrow 0]$ et pour chacune d'elles, trois cas sont à distinguer suivant le signe du courant io_{sk2} dans le bras non commandé (voir tableaux ci-dessous). Chaque réseau de Pétri, figure 2.23, comporte trois places.

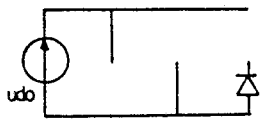
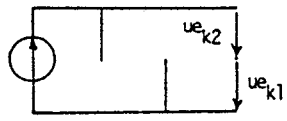
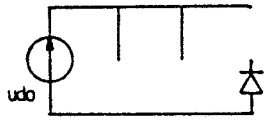
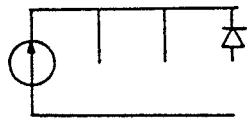
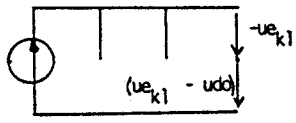
RECEPTIVITES D'ACCES	PLACE	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSIONS DE SORTIE (uo_k, uo_{k1}, uo_{k2}) Mode d'alimentation	RECEPTIVITES DE SORTIE	PLACES DE SORTIE
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow o]$ & $io_{sk2} > 0$	E_o13		(udo, 0, -udo) Triphasé	$io_{sk2} = 0 \downarrow$	E_o15
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow o]$ & $io_{sk2} < 0$	E_o14		(udo, -udo, 0) Triphasé	$io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o15
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow o]$ & $io_{sk2} = 0$	E_o15		(udo, ue_{k1}, ue_{k2}) Monophasé	$ue_{k1} = 0 \uparrow$ $ue_{k2} = 0 \uparrow$	E_o13 E_o14
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \uparrow o]$ & $io_{sk2} > 0$	E_o16		(0, udo, -udo) Triphasé	$io_{sk2} = 0 \downarrow$	E_o18
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \uparrow o]$ & $io_{sk2} < 0$	E_o17		(0, 0, 0) Triphasé	$io_{sk2} = 0 \uparrow$	E_o18
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \uparrow o]$ & $io_{sk2} = 0$	E_o18		(0, ue_{k1}, ue_{k2}) Monophasé	$ue_{k1} = 0 \downarrow$ $ue_{k1} - udo = 0 \uparrow$	E_o17 E_o16

Tableau 2.22

2.2.3.e Macroplaces de la classe 3 : $\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow \downarrow]$ ou $[\uparrow \uparrow \uparrow]$

Nous avons mis en évidence au chapitre 1, que l'ensemble transistor commandé monté tête-bêche sur une diode se comportait finalement comme un interrupteur fermé et ce quel que soit le signe du courant /32/. Par conséquent, lorsque trois transistors sont en permanence commandés, les tensions de sortie sont directement déterminées par le mot de commande.

Soit :

- si $\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow \downarrow]$, $(B_{sk} = 1,\ B_{s1.k1} = 1,\ B_{s1.k2} = 1)$ et

$$[uo_{sk}\ uo_{sk1}\ \ uo_{sk2}] = [udo\ o\ -\ udo]$$

- si $\mathcal{C}o \in [\uparrow \uparrow \uparrow]$, $(B_{sk} = 1,\ B_{sk1} = 1,\ B_{sk2} = 1)$ et

$$[uo_{sk},\ uo_{sk1},\ uo_{sk2}] = [0\ 0\ 0]$$

Dans chacun des cas, le réseau de Pétri ne comporte qu'une seule place, les réceptivités d'accès et de sortie se confondent avec les réceptivités d'entrée et sortie de la macroplace (tableau 2.24).

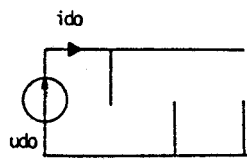
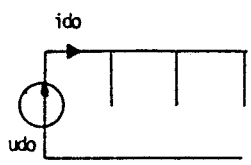
RECEPTIVITE D'ACCES	PLACE	GENERATEUR DE CONFIGURATION	TENSIONS DE SORTIE (uo_k, uo_{k1}, uo_{k2}) Mode d'alimentation
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \downarrow \downarrow]$	E_o19 (ou $E_o$classe3.1)		(udo, 0, -udo) Triphasé
$\mathcal{C}o \in [\uparrow \uparrow \uparrow]$	E_o20 (ou $E_o$classe3.2)		(0, 0, 0) Triphasé

Tableau 2.24 : Classe 3

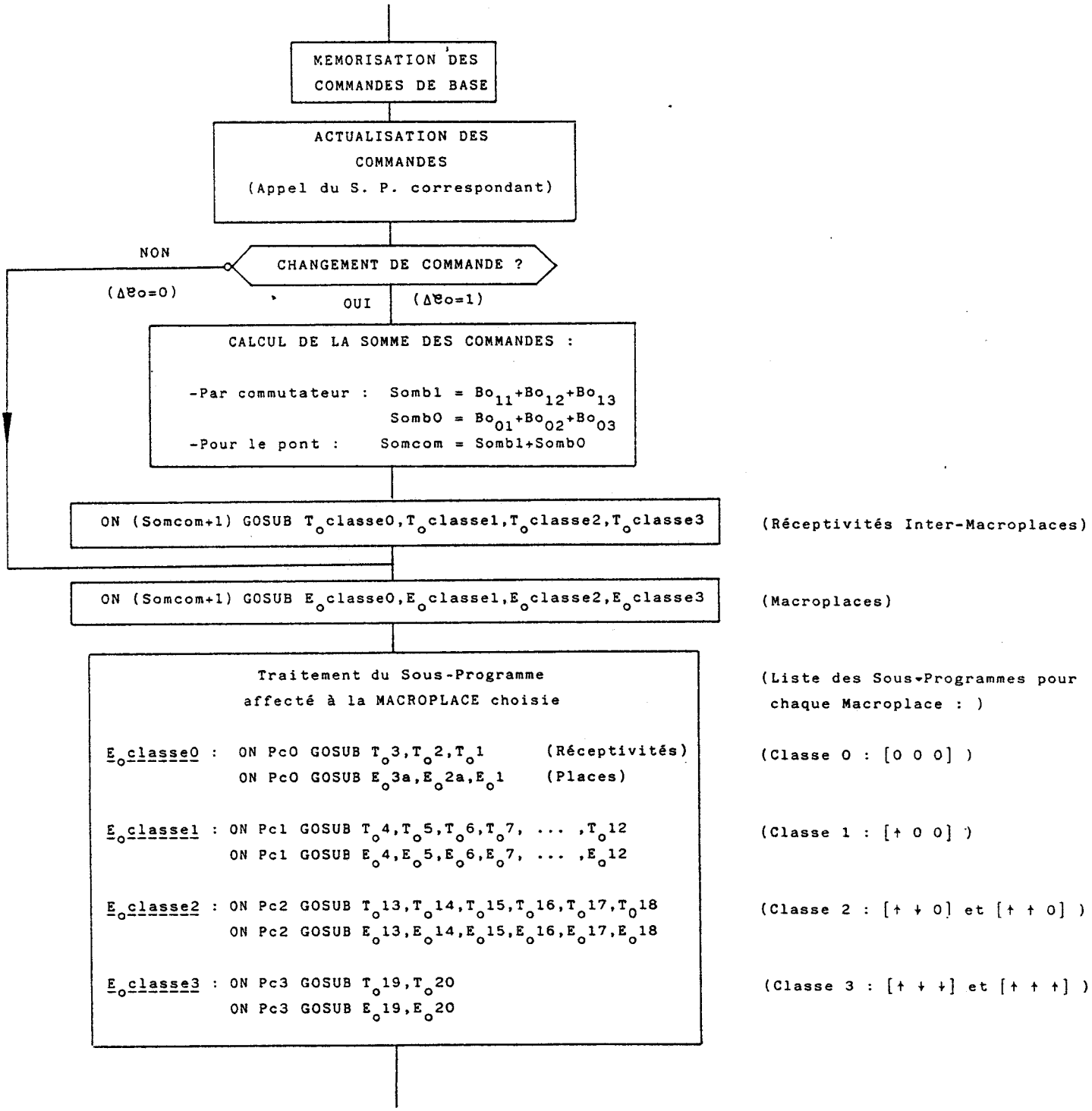


Figure 2.25 : Organigramme pour une boucle de calcul

2.3. Modèle numérique de l'onduleur

La description fonctionnelle conduit à la modélisation de l'onduleur au moyen des règles de transcription exposées au paragraphe 4 (chapitre 1). L'organisation du déroulement des sous-programmes est représentée figure 2.25. Un premier pointeur, directement établi à partir de la somme des commandes (Somcom+1), gère l'évolution dans le graphe des macroplaces (figure 2.13). C'est lui qui, par appel au sous-programme correspondant, permet d'accéder uniquement au réseau de places concernées par le mot de commande. Un nouveau pointeur affecté à la classe prend alors le relais et détermine les déplacements dans cette classe. A chaque boucle de calcul, le mot de commande est comparé au mot de commande mémorisé au cours de la boucle précédente ; en cas d'égalité, le pointeur du graphe des macroplaces n'est pas remis en cause et le programme se déroule uniquement dans la classe initialement choisie. Ceci a pour but de réduire les temps de calcul en évitant le test systématique des réceptivités inter-macroplaces.

2.4. Problèmes rencontrés

2.4.1 Alimentation monophasée

L'alimentation monophasée de la charge, obtenue lorsque dans une branche les éléments cessent de conduire, nécessite un traitement particulier des équations.

Ci-dessous, nous décrivons la démarche à suivre pour calculer les différentes grandeurs électriques lorsque la charge est couplée en triangle dans le cas particulier où le courant io_{k2} est nul.

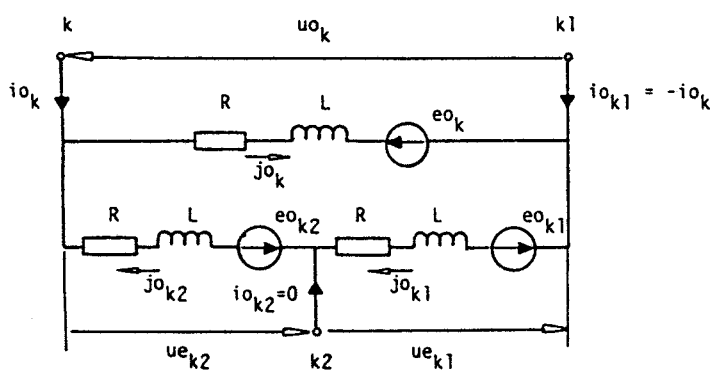


Figure 2.26 : Répartition des grandeurs électriques pour io_{sk2} =0

$$uo_k = R\ jo_k + L \frac{d}{dt} jo_k + eo_k \tag{2.8}$$

$$ue_{k1} = R\ jo_{k1} + L \frac{d}{dt} jo_{k1} + eo_{k1} \tag{2.9}$$

$$ue_{k2} = R\ jo_{k2} + L \frac{d}{dt} jo_{k2} + eo_{k2} \tag{2.10}$$

$$ue_{k1} + ue_{k2} = -\ uo_k \tag{2.11}$$

$$jo_{k1} = jo_{k2} \tag{2.12}$$

En tenant compte des équations (2.9), (2.10), (2.12), l'équation (2.11) devient :

$$ue_{k1} + ue_{k2} = R(jo_{k1} + jo_{k2}) + L \frac{d}{dt} (jo_{k1} + jo_{k2}) + eo_{k1} + eo_{k2}$$

$$= R(2jo_{k1}) + L \frac{d}{dt} (2jo_{k1}) + eo_{k1} + eo_{k2}$$

Par soustraction avec l'équation (2.8), et en supposant que la somme des f.c.e.m. est nulle, ($eo_k + eo_{k1} + eo_{k2} = 0$), on obtient :

$$0 = R(jo_k + 2jo_{k1}) + L \frac{d}{dt} (jo_k + 2jo_{k1})$$

soit : $(R + L \frac{d}{dt})(jo_k + 2jo_{k1}) = 0$

ou encore : $jo_{k1} = jo_{k2} = -(\frac{1}{2})\ jo_k$ (2.13)

Les courants en ligne s'écrivent donc :

$$io_k = jo_k - jo_{k2} = \frac{3}{2}\ jo_k$$

$$io_{k1} = jo_{k1} - jo_k = -(\frac{3}{2})\ jo_k$$

$$io_{k2} = 0$$

La valeur du courant jo_k est obtenue en intégrant l'équation (2.8), elle permet le calcul des autres courants. A partir de là, la répartition des tensions aux bornes de la charge, se détermine facilement par :

$$ue_{k1} = R(jo_{k1}) - \frac{1}{2}\,(\,uo_k - R.jo_k - eo_k\,) + eo_{k1} \qquad (2.14)$$

$$ue_{k2} = R(jo_{k2}) - \frac{1}{2}\,(\,uo_k - R.jo_k - eo_k\,) + eo_{k2} \qquad (2.15)$$

2.4.2 Traitement des inhibitions du temps

Le découpage fonctionnel adopté fait apparaître plusieurs types de réceptivités. D'une manière générale, on distingue :

- les réceptivités reliant les macroplaces exprimées uniquement à partir de conditions de commande,

- les réceptivités entre les places d'une même macroplace qui, elles, expriment soit une condition de tension (accompagnée d'une condition sur la commande pour les transistors), soit une condition de courant. La première condition -lorsqu'elle est vérifiée- permet la mise en conduction d'un composant, alors que la seconde entraîne son extinction.

Le traitement des inhibitions du temps qui, rappelons-le, a pour but de différencier l'annulation du courant de son passage par zéro, s'avère ici beaucoup plus délicat que pour une structure monophasée. En effet, l'annulation du courant dans une branche réduit le nombre de liaisons entre l'onduleur et sa charge. Pour un couplage en triangle, le mode d'alimentation de celle-ci passe donc de triphasé à monophasé (une tension imposée), puis de monophasé à "déconnecté" (aucune tension imposée).

La boucle d'inhibition se déroulera donc en trois temps (figure 2.27) :

- prise en compte de la réduction du nombre de liaisons source-charge à partir de l'annulation d'un courant, par activation du pointeur d'inhibition (inhib = 1),

- réactualisation des tensions aux bornes de chaque branche du triangle pour le mode d'alimentation concerné,

- second passage dans le graphe de la macroplace sélectionnée avec remise à zéro du pointeur d'inhibition (inhib = 0)

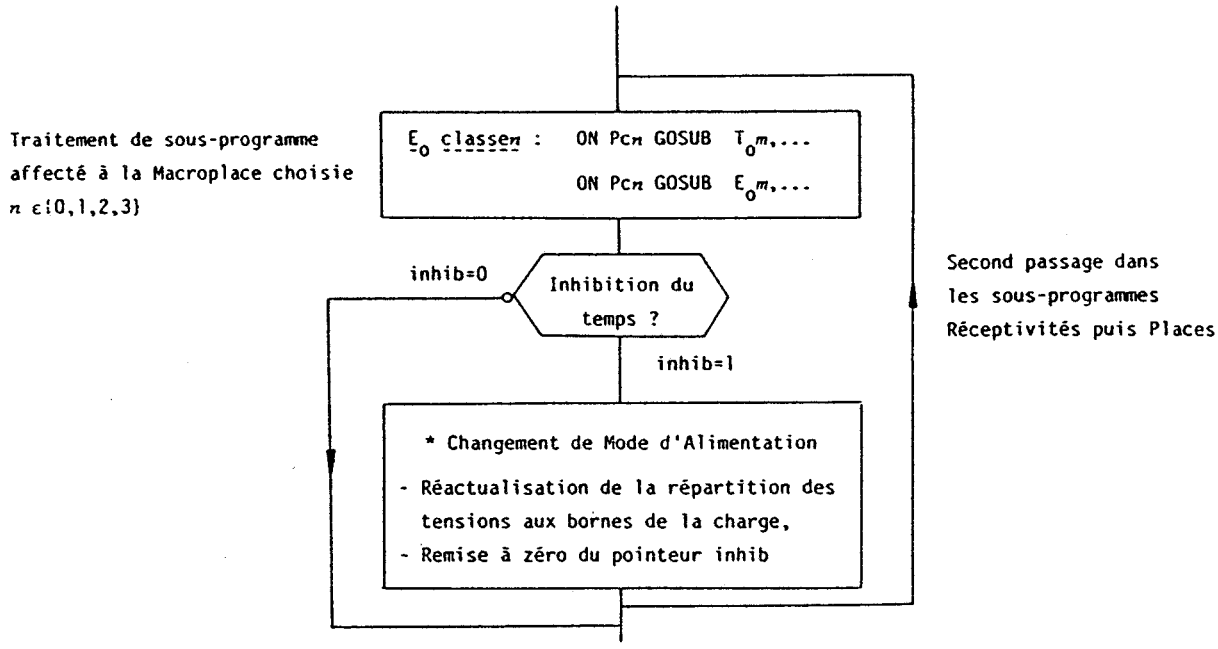


Figure 2.27 : Traitement des inhibitions du temps

2.5. Résultats - Conclusion

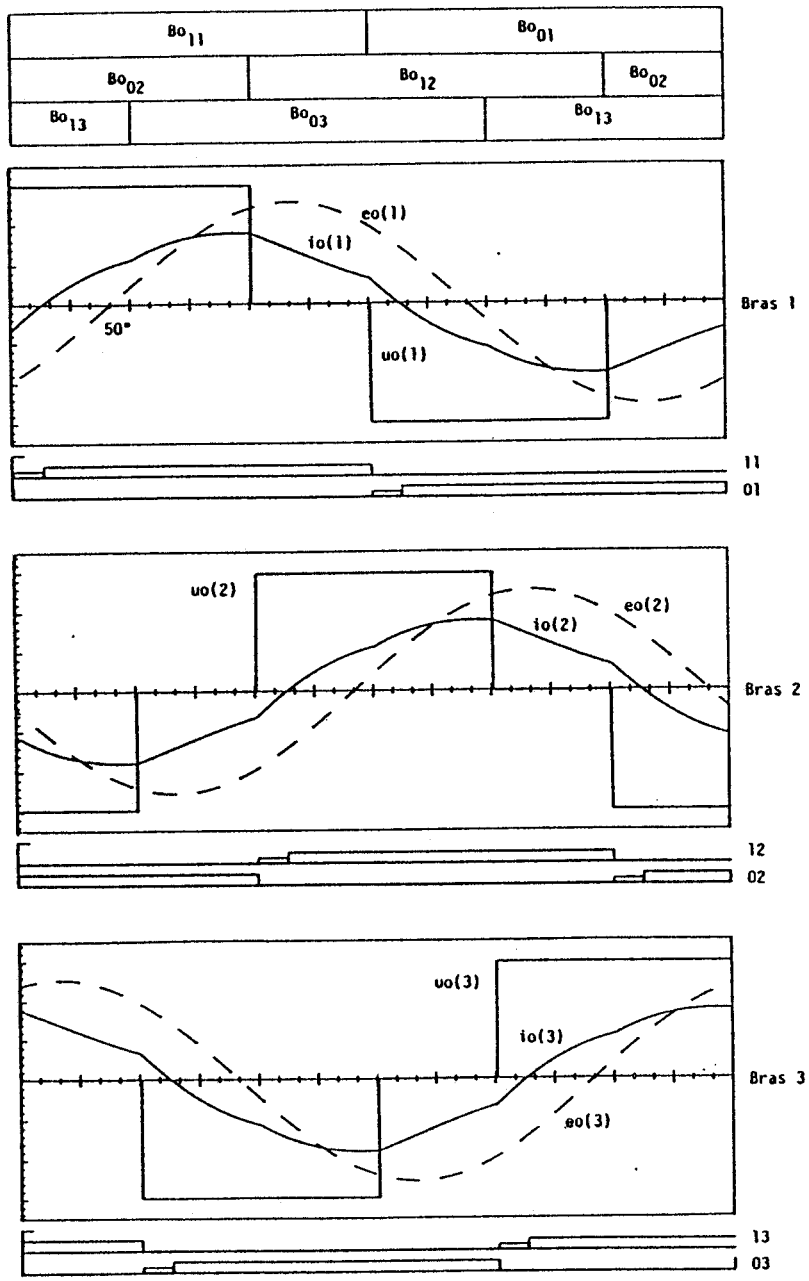
Nous présentons sur les figures suivantes plusieurs résultats de simulation, obtenus lorsque l'onduleur soumis à une tension d'entrée constante ($Udo = \frac{3}{\pi} . 220\sqrt{2}$) alimente une charge active triphasée R-L-eo(k) avec $R = 10\Omega$, $L = 0{,}05H$ et $eo(k) = 180\sqrt{2}.\sin(\omega t.(k - 1)\frac{2\pi}{3} - \phi)$.

Différents types de commande sont représentés :

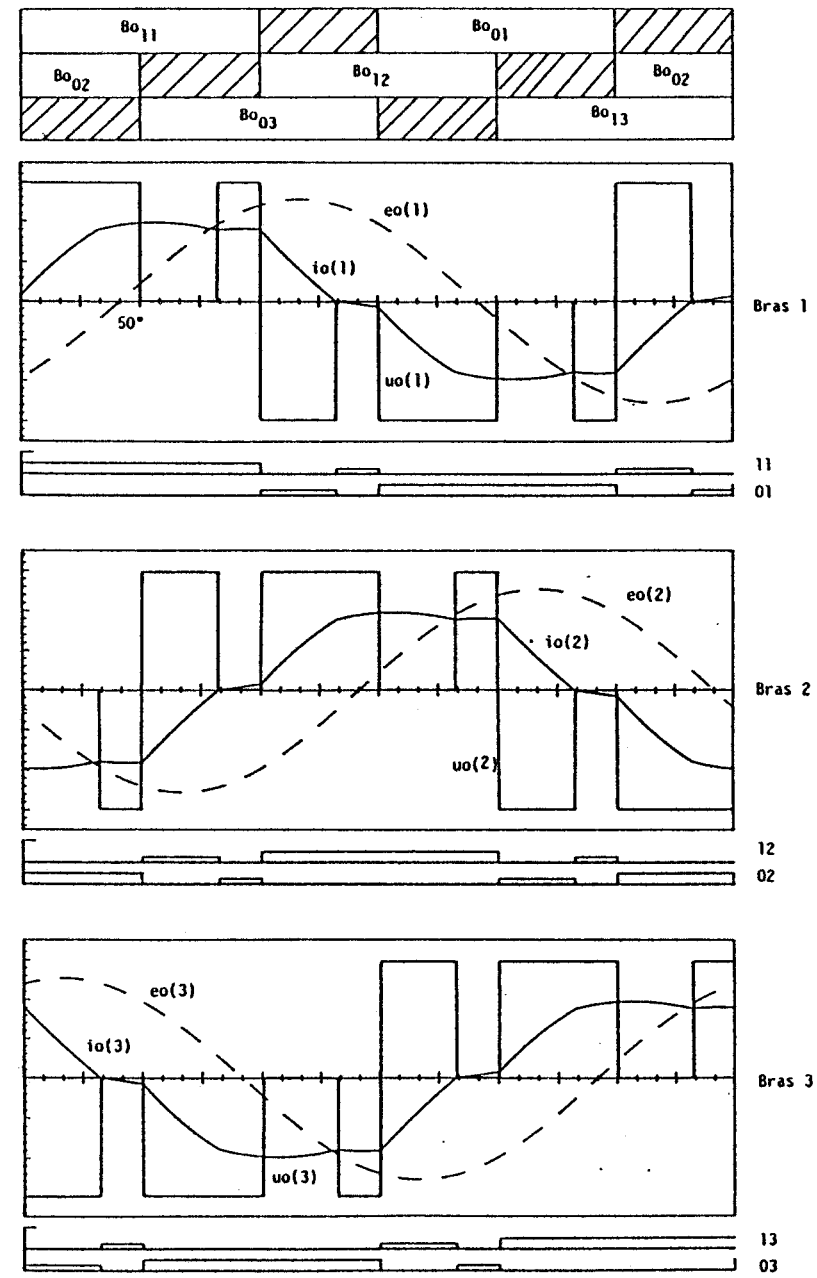
- commande de chaque transistor sur 180° : classe 3 uniquement (figure 2.28a)
- commande de chaque transistor sur 120° : classe 2 uniquement (Figure 2.28b)
- commande de chaque transistor sur 150° : classes 2, 3 (Figure 2.30)
- commande de chaque transistor sur 150°, avec défaut permanent sur Bo_{11} : classes 1, 2, 3 avec passage en monophasé (Figure 2.29a)
- commande de chaque transistor sur 120°, avec défaut permanent sur Bo_{11} et Bo_{03} : classes 0, 1, 2 avec fonctionnement en mode "déconnecté"- (Figure 2.29b)

Ces résultats illustrent parfaitement l'aide apportée par l'ordinateur dans l'analyse du fonctionnement de l'onduleur. La visualisation simultanée de l'évolution des grandeurs électriques, des chronogrammes de commande et de conduction des divers composants facilitent cette analyse ; les configurations de fonctionnement qui ne sont pas connues a priori, se déduisent alors aisément (figure 2.30).

Commande des transistors sur 180°



Commande des transistors sur 120°



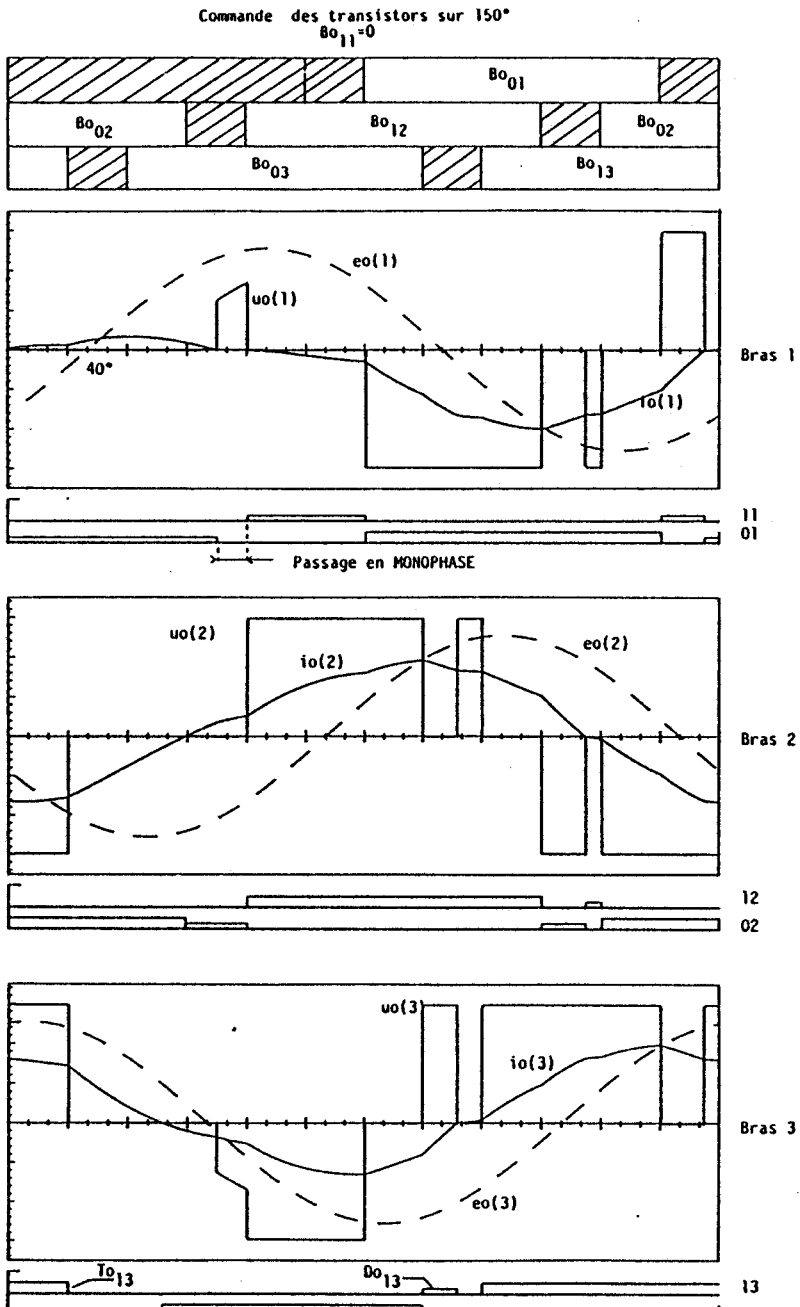


Figure 2.29a

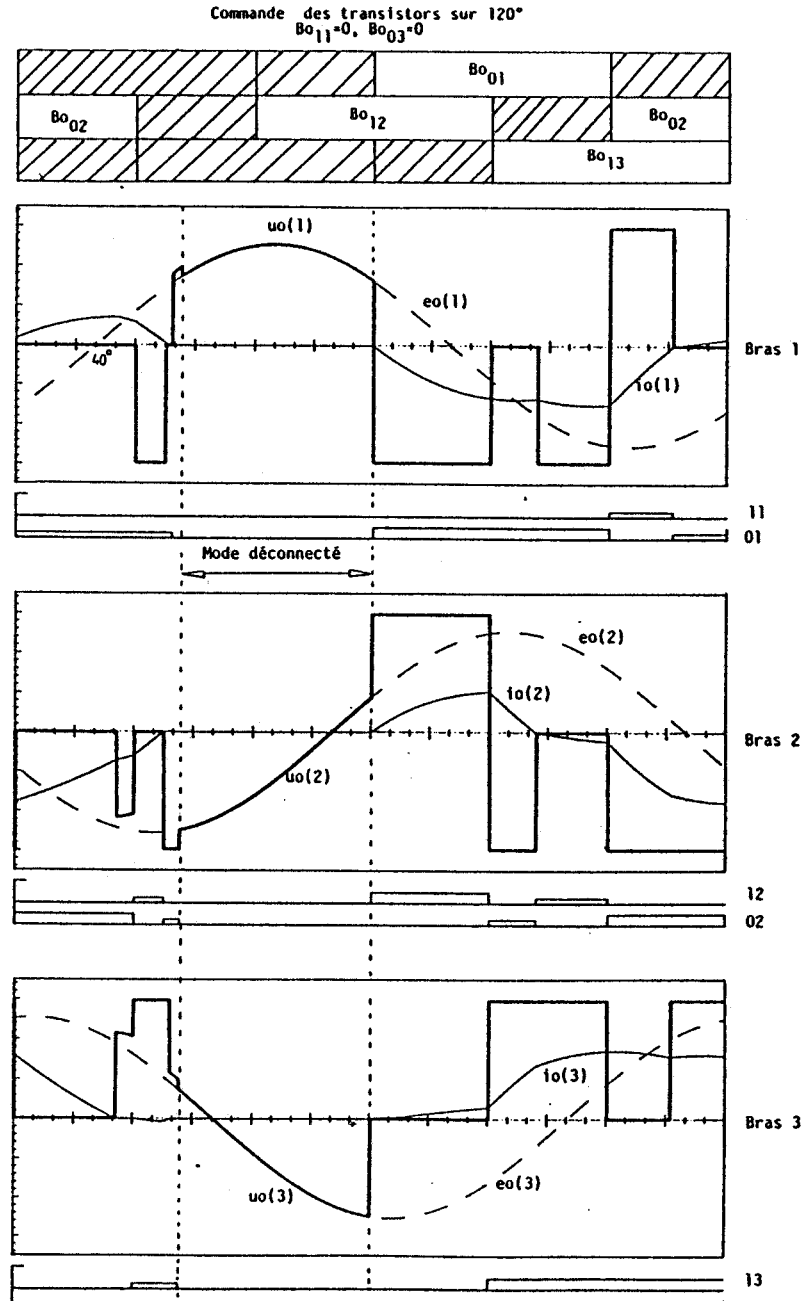
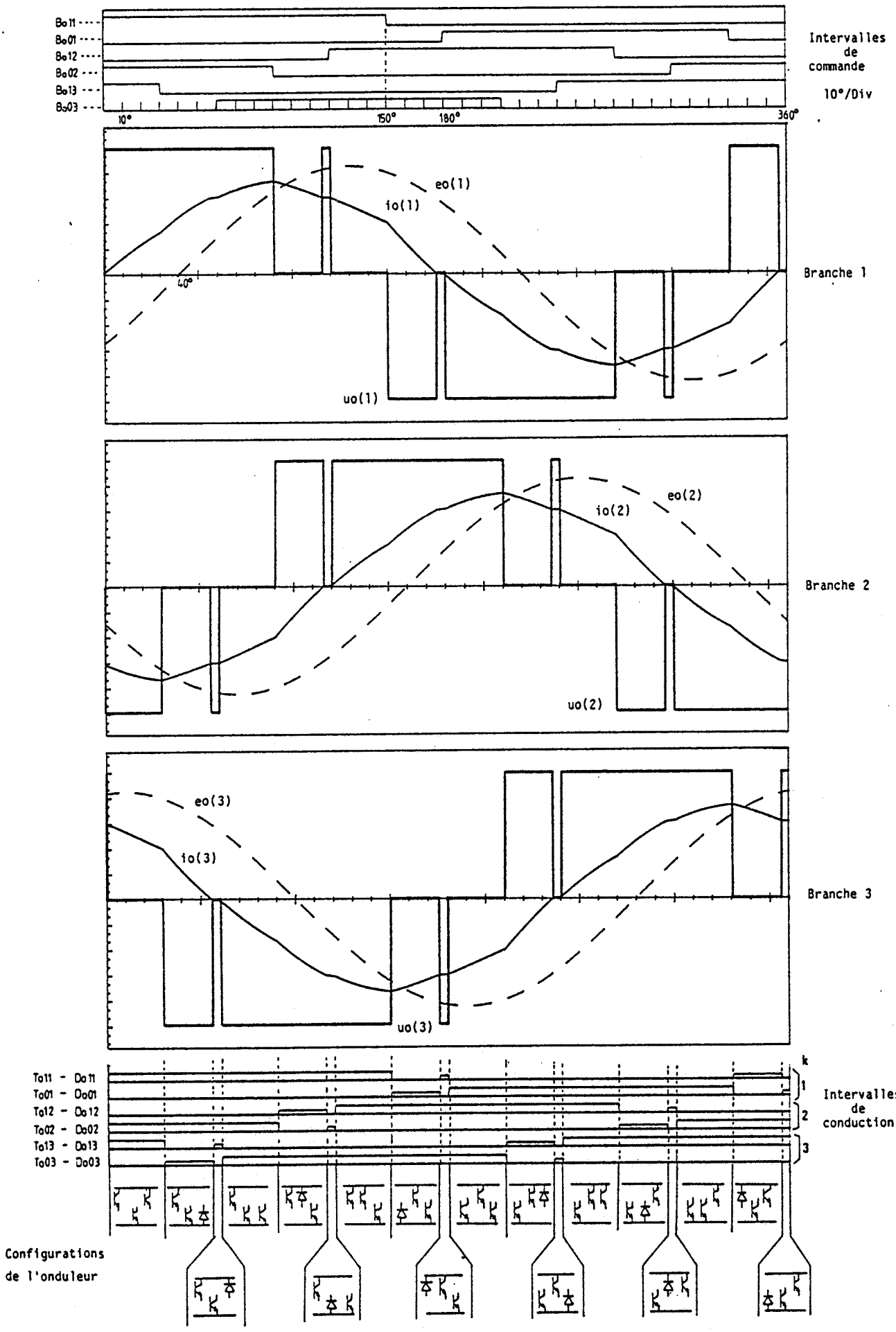


Figure 2.29b

Figure 2.30 : Commande des transistors sur 150°



3 - MODELISATION DU REDRESSEUR SYNCHRONE

3.1 Description fonctionnelle.

La description fonctionnelle du redresseur est beaucoup plus simple que celle de l'onduleur ; en effet, le choix de sources de tension en amont du montage limite les possibilités de commande. L'empiétement des diodes étant interdit, le chronogramme de conduction de celles-ci, pour un courant de sortie (idi) positif, ne comporte que six intervalles qui correspondent à la commutation naturelle des diodes (figure 2.32). La séquence de commande des transistors doit, dans ce cas, nécessairement coïncider avec ce chronogramme, afin d'éviter tout court-circuit des sources d'entrée (figure 2.33).

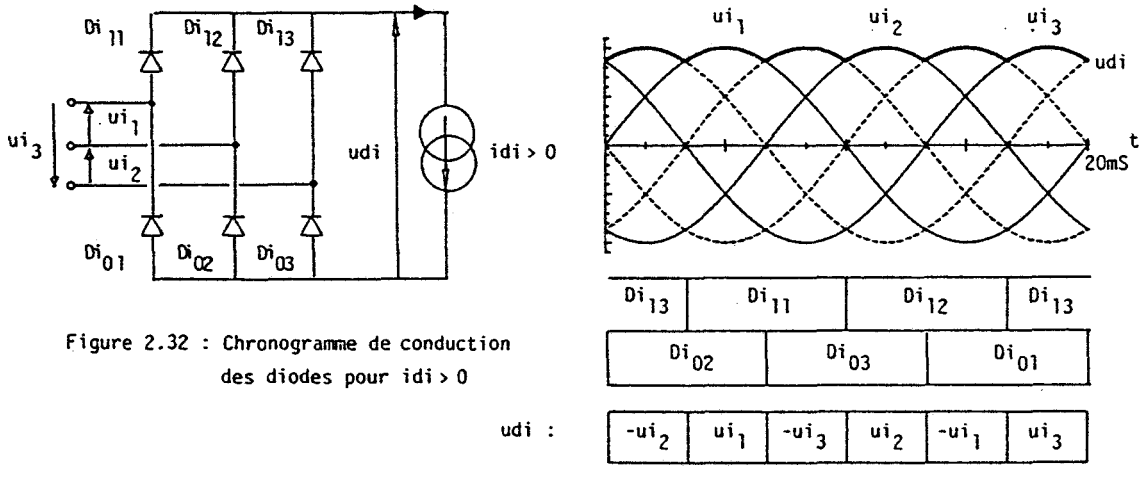


Figure 2.32 : Chronogramme de conduction des diodes pour idi > 0

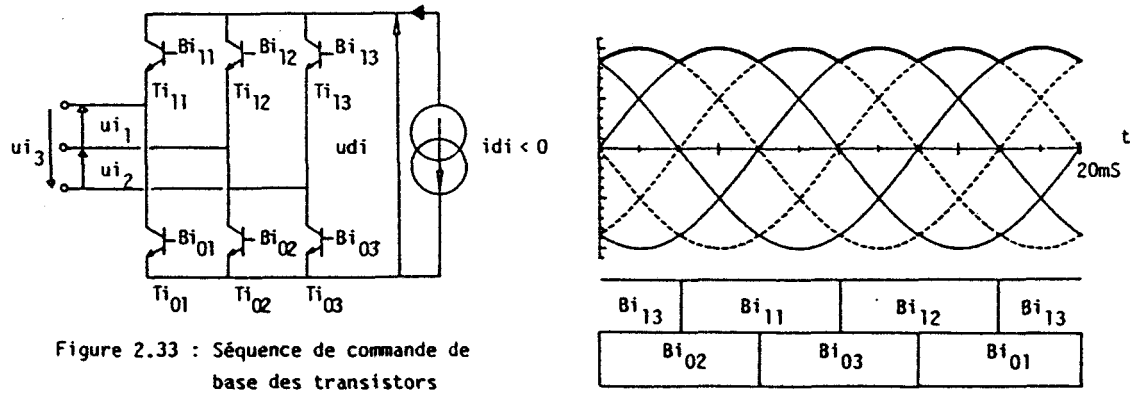


Figure 2.33 : Séquence de commande de base des transistors

3.2 Réseau de Pétri. Expression de la tension redressée.

Dans ces conditions, le redresseur se comporte comme une réelle source de tension ; qui plus est, les séquences de conduction de chaque interrupteur sont connues à l'avance.

De ce fait, le réseau de Pêtri se présente sous la forme d'un séquenceur à six états /33/ /34/ (figure 2.34) pour lequel l'expression de la tension redressée, directement déterminée à partir de l'état de la commande, s'écrit :

$$udi = (2s-1)\ ui(k) \qquad (2.16)$$

$$\text{lorsque : } Bi_{sk} \cdot Bi_{s+1.k+1} = 1$$

Le tableau 2.35 donne, pour chaque place du graphe, la valeur des indices s et k. La configuration de fonctionnement est alors la suivante :

$$* \ [Di_{sk} - Di_{s+1.k+1}] \quad \text{si } idi>0$$

$$* \ [Ti_{sk} - Ti_{s+1.k+1}] \quad \text{si } idi<0$$

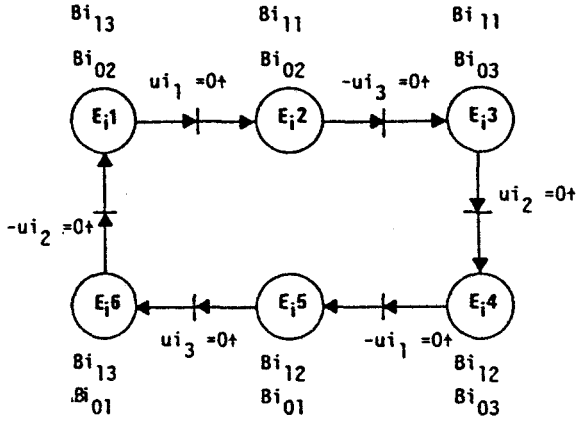


Figure 2.34 : Graphe de commande du redresseur

Place \ Valeurs de	s	k	s+1	k+1
E_i1	0	2	1	3
E_i2	1	1	0	2
E_i3	0	3	1	1
E_i4	1	2	0	3
E_i5	0	1	1	2
E_i6	1	3	0	1

Tableau 2.35 : indices s et k du redresseur.

4 - IMPLANTATION SUR CALCULATEUR

Le programme de simulation globale du changeur de fréquence s'obtient en associant le modèle numérique de l'onduleur et de sa charge (paragraphe 2.3) à celui du redresseur ; les équations du filtre intermédiaire assurent la jonction entre ces deux modèles. L'organigramme qui en résulte est représenté sur la figure 2.36.

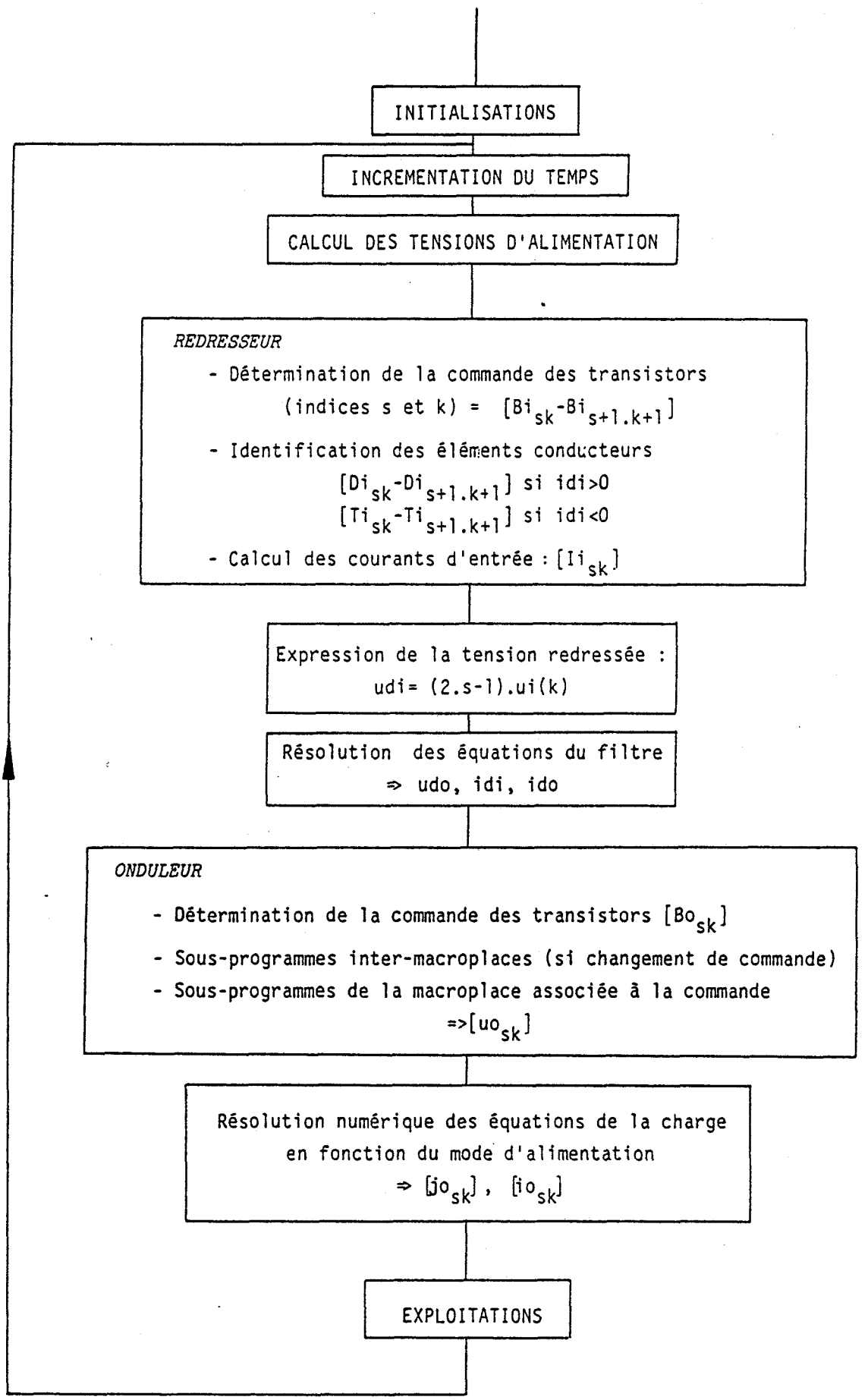


Figure 2.36 : Organigramme de programmation du changeur de fréquence

5 - PRESENTATION DES RESULTATS

Les figures suivantes (2.31 à 2.40) illustrent une utilisation possible du modèle numérique que nous venons d'établir. Les possibilités d'exploitation de ce modèle sont ici appliquées à la représentation des grandeurs électriques dans les différentes branches du changeur de fréquence, lorsque celui-ci délivre une tension variable dont la fréquence est successivement égale à 50 Hz (figure 2.38), 40 Hz (figure 2.39) et 30 Hz (figure 2.40).
Chaque figure se compose des courbes suivantes représentant :

/a/ : la commande du redresseur,
/b/, /c/, /d/ : les courant et tension pour chaque phase d'entrée du redresseur, ainsi que les chronogrammes de conduction des composants du bras associé à la phase considérée,
/e/ : les tension et courant en amont du filtre,
/j/ : les tension et courant en aval du filtre,
/f/ : la commande de l'onduleur,
/g/, /h/, /i/ : la tension appliquée à la charge, le courant dans la branche concernée, les intervalles de conduction des composants pour chaque bras de l'onduleur.

L'onduleur fonctionne selon une loi de commande optimale /35/ ; les instants de commutations de ses transistors (courbes *f*) sont déterminés afin d'annuler les premiers harmoniques de la tension de sortie. Un choix convenable des symétries pour cette forme d'onde (anti-symétrie par rapport à la demi-période et symétrie par rapport au quart de période) permet, d'une part, de simplifier l'expression du développement en séries de Fourier, qui ne contient plus alors que des termes en sinus de rang impair (voir annexe 1) ; et d'autre part, de reconstituer toute la séquence de commande en ne connaissant que les instants de commutation d'un transistor sur un quart de période /36/.
Pour cette étude, l'annulation des harmoniques de rang 5, 7, 11 et la possibilité de régler le fondamental de la tension délivrée par l'onduleur proportionnellement à sa fréquence, nous imposent la détermination de quatre angles. Le tableau 2.37 précise, pour les différentes fréquences envisagées, les premiers instants de commutations si la période complète de la séquence égale 360°.

Fréquence de l'onduleur	Angles approchés			
	α1	α2	α3	α4
50 Hz	15.2°	19.5°	74.2°	78.2°
40 Hz	21.1°	26.0°	70.0°	78.1°
30 Hz	23.4°	31.7°	66.6°	77.9°
25 Hz	23.2°	33.5°	65.3°	78.0°

Tableau 2.37 : Premiers angles de commutation en fonction de la fréquence de l'onduleur.

Nous rappelons ci-dessous les notations utilisées et les conditions dans lesquelles la simulation a été réalisée.

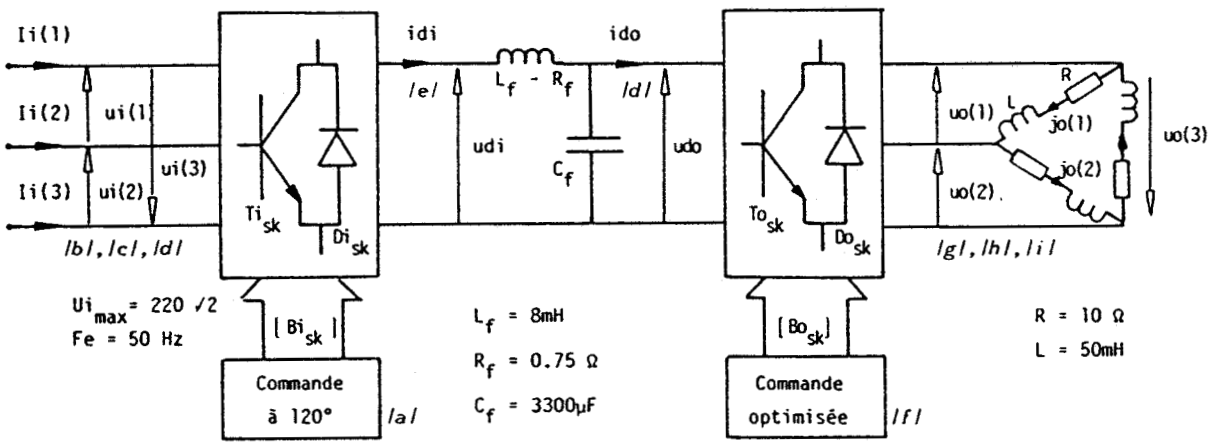
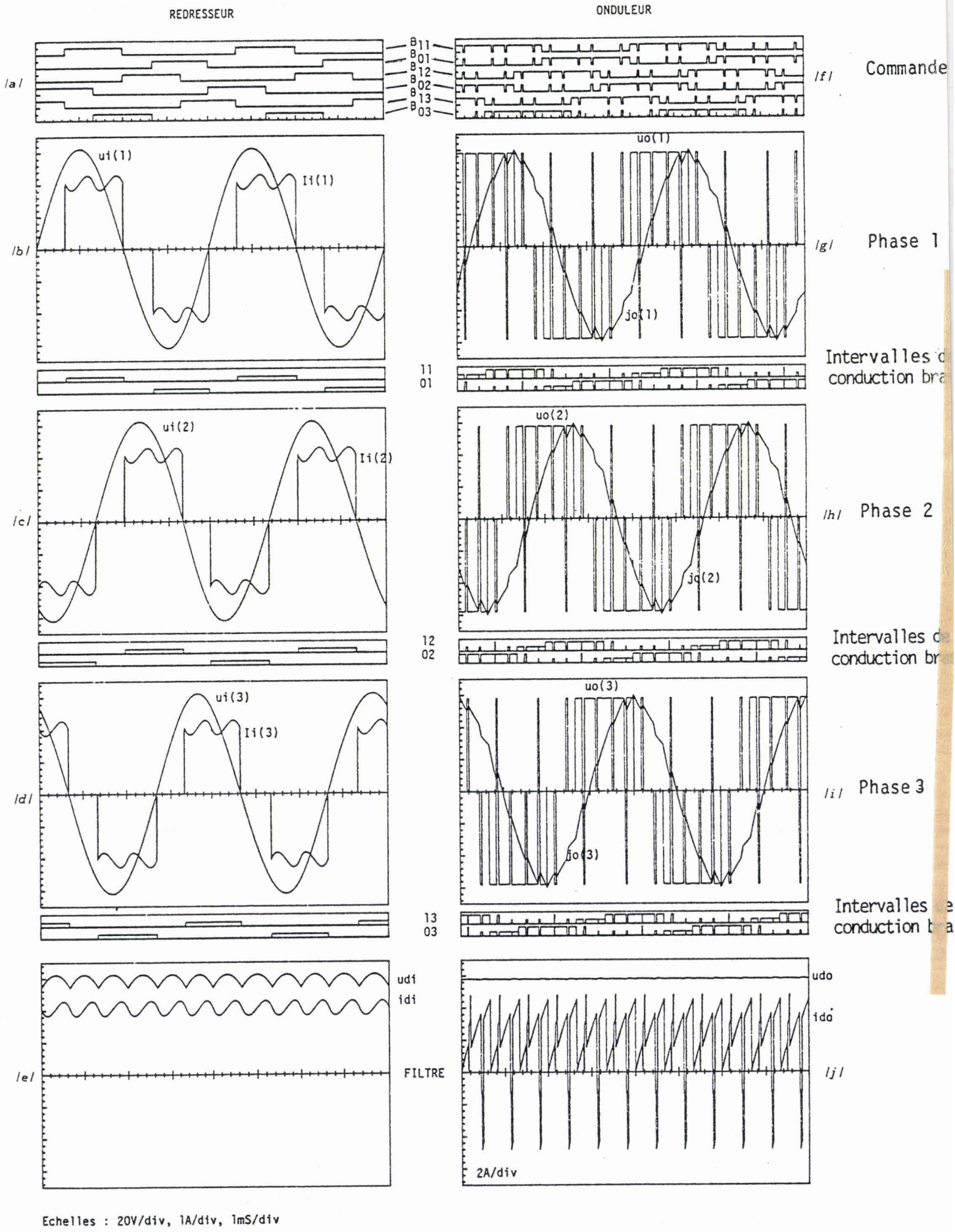
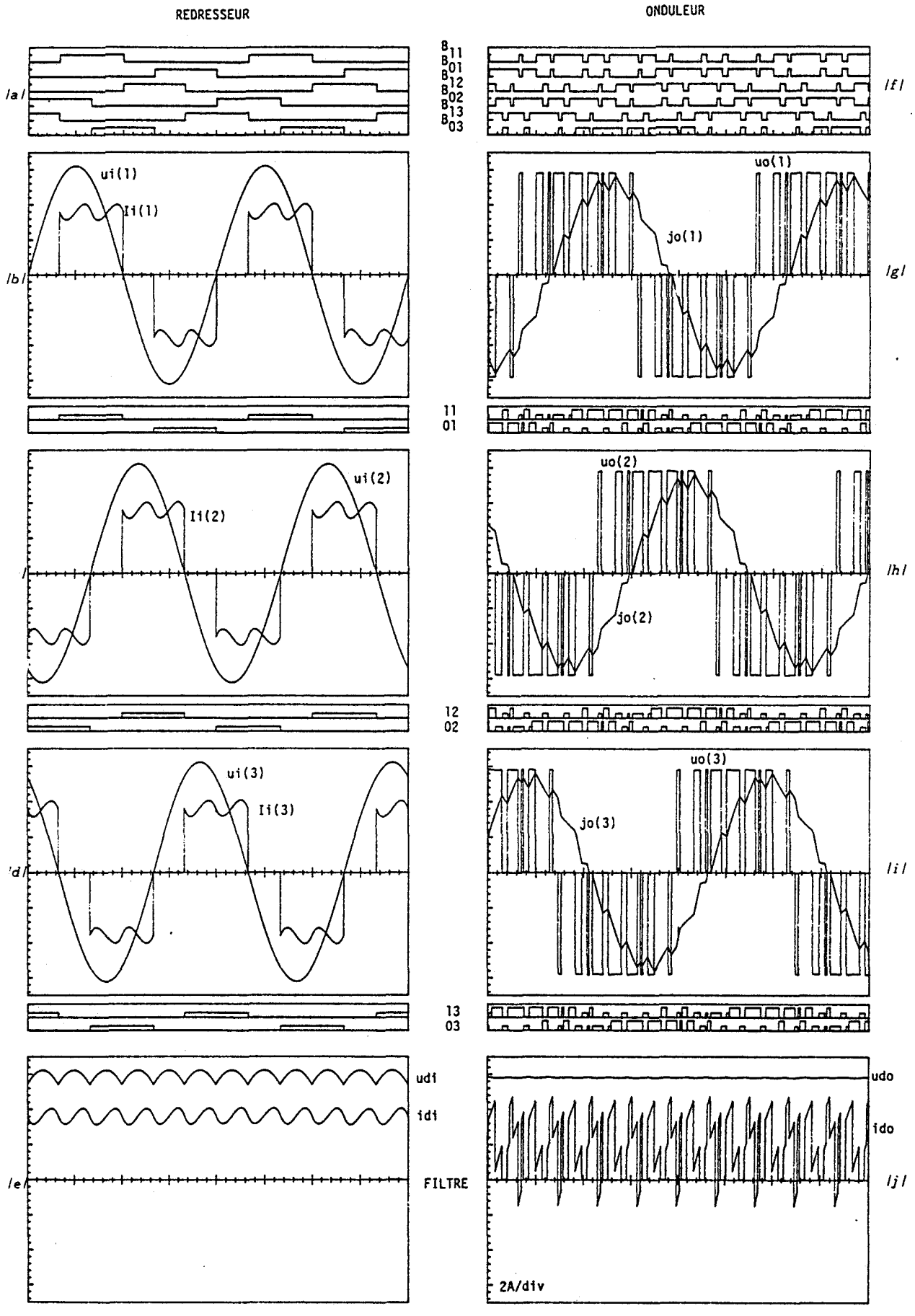


Figure 2.41 : Notations - Paramètres



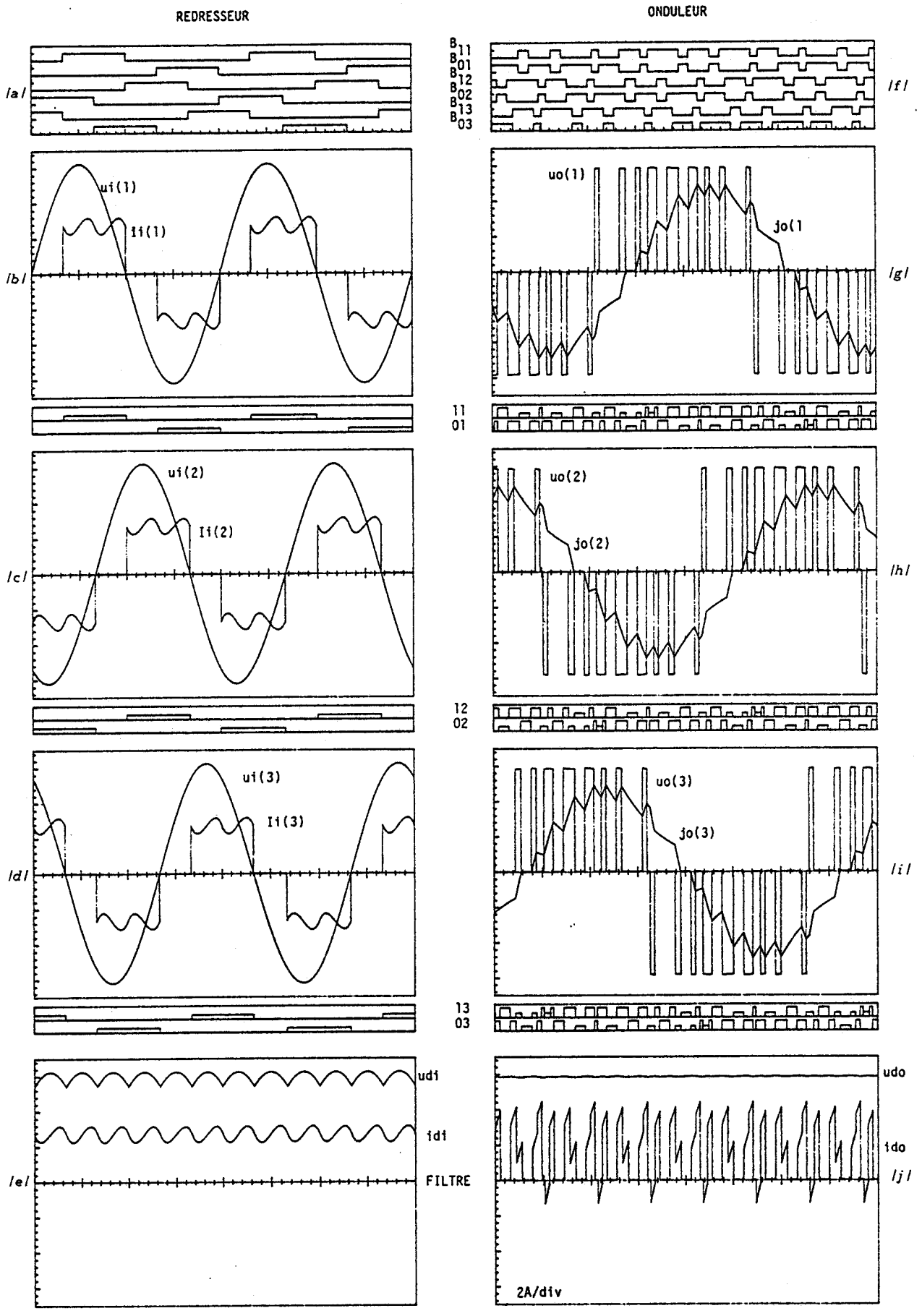
Echelles : 20V/div, 1A/div, 1mS/div

Figure 2.38 : Fréquence onduleur = 50 Hz



Echelles : 20V/div, 1A/div, 1mS/div

Figure 2.39 : Fréquence onduleur = 40 Hz



Echelles : 20V/div, 1A/div, 1mS/div

Figure 2.40 : Fréquence onduleur = 30 Hz

Cette étude est complétée par une analyse harmonique (figure 2.42) de la tension en sortie de l'onduleur, du courant dans la charge, du courant appelé au réseau et ce, pour les trois fréquences de sortie envisagées.

L'analyse de ces grandeurs électriques est effectuée dans une fenêtre de 100 mS, ce qui nous permet de calculer l'amplitude de chaque harmonique (a_n) avec un incrément fréquentiel de 10 Hz (voir annexe 3). Toutefois, pour clarifier la lecture des spectres, l'axe des fréquences est directement gradué en multiples entiers de la fréquence fondamentale. Le rang, n, de l'harmonique est donc donné par :

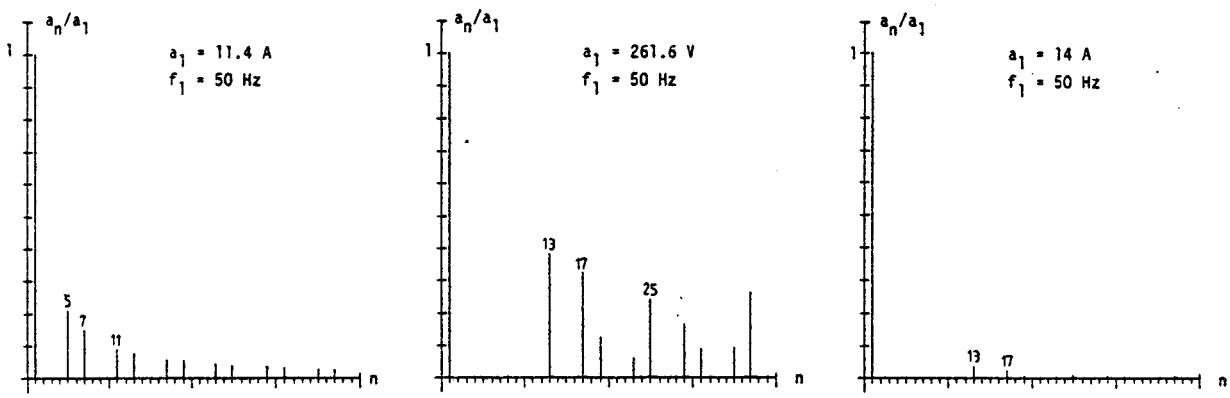
$$n = \frac{f_n}{f_1}$$ où f_1 est la fréquence fondamentale du signal analysé.

La largeur de la bande de fréquence représentée est égale à 2KHz.

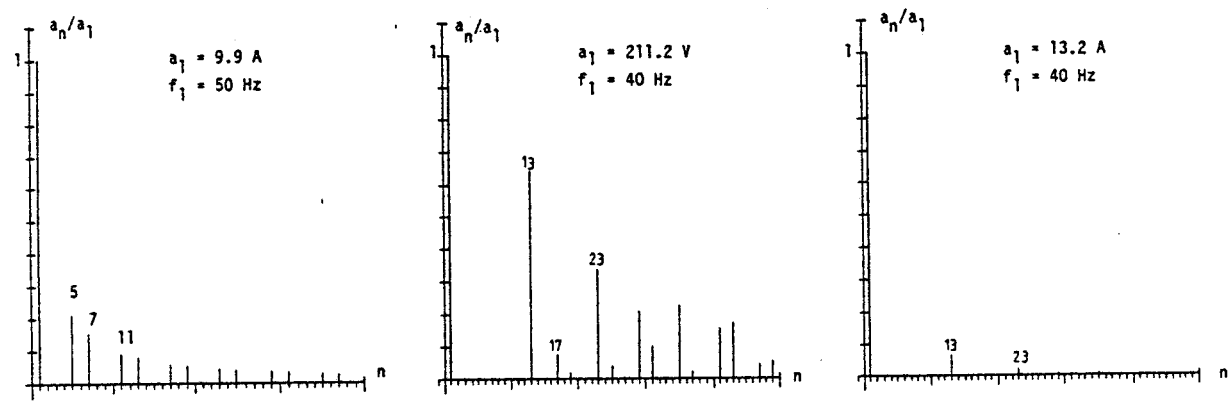
Nous constatons sur ces figures, l'annulation des premiers harmoniques de tension au détriment des suivants, qui prennent des valeurs importantes. Cet effet est naturellement moindre pour le spectre du courant dans la charge.

La comparaison des courbes /e/ et /j/ montre que le filtre intermédiaire, non seulement réduit l'ondulation de la tension redressée udi (voir udo), mais supprime également une grande partie des variations du courant ido (voir idi) /37/. Ceci explique l'invariance du spectre pour le courant pris au réseau lorsqu'il est tracé en grandeur relative.

a- Fs = 50Hz



b- Fs = 40Hz



c- Fs = 30Hz

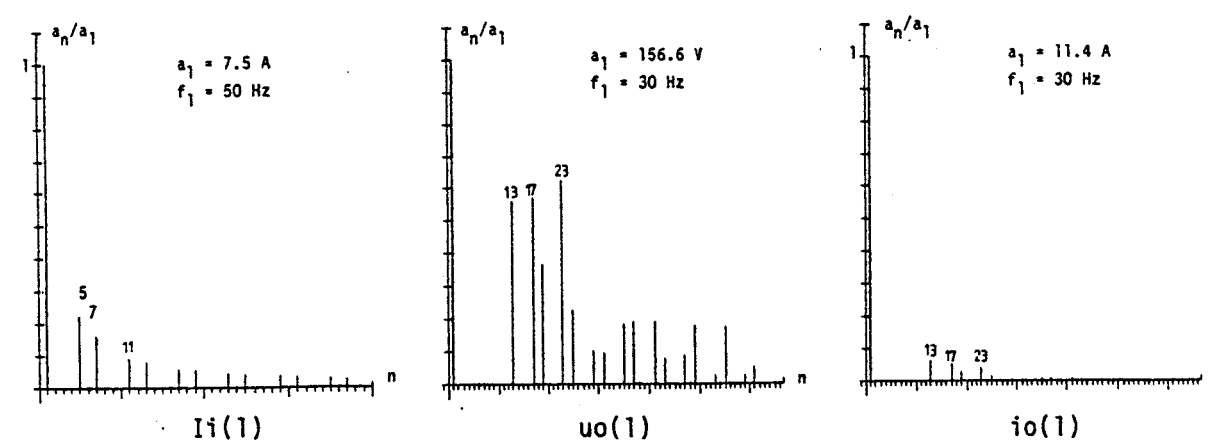


Figure 2.42 : Analyse Harmonique du courant pris au réseau, de la tension et du courant dans la charge.

6 - FONCTIONNEMENT DU REDRESSEUR EN ONDULEUR NON AUTONOME

La propriété de réversibilité en courant du redresseur, n'apparaît pas sur les courbes */b/*, */c/*, */d/* pour les trois fréquences considérées ; le courant idi (courbe */e/*) en régime permanent étant constamment positif, seules les diodes conduisent.
Cette réversibilité peut être mise en évidence lors de régimes permanents à plus faible charge ou durant les phases transitoires. Trois cas peuvent alors se présenter :

- Le courant idi est toujours positif (figure 2.43 a), seules les diodes conduisent, le montage fonctionne en redresseur classique ;
- Le courant idi est toujours négatif (figure 2.43 c), seuls les transistors conduisent, le redresseur fonctionne en onduleur non autonome ;
- Le courant idi évolue de part et d'autre de zéro, les deux types de composants conduisent successivement (figure 2.43 b).

La représentation, sur le même graphique, d'une tension simple à l'entrée du redresseur et du courant en ligne correspondant, nous renseigne sur le signe de la puissance instantanée échangée avec le réseau d'alimentation, signe qui détermine le sens du transfert d'énergie.

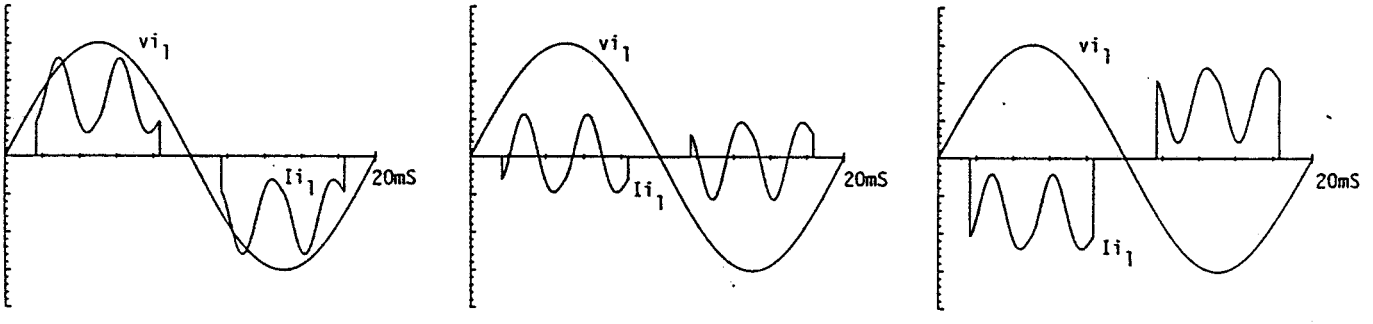
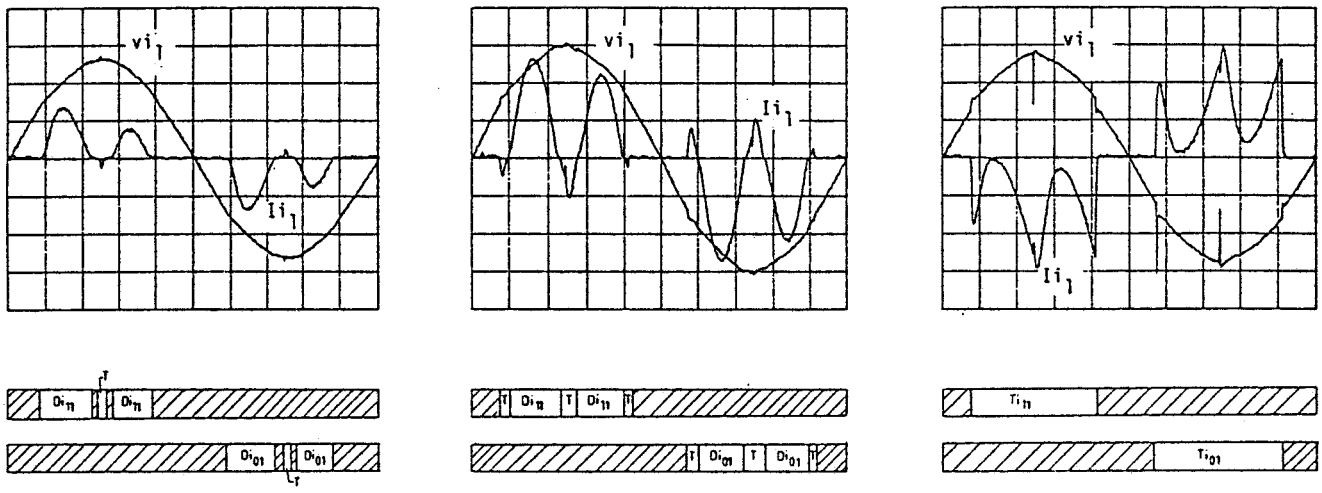


Figure 2.43 : Grandeurs électriques à l'entrée du redresseur, différents cas de figure.

Pour vérifier expérimentalement les trois modes de fonctionnement évoqués ci-dessus, nous avons connecté le montage redresseur (dont la réalisation est décrite au chapitre 4) à une source de tension variable, via un indispensable élément d'accumulation. L'échange d'énergie entre ces deux sources s'obtient alors aisément en faisant varier l'écart de tension entre celles-ci. Les oscillogrammes ainsi obtenus sont représentés par les figures 2.44.



Figures 2.44 : Oscillogrammes pour l'entrée du redresseur

7 - CONCLUSION

Il convient de souligner d'abord que la décomposition par classes de commande a grandement simplifié la recherche d'éventuelles erreurs de programmation et nous a permis de réaliser un gain de temps appréciable dans la mise au point du programme. En effet, en imposant une commande particulière, nous avons pu tester chaque classe de commande avant d'envisager une simulation globale indépendante de la charge et de la commande.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont encourageants. La loi de commande proposée pour le montage redresseur donne des résultats tout à fait satisfaisants ; outre sa simplicité (séquence de contrôle fixe), elle confère au montage la propriété d'être instantanément réversible en courant contrairement aux autres structures existantes.

Un tel montage trouvera donc de multiples applications ; par exemple :

- associé à un hacheur quatre quadrants (structure onduleur monophasé présentée au chapitre 1), il permettra la variation de vitesse d'un moteur à courant continu (voir annexe 4) ;

- associé à un onduleur (structure proposée dans ce chapitre), cet ensemble constituera un changeur de fréquence performant permettant notamment l'entraînement en vitesse variable d'un moteur asynchrone. Cette nouvelle structure supprime le hacheur intermédiaire (et toute sa régulation) présent dans les montages classiques /38/ /39/, ainsi que les résistances de freinage, sources d'encombrement et de pertes d'énergie.
  Le filtre intermédiaire (L_f - C_f), comme nous l'avons vu, tend à dégrader les performances dynamiques du système ; il conviendrait donc de le minimiser /40/ /41/.

CHAPITRE 3

ETUDE DE L'ENSEMBLE
CHANGEUR DE FREQUENCE - MOTEUR ASYNCHRONE

Dans ce chapitre, nous nous proposons de compléter l'étude précédente, en utilisant le changeur de fréquence pour la variation de vitesse d'un moteur asynchrone triphasé.

Pour cela, après un rappel des équations matricielles régissant le fonctionnement du moteur, nous utilisons la formulation de PARK pour implanter celles-ci sur calculateur.

Le dispositif à Modulation de Largeur d'Impulsions, retenu pour la commande rapprochée de l'onduleur, est ensuite défini et nous en proposons un modèle dynamique.

Le modèle complet nous permet finalement de prévoir le comportement de l'ensemble convertisseur de fréquence - moteur, tant en régime permanent que transitoire.

1 - MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE

1.1 Hypothèses et notations principales

La mise en équations de la machine asynchrone conduit à un système d'équations volumineux /42/. Leur implantation sur ordinateur est facilitée en adoptant des notations matricielles qui permettent l'application directe des méthodes classiques de résolution numérique et présentent l'avantage d'alléger l'écriture des relations.

Pour simplifier l'expression des inductances propres et mutuelles, nous admettons :

- Une répartition sinusoïdale du flux dans l'entrefer,
- Une absence de saturation et de pertes par hystérésis ou courants de Foucault, dans le circuit magnétique.

La nomenclature des notations est celle-ci :

s, r	: Indices du stator et du rotor ($s \in \{1,2,3\}$, $r \in \{1,2,3\}$)
u_1, u_2, u_3	: Tensions appliquées aux enroulements statoriques
j_{s1}, j_{s2}, j_{s3}	: Courants traversant les enroulements statoriques
i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}	: Courants traversant les enroulements rotoriques
R_s, l_s	: Résistance et inductance propre d'une phase statorique
R_r, l_r	: Résistance et inductance propre d'une phase rotorique
M_{ss}	: Inductance mutuelle entre deux phases statoriques
M_{rr}	: Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
m_{sr}	: Inductance mutuelle entre la phase s du stator et la phase r du rotor
M_{sr}	: Amplitude maximale de m_{sr} (Obtenue lorsque les deux axes s et r coïncident)
$l_r = l_r - M_{rr}$	: Inductance cyclique propre des enroulements d'axes d et q
$l_s = l_s - M_{ss}$	: Inductance cyclique propre du stator
M_{rr}	: Inductance mutuelle entre l'enroulement d'axe d et l'enroulement d'axe q

u_o, u_d, u_q : Tension homopolaire, Tension aux bornes de l'enroulement d'axe d, Tension aux bornes de l'enroulement d'axe q

i_o, i_d, i_q : Courants dans les enroulements après la transformation de Park (homopolaire, pour la phase d, pour la phase q)

$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$: Vitesse angulaire du moteur en rd/S

NOTA : nous posons, $\frac{M'^2_{sr}}{l'_r} = M'$

1.2 Equations générales

La mise en équations de la machine idéalisée est établie à partir de la structure de principe définie par la figure 3.1. Elle comporte un enroulement triphasé (s1, s2, s3) au stator, ainsi qu'un enroulement triphasé (r1, r2, r3), en court-circuit sur lui-même, au rotor. La position du rotor est caractérisée par l'angle $p\theta$ = (Os1, Or1), entre l'axe de la phase 1 du stator et l'axe de la phase 1 du rotor.

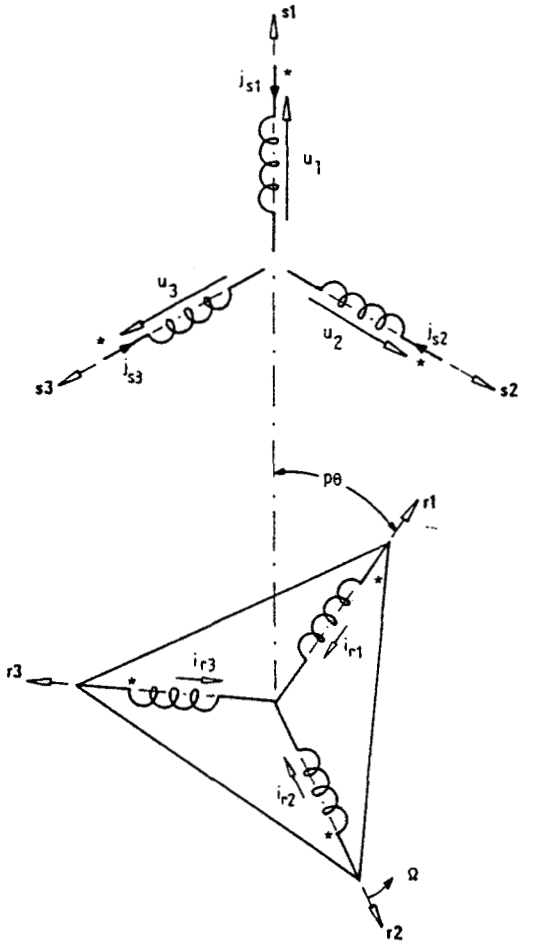


Figure 3.1 : Machine idéalisée

Dans ces conditions, les équations de fonctionnement s'écrivent :

$$[U] = [R].[I] + \frac{d}{dt}[\Phi] \qquad (3.1)$$

avec : $[U]^t = [u_1\ u_2\ u_3\ 0\ 0\ 0]$

$[I]^t = [j_{s1}\ j_{s2}\ j_{s3}\ i_{r1}\ i_{r2}\ i_{r3}]$

$[\Phi]^t = [\phi_{s1}\ \phi_{s2}\ \phi_{s3}\ \phi_{r1}\ \phi_{r2}\ \phi_{r3}]$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Comme l'on néglige la saturation, la matrice des flux réels $[\Phi]$ devient :

$$[\Phi] = [L].[I]$$

$$\text{avec : } [L] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} l_s & M_{ss} & M_{ss} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ M_{ss} & l_s & M_{ss} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ M_{ss} & M_{ss} & l_s & m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ \hline m_{11} & m_{21} & m_{31} & l_r & M_{rr} & M_{rr} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} & M_{rr} & l_r & M_{rr} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & M_{rr} & M_{rr} & l_r \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} [L_s] & [M] \\ \hline [M]^t & [L_r] \end{array}\right]$$

où : $m_{11} = m_{22} = m_{33} = M_{sr} \cdot \cos(p\theta)$

$m_{12} = m_{23} = m_{31} = M_{sr} \cdot \cos(p\theta - 2\pi/3)$

$m_{13} = m_{21} = m_{32} = M_{sr} \cdot \cos(p\theta + 2\pi/3)$

La résolution d'un tel système d'équations n'est pas aisée, puisque la valeur des coefficients d'inductance mutuelle varie selon la position du rotor. La transformation de Park supprime le mouvement relatif entre le stator et le rotor ; elle apporte ainsi une simplification notable du système d'équations et, de surcroît, un gain de temps appréciable dans sa résolution.

1.3. Transformation de Park

La transformation de Park /43/ /44/ /45/ peut s'envisager simultanément au stator et au rotor ; toutefois, l'étude de l'onduleur nécessite la connaissance à tout instant des courants (en ligne) et tensions statoriques du moteur ; l'intérêt d'une telle transformation au stator est donc discutable /46/.
Nous conserverons donc un bobinage triphasé fixe au stator, alors qu'au rotor l'enroulement triphasé sera remplacé par deux bobinages d'axes d et q en quadrature (voir figure 3.2).

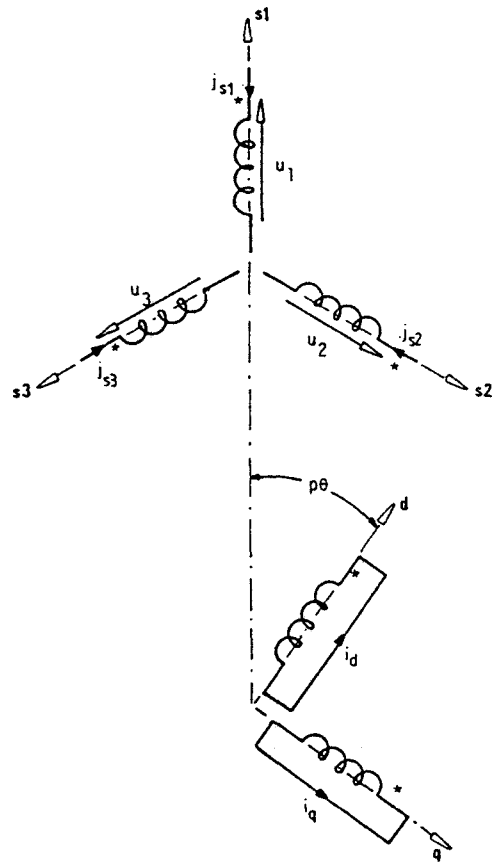


Figure 3.2 : Machine équivalente,
transformation de Park au rotor.

Les axes rotoriques sont supposés fixes par rapport au stator, ainsi les coefficients d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor sont constants.

Dans ces conditions, le système d'équations des 3 phases statoriques et des 2 phases rotoriques s'écrit :

$$[U'] = [R'].[I'] + \frac{d}{dt}[\Phi'] \tag{3.2}$$

$$[U'] = [R'].[I'] + \frac{d}{dt}[L'].[I'] \tag{3.3}$$

avec : $[U']^t = [u_1\ u_2\ u_3\ u_0\ u_d\ u_q]$

$[I']^t = [j_{s1}\ j_{s2}\ j_{s3}\ i_0\ i_d\ i_q]$

$[\Phi']^t = [\phi_{s1}\ \phi_{s2}\ \phi_{s3}\ \phi_0\ \phi_d\ \phi_q]$

Le passage des anciennes grandeurs rotoriques (tensions-courants-flux) aux nouvelles grandeurs s'effectue au moyen d'une matrice unique $[P(\theta)]$:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = [P(\theta)].\begin{bmatrix} u_{r1} \\ u_{r2} \\ u_{r3} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = [P(\theta)].\begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} = [P(\theta)].\begin{bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \\ \phi_{r3} \end{bmatrix}$$

On démontre que l'équivalence physique entre la structure diphasée et la structure triphasée initiale (même puissance instantanée pour ces deux systèmes) est obtenue si la matrice de transformation, $[P(\theta)]$, est orthogonale /42/, soit :

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

Cette matrice de transformation a pour expression :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos(p\theta) & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(p\theta) & \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(p\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Le courant homopolaire, i_o, étant nul, nous pouvons réduire d'un rang le système (3.3) qui devient, après transformations :

$$[U'] = [R'].[I'] + p\frac{d\theta}{dt}[\alpha'].[L'].[I'] + [L']\frac{d}{dt}[I'] \qquad (3.4)$$

où :

$$[R'] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \qquad [\alpha'] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[L'] = \left[\begin{array}{ccc:cc} l_s & M_{ss} & M_{ss} & m_{1d} & m_{1q} \\ M_{ss} & l_s & M_{ss} & m_{2d} & m_{1q} \\ M_{ss} & M_{ss} & l_s & m_{3d} & m_{3q} \\ \hdashline m_{d1} & m_{d2} & m_{d3} & l'_r & M'_{rr} \\ m_{q1} & m_{q2} & m_{q3} & M'_{rr} & l'_r \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c} [L_s] & [M'] \\ \hdashline [M']^t & [L'_r] \end{array}\right]$$

En alignant les axes s_1 et d l'angle $p\theta$, s'annule ; la sous-matrice $[M']$ se simplifie et s'écrit alors :

$$[M'] = \begin{bmatrix} M'_{sr}\,\mathrm{COS}(p\theta) & M'_{sr}\,\mathrm{COS}(p\theta + \frac{\pi}{2}) \\ M'_{sr}\,\mathrm{COS}(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M'_{sr}\,\mathrm{COS}(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) \\ M'_{sr}\,\mathrm{COS}(p\theta - \frac{4\pi}{3}) & M'_{sr}\,\mathrm{COS}(p\theta - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M'_{sr} & 0 \\ -\frac{1}{2}M'_{sr} & \frac{\sqrt{3}}{2}M'_{sr} \\ -\frac{1}{2}M'_{sr} & -\frac{\sqrt{3}}{2}M'_{sr} \end{bmatrix}$$

sachant que :

$M'_{rr} = 0$, puisque les enroulements rotoriques sont en quadrature.

$l'_r = l_r - M_{rr}$ (inductance cyclique propre du rotor) (3.5)

$M'_{sr} = \sqrt{\frac{3}{2}}\,M_{sr}$

Dans la formulation de Park, l'expression de la puissance mécanique est donnée par :

$$Pm = p \frac{d\Theta}{dt} (\phi_q . i_d - \phi_d . i_q) \tag{3.6}$$

avec :

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} = [M']^t \, [L'_r] \, . \, [I']$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$c_e = p \, M'_{sr} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} i_d (j_{s1} - j_{s3}) - \frac{1}{2} i_q (2j_{s1} - j_{s2} - j_{s3}) \right] \tag{3.7}$$

Le moteur utilisé est un moteur à cage ; néanmoins pour ce type de moteur il n'est pas possible d'identifier tous les coefficients des matrices [R'] et [L'] /47/ /48/. Pour palier cette difficulté, nous opérons le changement de variables suivant sur les courants rotoriques :

$$i'_d = \frac{l'_r}{M'_{sr}} i_d \quad \text{et} \quad i'_q = \frac{l'_r}{M'_{sr}} i_q \tag{3.8}$$

Pour simplifier l'écriture des matrices du système (3.4), nous posons $M' = M'^2_{sr}/l'_r$ et nous divisons les expressions des tensions rotoriques (nulles) par M'_{sr}.

Les nouvelles valeurs des matrices sont les suivantes :

$$[R'] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r/l'_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r/l'_r \end{bmatrix} \qquad [L'] = \left[\begin{array}{ccc|cc} l_s & M_{ss} & M_{ss} & M' & 0 \\ M_{ss} & l_s & M_{ss} & -\frac{1}{2}M' & \frac{\sqrt{3}}{2}M' \\ M_{ss} & M_{ss} & l_s & -\frac{1}{2}M' & -\frac{\sqrt{3}}{2}M' \\ \hline 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -1 \end{array}\right]$$

$$[U']^t = [u_1 \;\; u_2 \;\; u_3 \;\; 0 \;\; 0]$$

$$[I']^t = [j_{s1} \; j_{s2} \; j_{s3} \; i_d \; i_q]$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$c_e = p \, M' \left[\frac{\sqrt{3}}{2} i'_d (j_{s1} - j_{s3}) - \frac{1}{2} i'_q (2j_{s1} - j_{s2} - j_{s3}) \right] \tag{3.9}$$

1.4 Simplification des équations en fonction du couplage et du mode d'alimentation

Jusqu'ici nous n'avons émis aucune hypothèse sur le couplage (triangle ou étoile) des enroulements statoriques, ni même sur leurs modes d'alimentation. Il convient donc, dès à présent, d'extraire du système matriciel (3.4) les grandeurs électriques nulles en fonction du mode d'alimentation, de tirer profit des relations liant les courants ou les tensions afin de réduire l'ordre de ce système.

1.4.1 Couplage en triangle, alimentation triphasée

Dans ce mode d'alimentation, les enroulements statoriques sont soumis aux tensions composées délivrées par l'onduleur (figure 3.3).

Le système des courants en ligne ne posséde pas de composante homopolaire, donc :

$$io_1 + io_2 + io_3 = 0 \quad \text{soit } io_3 = -(io_1 + io_2) \tag{3.10}$$

De même, l'une des tensions peut être calculée à partir de la somme des deux autres, par exemple :

$$uo_3 = -(uo_1 + uo_2) \tag{3.11}$$

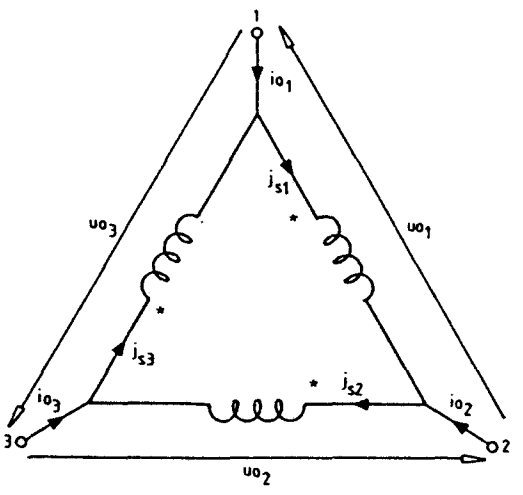


Figure 3.3 : Tensions et courants statoriques pour le couplage Triangle.

Compte tenu des relations (3.10) et (3.11), un système d'équations d'ordre 4 suffit pour décrire le fonctionnement de la machine :

$$[U_T'] = [R_T'] \cdot [I_T'] + \left(p \frac{d}{dt} [\alpha_T'] [L_T'] + [L_T'] \frac{d}{dt}\right)[I_T'] \tag{3.12}$$

avec : $[U'_T]^t = [\, uo_1 \;\; uo_2 \;\; 0 \;\; 0 \,]$

$[I'_T]^t = [\, j_{s1} \;\; j_{s2} \;\; i'_d \;\; i'_q \,]$

$$[\alpha'_T] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[R'_T] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r/l'_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r/l'_r \end{bmatrix} \quad [L'_T] = \begin{bmatrix} l'_s & 0 & M' & 0 \\ 0 & l'_s & -\frac{1}{2}M' & \frac{\sqrt{3}}{2}M' \\ \frac{3}{2} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{3} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

où : $l'_s = l_s - M_{ss}$, inductance cyclique propre du stator

$M' = M'^2_{sr}/l'_r$

L'expression du couple électromagnétique se simplifie pour donner :

$$c_e = p\, M' [\, \frac{\sqrt{3}}{2} (j_{s1} + 2j_{s2})\, i'_d - \frac{3}{2}\, j_{s1} . i'_q \,] \qquad (3.13)$$

1.4.2 Couplage triangle, alimentation monophasée

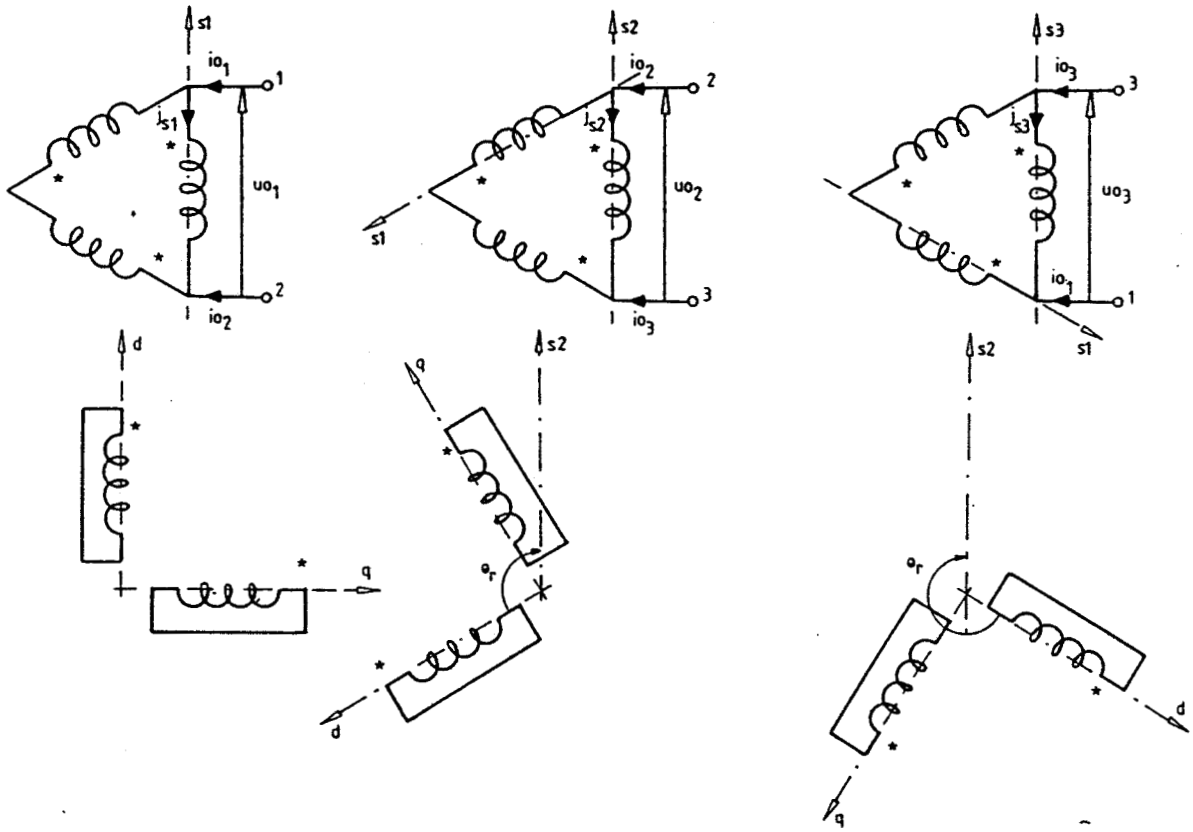
L'alimentation monophasée du moteur est obtenue lorsqu'un courant en sortie de l'onduleur est nul, une seule tension est alors imposée au moteur (voir figures 3.4a, 3.4b, 3.4c). Les équations de Park ne dépendent plus que des tensions rotoriques nulles et de la tension imposée au stator par l'onduleur, uo_k, qui devient la seule grandeur statorique indépendante.

En désignant par k, l'indice de la tension imposée et avec les conventions de signe de la figure 3.5, nous obtenons le système matriciel d'ordre 3 suivant :

$$[U'_{Tm}]_k = [R'_{Tm}].[I'_{Tm}]_k + p\, \frac{d\Theta}{dt}\, [\alpha'_m].[L'_{Tm}]_k .[I'_{Tm}]_k + [L'_{Tm}]_k\, \frac{d}{dt}[I'_{Tm}]_k \qquad (3.14)$$

avec : $[U'_{Tm}]^t_k = [uo_k \;\; 0 \;\; 0]$; $[I'_{Tm}]^t_k = [j_{sk} \;\; i'_d \;\; i'_q]$

$$[R'_{Tm}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_r/l'_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r/l'_r \end{bmatrix} \qquad [\alpha'_m] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$



a- $io_3 = 0$, uo_1 imposée b- $io_1 = 0$, uo_2 imposée c- $io_2 = 0$, uo_3 imposée

Figure 3.4 : Alimentations monophasées du stator

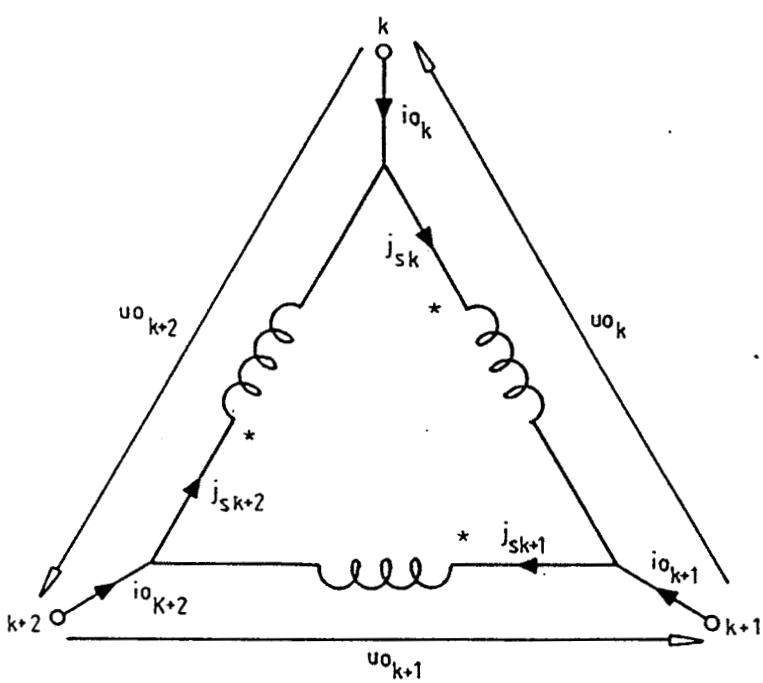


Figure 3.5 : Définition des courants et tensions indicés

Le tableau 3.6 rassemble, pour chaque valeur de k, les expressions de la matrice $[L'_{Tm}]$, des tensions induites dans les deux enroulements en série : ue_{k+1} et ue_{k+2}, du couple électromagnétique.

Les courants statoriques s'obtiennent aisément puisque $io_{k+2} = 0$: $io_{k+1} = -io_k$ et donc : $j_{sk+1} = j_{sk+2} = -\frac{1}{2} j_{sk}$

Nous constatons que la description change selon l'enroulement statorique alimenté ; la modélisation pour une alimentation monophasée n'est donc pas unique puisque les inductances mutuelles prennent des valeurs différentes suivant la position relative des enroulements considérés. Un modèle unique peut toutefois être établi /14/ /49/, en effectuant une rotation d'axes d et q jusqu'à aligner l'axe d avec l'axe de phase alimentée.

Quand la tension uo_k est seule imposée au moteur, le courant io_{k+2} est nul ; la rotation Θ_r qu'il faut effectuer pour obtenir la configuration énoncée est égale à : $(k - 1) \cdot \frac{2\pi}{3}$ (voir figure 3.4).

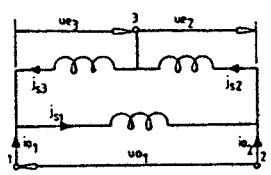
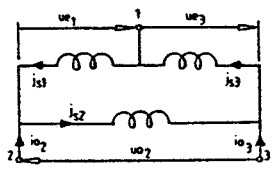
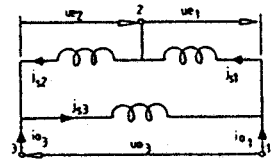
Schéma électrique du stator	Tension imposée	Relation entre les courants	Matrice $[L'_{Tm}]_k$	Tensions induites ue_{k+1}, ue_{k+2} Couple électromagnétique : Ce
	uo_1	$io_3 = 0$, $io_2 = -io_1$, $j_{s2} = j_{s3} = -\frac{1}{2} j_{s1}$	$[L'_{Tm}]_1 = \begin{bmatrix} l'_s & M' & 0 \\ \frac{3}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$ue_2 = -\frac{1}{2}(R_s + l'_s \frac{d}{dt}).j_{s1} - \frac{M'd}{2\,dt} i'_d + \frac{\sqrt{3}}{2} M' \frac{d}{dt} i'_q$ $ue_3 = -\frac{1}{2}(R_s + l'_s \frac{d}{dt}).j_{s1} - \frac{M'd}{2\,dt} i'_d - \frac{\sqrt{3}}{2} M' \frac{d}{dt} i'_q$ $Ce = -\frac{3}{2} p.M'.i'_q.j_{s1}$
	uo_2	$io_1 = 0$, $io_3 = -io_2$, $j_{s3} = j_{s1} = -\frac{1}{2} j_{s2}$	$[L'_{Tm}]_2 = \begin{bmatrix} l'_s & -\frac{M'}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} M' \\ -\frac{3}{4} & 1 & 0 \\ 3\frac{\sqrt{3}}{4} & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$ue_3 = -\frac{1}{2}(R_s + l'_s \frac{d}{dt}).j_{s2} - \frac{M'd}{2\,dt} i'_d - \frac{\sqrt{3}}{2} M' \frac{d}{dt} i'_q$ $ue_1 = -\frac{1}{2}(R_s + l'_s \frac{d}{dt}).j_{s2} + M' \frac{d}{dt} i'_d$ $Ce = \frac{3}{4} p M' (\sqrt{3}\, i'_d + i'_q).\, j_{s2}$
	uo_3	$io_2 = 0$, $io_1 = -io_3$, $j_{s1} = j_{s2} = -\frac{1}{2} j_{s3}$	$[L'_{Tm}]_3 = \begin{bmatrix} l'_s & -\frac{M'}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} M' \\ -\frac{3}{4} & 1 & 0 \\ -\frac{3\sqrt{3}}{4} & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$ue_1 = -\frac{1}{2}(R_s + l'_s \frac{d}{dt}).j_{s3} + M' \frac{d}{dt} i'_d$ $ue_2 = -\frac{1}{2}(R_s + l'_s \frac{d}{dt}).j_{s3} - \frac{M'}{2} \frac{d}{dt} i'_d + \frac{\sqrt{3}}{2} M' \frac{d}{dt} i'_q$ $Ce = \frac{3}{4} p M' (-\sqrt{3}\, i'_d + i'_q).\, j_{s3}$

Tableau récapitulatif 3.6 : Couplage Triangle, alimentation Monophasée

1.4.3 Machine asynchrone apparemment déconnectée

Aucune tension n'est imposée par l'onduleur : tous les courants en ligne sont donc nuls, mais les tensions aux bornes des enroulements sont conditionnées par l'état électromagnétique de la machine (figure 3.7).
Le système est alors réduit à sa plus simple expression (ordre 2) :

$$[U'_{Td}] = [R_{Td}]\,[I'_{Td}] + p\,\frac{d\Theta}{dt}[\alpha_{Td}]\,[L_{Td}]\,[I'_{Td}] + [L_{Td}]\,\frac{d}{dt}\,[I'_{Td}] \quad (3.16)$$

où :

$$[U'_{Td}]=\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix} \quad [I'_{Td}]=\begin{bmatrix}i'_d\\i'_q\end{bmatrix} \quad [R_{Td}]=\begin{bmatrix}R_r/l'_r & 0\\0 & R_r/l'_r\end{bmatrix} \quad [L_{Td}]=\begin{bmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{bmatrix} \quad [\alpha_{Td}]=\begin{bmatrix}0 & 1\\-1 & 0\end{bmatrix}$$

Il n'y a pas de courant de circulation dans le triangle, $j_s = 0$, le couple électromagnétique est nul et les tensions induites au stator ont pour expressions :

$$eo_1 = M' \cdot \frac{d}{dt}\,i'_d$$

$$eo_2 = -\frac{1}{2}\,M'\,\frac{d}{dt}\,i'_d + \frac{\sqrt{3}}{2}\,M'\,\frac{d}{dt}\,i'_q$$

$$eo_3 = -(eo_1 + eo_2)$$

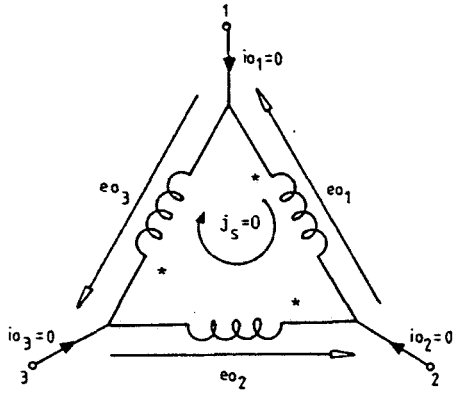


Figure 3.7 : Répartition des tensions, charge "déconnectée" .

La connaissance de la valeur de ces tensions est importante puisque comme nous l'avons vu au chapitre 2, elles permettent le calcul de la répartition des tensions aux bornes des composants de l'onduleur /50/.

1.4.4 Couplage étoile

Les enroulements sont cette fois soumis aux tensions simples et parcourus par les courants de ligne, $u_k = vo_k$ et $j_{sk} = io_k$ (voir figure 3.8) ; les équations électriques du moteur sont toujours décrites par la relation (3.4) avec :

$$[U']^t = [vo_1\ vo_2\ vo_3\ 0\ 0] \qquad [I']^t = [io_1\ io_2\ io_3\ i'_d\ i'_q]$$

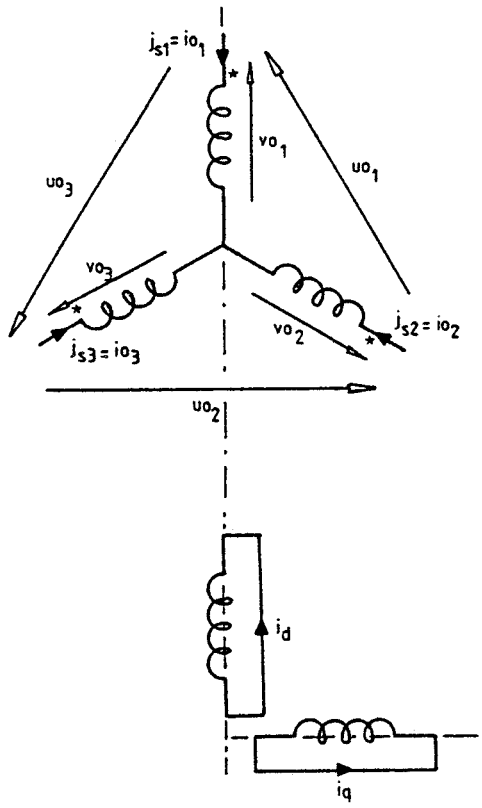


Figure 3.8 : Couplage étoile,
alimentation triphasée.

Ce système dépend des tensions simples qui ne font pas partie des données du programme onduleur, pour plus de commodité, nous préférons donc exprimer celui-ci à partir des tensions composées, directement issues de l'onduleur.

Ces deux systèmes de tensions sont liés par la matrice de passage [B], tel que :

$$\begin{bmatrix} uo_1 \\ uo_2 \\ uo_3 \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} vo_1 \\ vo_2 \\ vo_3 \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

En appliquant cette transformation à l'équation (3.4), il vient :

$$[B] \,.\, [U'] = \left([B] \,.\, [R'] + p \frac{d\theta}{dt} . [B]\ [\alpha']\ [L'] + [B]\ [L'] \frac{d}{dt} \right) [I']$$

Ce système d'ordre 5 est réduit à 4 en remarquant que :

$$uo_1 + uo_2 + uo_3 = 0$$
$$io_1 + io_2 + io_3 = 0$$

soit : $$[U_E'] = [R_E'] + p\,\frac{d\Theta}{dt}\,[\alpha']\,[L_E'] + [L_E']\,\frac{d}{dt}\,[I_E'] \qquad (3.17)$$

avec : $[U_E']^t = [uo_1\ uo_2\ 0\ 0]$ $\qquad [I_E']^t = [io_1\ io_2\ i_d'\ i_q']$

$$[L_E'] = \begin{bmatrix} l_s' & -l_s' & M' & 0 \\ l_s' & 2l_s' & -\frac{1}{2}M' & \frac{\sqrt{3}}{2}M' \\ \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & 1 & 0 \\ \frac{3\sqrt{3}}{2} & \frac{3\sqrt{3}}{2} & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [R_E'] = \begin{bmatrix} R_s & -R_s & 0 & 0 \\ R_s & 2R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r/l_r' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r/l_r' \end{bmatrix}$$

le couple électromagnétique s'écrit :

$$c_e = pM'\,[\frac{\sqrt{3}}{2}(io_1 + 2io_2)\,.\,i_d' - \frac{3}{2}\,io_1\,.\,i_q']$$

La même démarche de calcul que celle adoptée pour le couplage triangle est menée ici, lorsqu'un courant en sortie de l'onduleur est nul. Une seule tension est alors appliquée aux bornes de deux enroulements placés en série (figure 3.9).

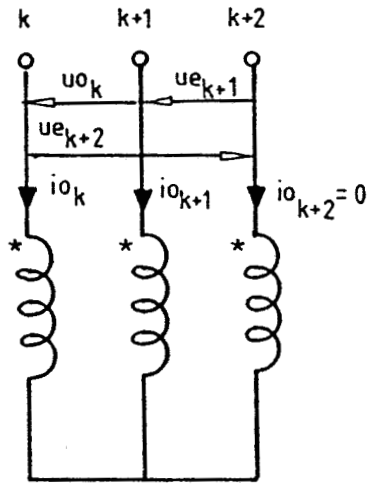


Figure 3.9 : Alimentation monophasée pour le couplage étoile.

En désignant par k, l'indice de la tension imposée, l'équation matricielle s'écrit :

$$[U'_{Em}]_k = [R'_{Em}].[I'_{Em}]_k + p\frac{d}{dt}[\alpha'_m].[L'_{Em}]_k.[I'_{Em}]_k + [L'_{Em}]_k\frac{d}{dt}[I'_{Em}]_k \qquad (3.18)$$

Les différentes matrices constituant cette équation sont :

$$[U'_{Em}]_k = [uo_k \;\; 0 \;\; 0] \; ; \; [I'_{Em}]_k = [io_k \;\; i'_d \;\; i'_q]$$

$$[R_{Em}] = \begin{bmatrix} 2R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_r/l'_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r/l'_r \end{bmatrix} \qquad [\alpha'_m] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[L_{Em}]_1 = \begin{bmatrix} 2l'_s & M' & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [L_{Em}]_2 = \begin{bmatrix} 2l'_s & -\frac{M'}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}M' \\ 3/2 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [L_{Em}]_3 = \begin{bmatrix} 2l'_s & -\frac{M'}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}M' \\ -3/2 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les tensions induites et le couple électromagnétique, selon la valeur de k, prennent les valeurs suivantes :

* <u>k=1</u> : $io_3 = 0$, $io_2 = -io_1$, uo_1 imposée

$$ue_2 = -(R_s + l'_s\frac{d}{dt})\, io_1 - \frac{M'}{2}\frac{d}{dt}i'_d + \frac{\sqrt{3}}{2}M'\frac{d}{dt}i'_q$$

$$ue_3 = -(R_s + l'_s\frac{d}{dt})\, io_1 - \frac{M'}{2}\frac{d}{dt}i'_d - \frac{\sqrt{3}}{2}M'\frac{d}{dt}i'_q$$

$$C_e = p\frac{M'}{2}\,[\,3\,i'_d - 3\,i'_q]\,io_1$$

* <u>k=2</u> : $io_1 = 0$, $io_3 = -io_2$, uo_2 imposée

$$ue_1 = -(R_s + l'_s\frac{d}{dt})\, io_2 + M'\frac{d}{dt}i'_d$$

$$ue_3 = -(R_s + l'_s\frac{d}{dt})\, io_2 - \frac{M'}{2}\frac{d}{dt}i'_d - \frac{\sqrt{3}}{2}M'\frac{d}{dt}i'_q$$

$$C_e = p\frac{M'}{2}\,[\sqrt{3}\,i'_d\,]io_2$$

* $\underline{k=3}$: $io_2 = 0$, $io_1 = -io_3$, uo_3 imposée

$$ue_1 = -(R_s + l'_s \frac{d}{dt})\, io_3 + M' \frac{d}{dt} i'_d$$

$$ue_2 = -(R_s + l'_s \frac{d}{dt})\, io_3 - \frac{M'}{2} \frac{d}{dt} i'_d + \frac{\sqrt{3}}{2} M' \frac{d}{dt} i'_q$$

$$C_e = p\, M' \left[-\sqrt{3}\, i'_d + \frac{3}{2} i'_q\right] io_3$$

Lorsque les trois courants en ligne sont nuls, la machine est caractérisée par les mêmes équations que pour le couplage triangle.

1.5 Equation mécanique

Le couple des forces électromagnétiques équilibre le couple de la charge mécanique C_m, soit :

$$C_e = C_m = J_m \frac{d\Omega}{dt} + C_p + C_r(\Omega)$$

BU LILLE

où : Jm est le moment d'inertie des parties tournantes

C_p, le couple dû aux pertes. En général, on considère qu'il est la somme de trois termes : un couple de frottement sec indépendant de la vitesse, un couple de frottement visqueux proportionnel à la vitesse et un couple de frottement fluide variant avec le carré de la vitesse (ici négligé).

$C_r(\Omega)$ représente le couple de la charge.

1.6 Résultats - Validation

L'organigramme de programmation présenté au chapitre 2 (figure 2.36) reste toujours valable lorsque l'on associe le changeur de fréquence au moteur asynchrone. Les équations de la charge sont remplacées par les équations de fonctionnement de la machine. Le systéme différentiel décrivant la partie électrique est résolu en appliquant la méthode d'intégration de Runge Kutta à l'ordre 4 /51/. En revanche pour l'équation différentielle mécanique, compte tenu des constantes de temps très grandes devant le pas de calcul, nous utilisons la méthode d'Euler.

Les résultats présentés ci-après portent sur une machine asynchrone à cage de 3 kW, identifiée par les paramètres suivants :

- Tension nominale à 50Hz : 220 V
- Couple nominal : 20 Nm
- $R_s = 1{,}4\ \Omega$, $L'_s = 0{,}24$ H
- $R_r/l'_r = 5s^{-1}$, $M' = M'^2_{sr}/l'_r = 0{,}15$ H
- $J_m = 0{,}09\ m^2.kg$

Dans un premier temps, afin de valider le modèle présenté, les enroulements statoriques couplés en triangle sont alimentés par des créneaux de tension de forme simple. Les figures 3.12 à 3.17 représentent les formes d'onde des différentes grandeurs caractérisant le fonctionnement de la structure complète (figure 3.11) lorsque la commande de l'onduleur est du type 180° (pleine onde) ou faiblement modulée.

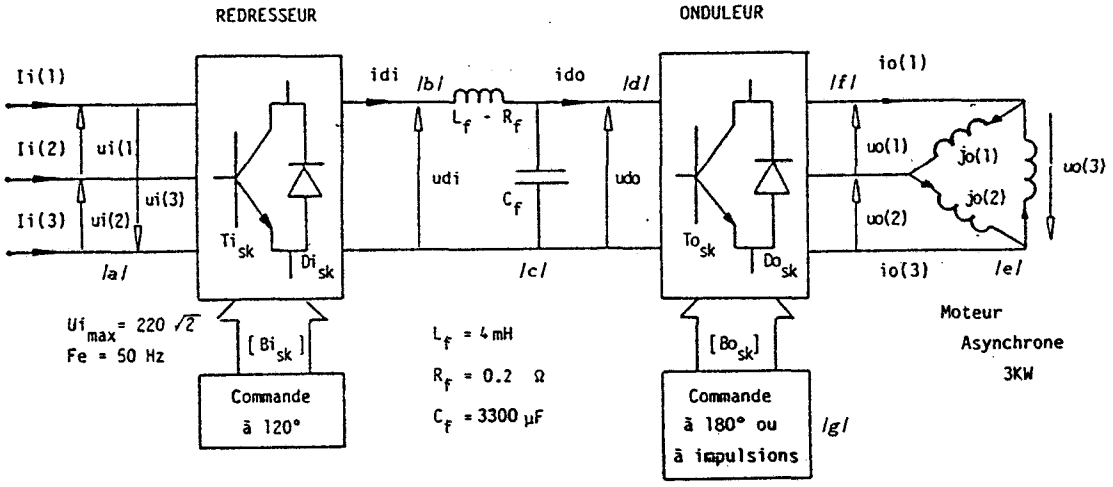


Figure 3.11 : Montage étudié - Notations - Paramètres

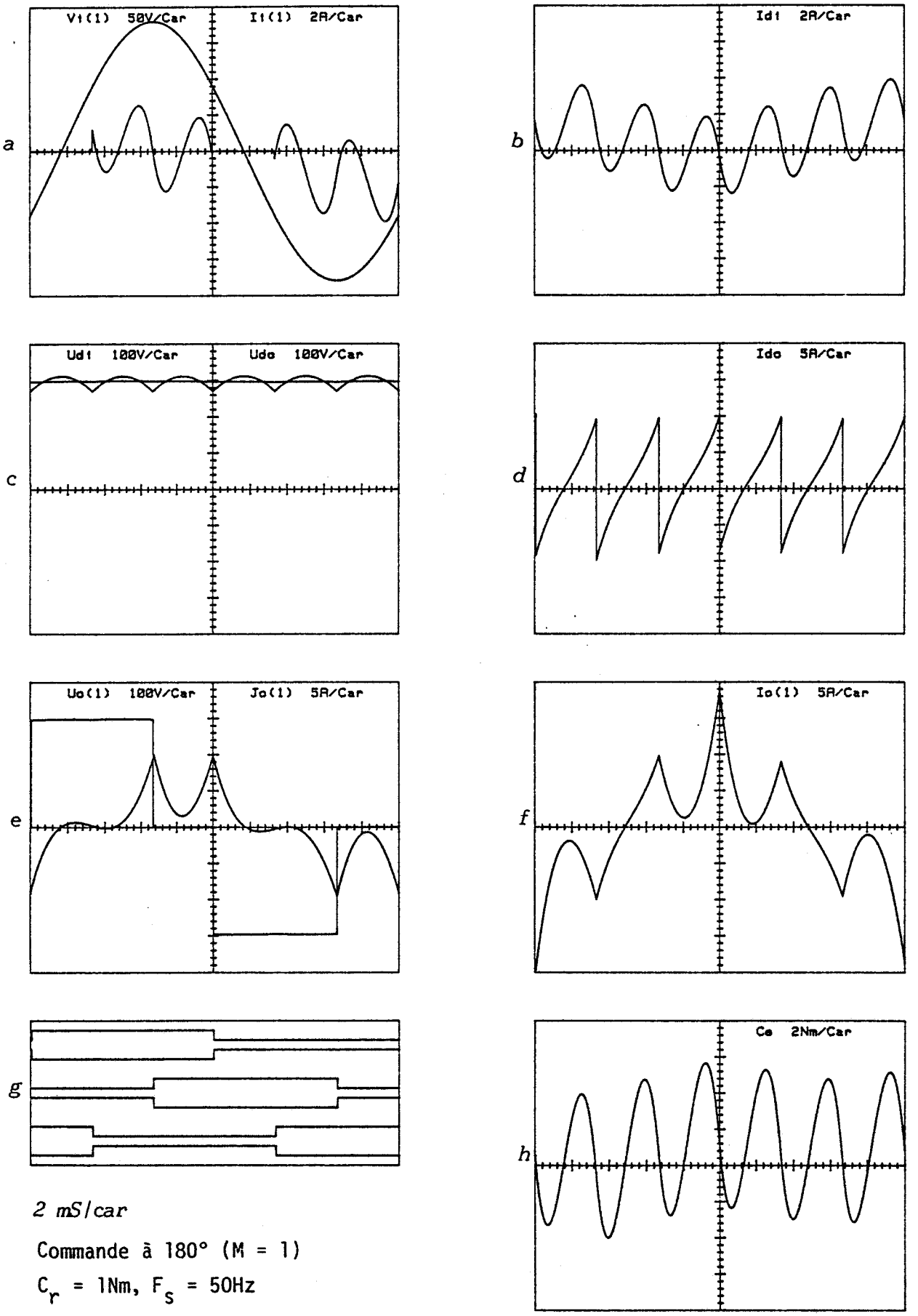
Pour chaque figure, le chronogramme *g* donne la loi de commande de l'onduleur, les courbes e représentent les évolutions du courant jo(1) et de la tension uo(1) pour un enroulement statorique, tandis que les courbes *a* définissent les échanges de puissance entre le convertisseur et le réseau (produit $vi_1.Ii_1$). La représentation *h* permet d'apprécier l'influence de la commande sur le couple électromagnétique, C_e, développé par la machine.

Lorsque la machine asynchrone est alimentée par des créneaux de tension non découpés (figures 3.12 et 3.15), les premiers harmoniques de courant (principalement 5 et 7) sont élevés ; le courant crête traver-

sant les composants de puissance (voir courbe f) prend alors une valeur importante face à la valeur efficace du fondamental. La figure 3.18 montre l'évolution de ce rapport lorsque l'on passe d'une onde de tension rectangulaire à une tension formée de M impulsions par demi-période.

Outre les répercussions des premiers harmoniques de courant sur l'onduleur, il ne faut pas négliger leurs effets sur le couple électromagnétique. Le couple pulsatoire qui se superpose au couple moyen résulte de l'interaction entre la composante fondamentale du courant et les différents harmoniques. Les harmoniques de courant 5 et 7 donnent lieu à des champs tournant, par rapport au rotor, à six fois la vitesse de synchronisme du fondamental ; le couple pulsatoire dû à ces harmoniques aura donc une fréquence égale à six fois la fréquence d'alimentation du moteur.
La figure 3.19 représente l'évolution de ce couple pour les différents types d'alimentation envisagés.

La figure 3.20 confronte les formes d'ondes issues du modèle numérique aux relevés expérimentaux effectués sur le montage schématisé figure 3.11.

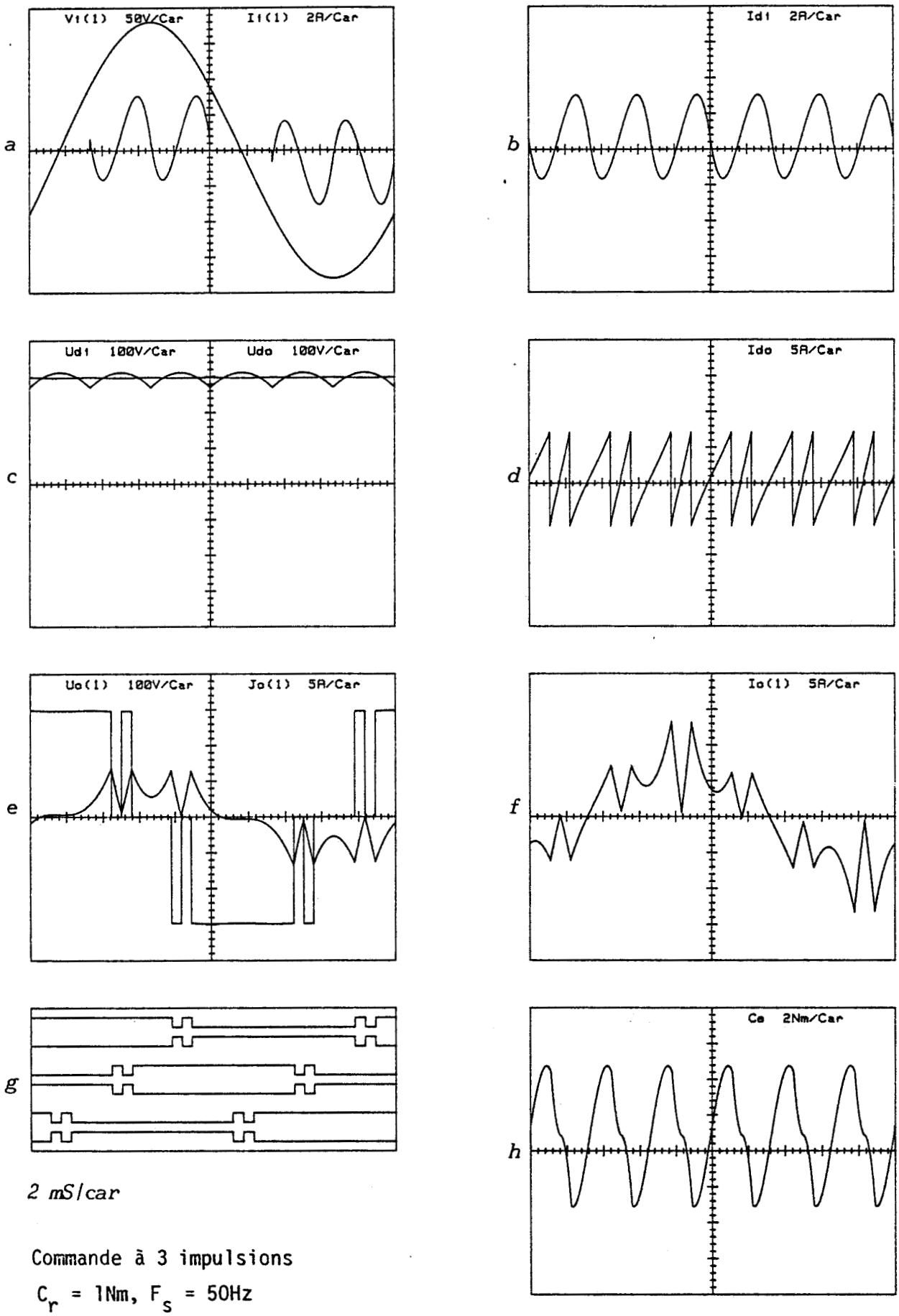


2 mS/car

Commande à 180° (M = 1)

C_r = 1Nm, F_s = 50Hz

Figure 3.12 : Essai à vide, commande à 180°

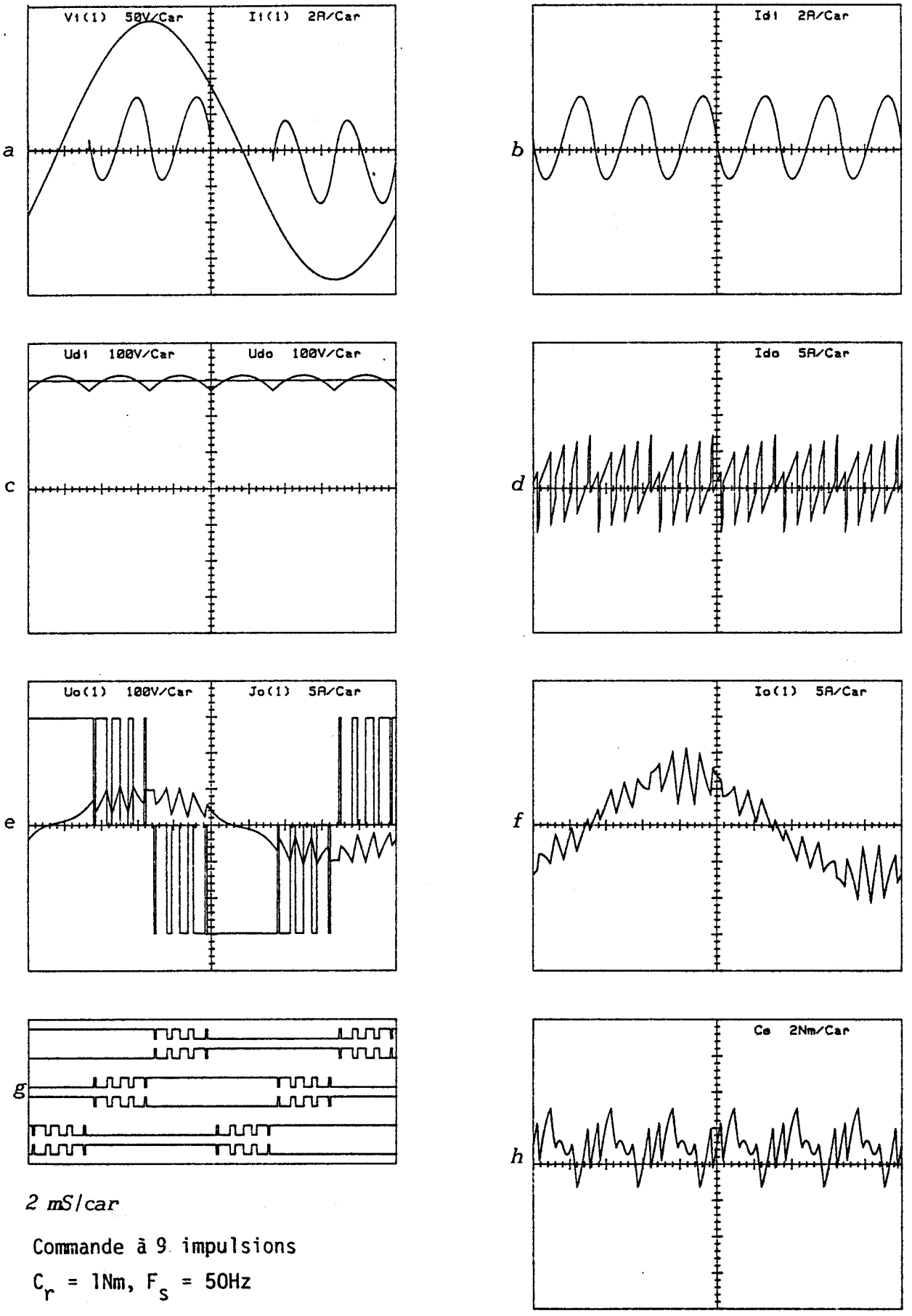


2 mS/car

Commande à 3 impulsions

C_r = 1Nm, F_s = 50Hz

Figure 3.13 : Essai à vide, M = 3

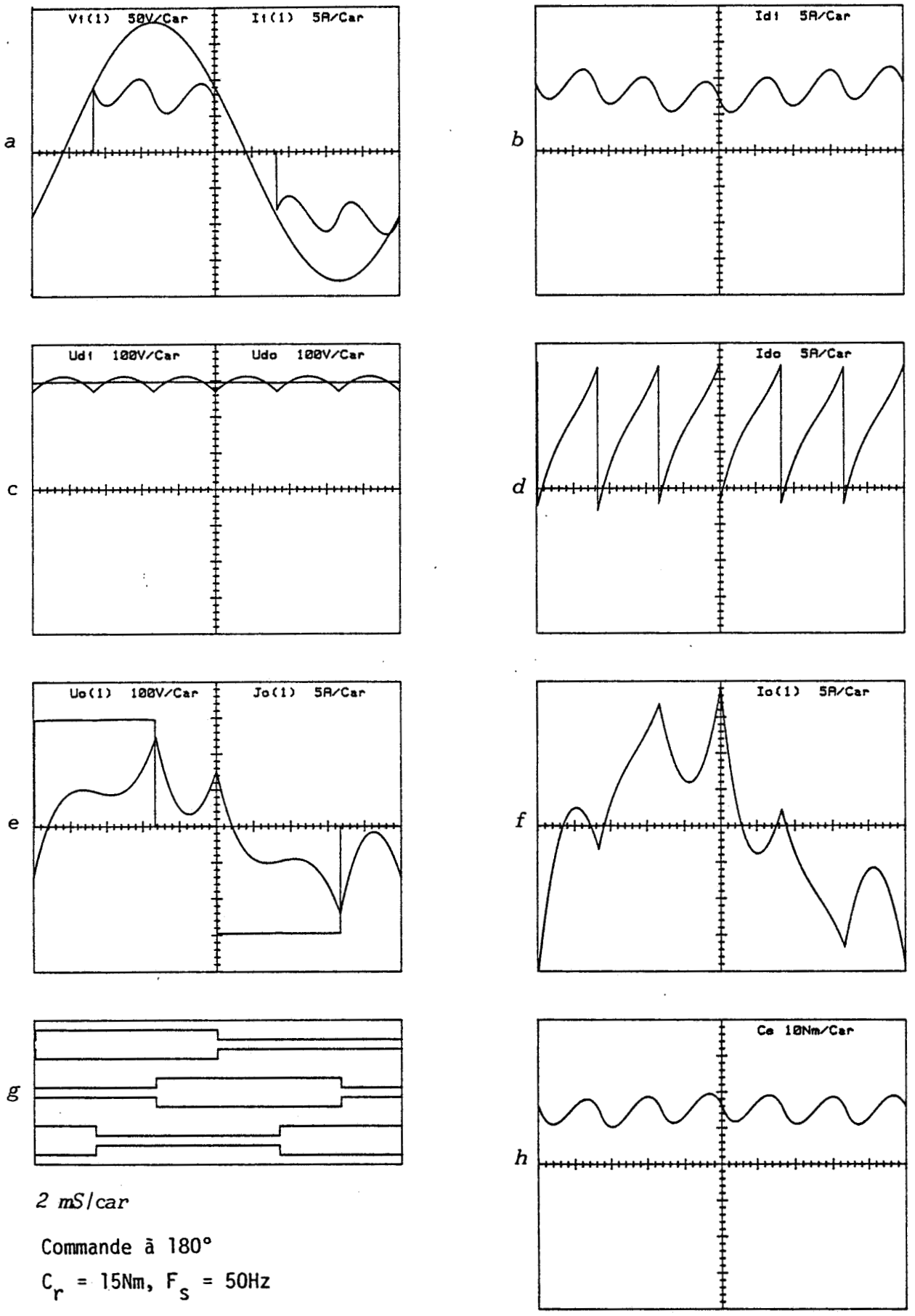


2 mS/car

Commande à 9 impulsions

C_r = 1Nm, F_s = 50Hz

Figure 3.14 : Essai à vide, M = 9

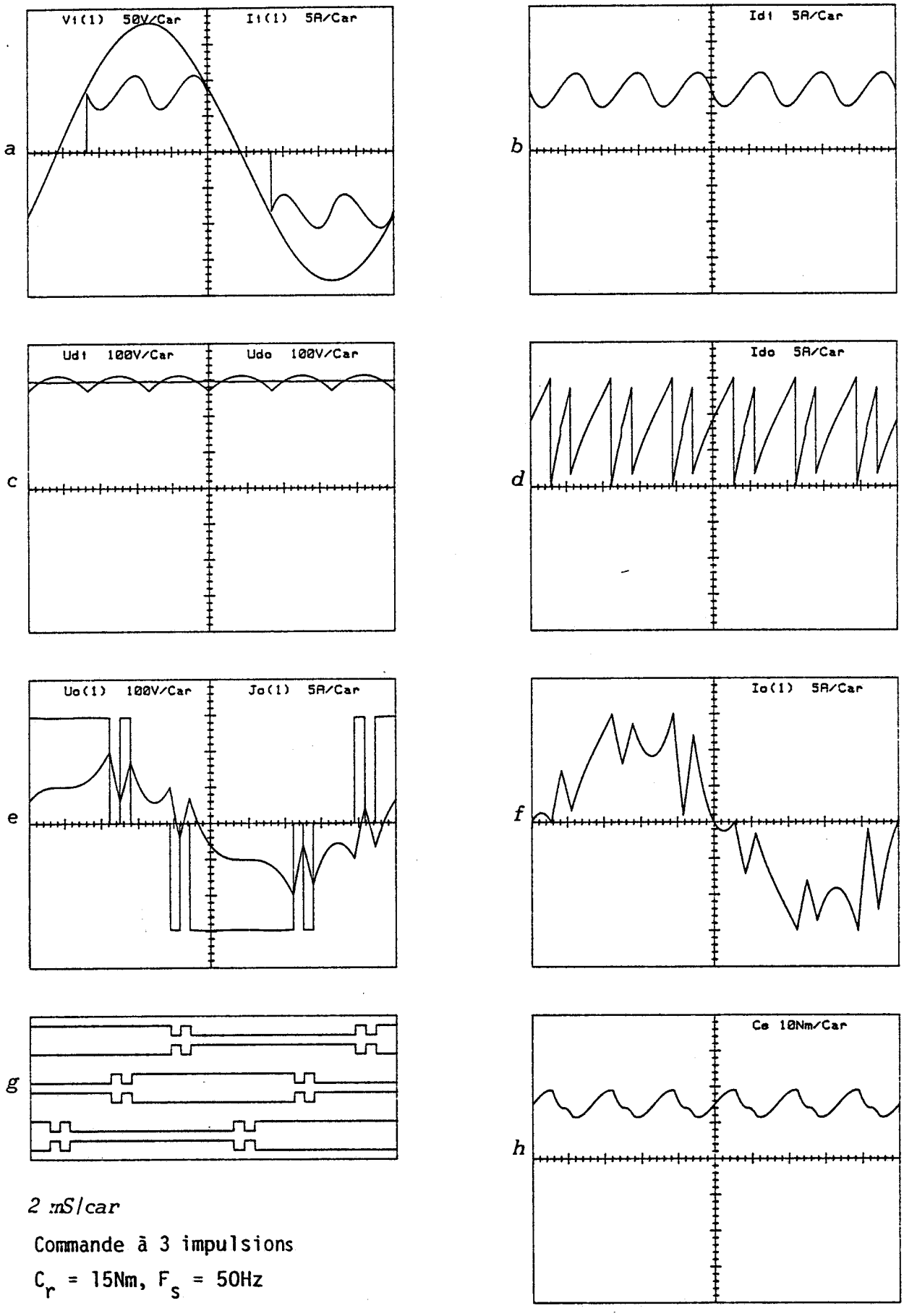


2 mS/car

Commande à 180°

C_r = 15Nm, F_s = 50Hz

Figure 3.15 : Essai en charge, M = 1

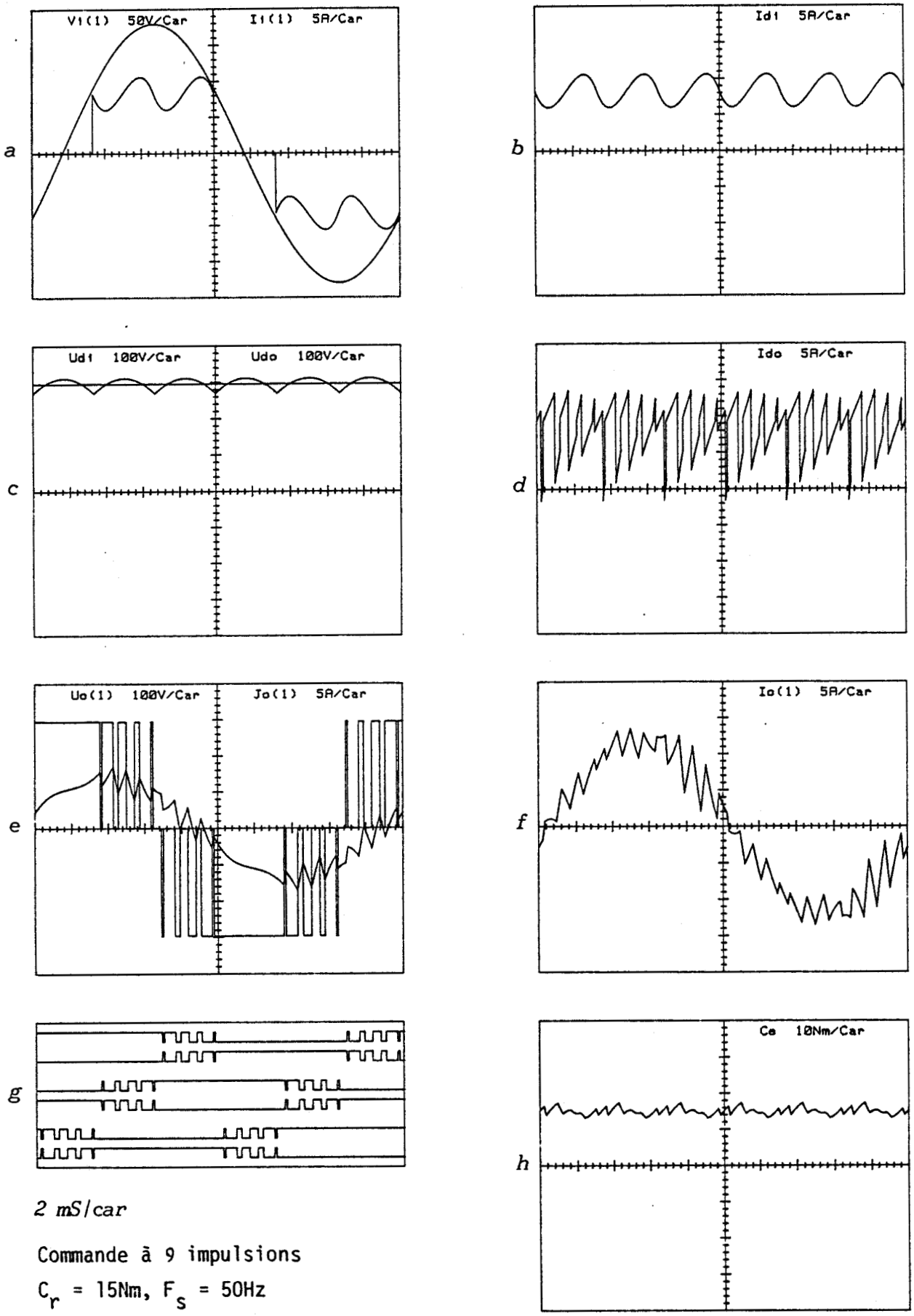


2 mS/car

Commande à 3 impulsions

C_r = 15Nm, F_s = 50Hz

Figure 3.16 : Essai en charge, M = 3



2 mS/car

Commande à 9 impulsions

C_r = 15Nm, F_s = 50Hz

Figure 3.17 : Essai en charge, M = 9

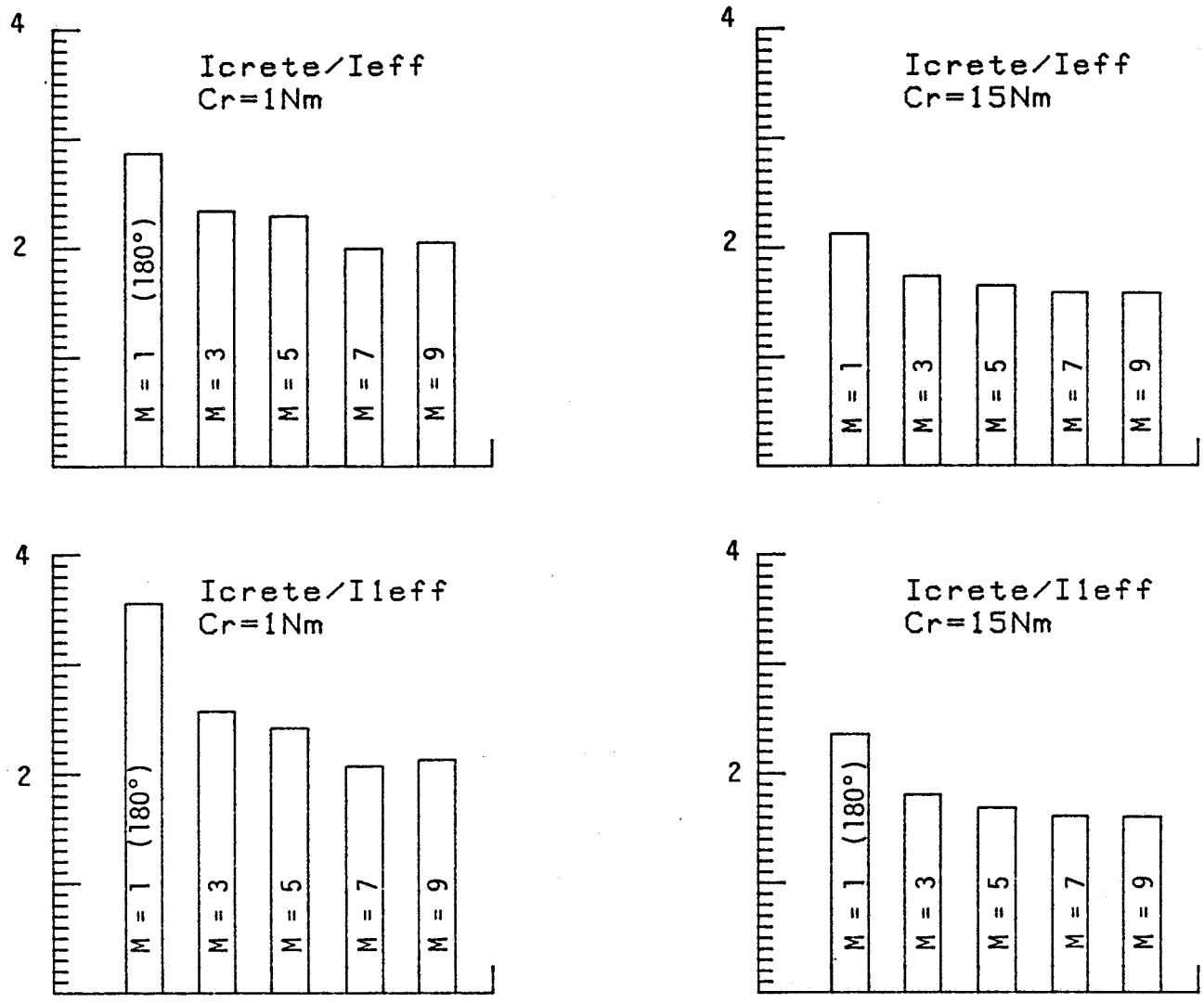


Figure 3.18 : Evolution du courant crête en fonction du nombre d'impulsions de tension par ½ période.

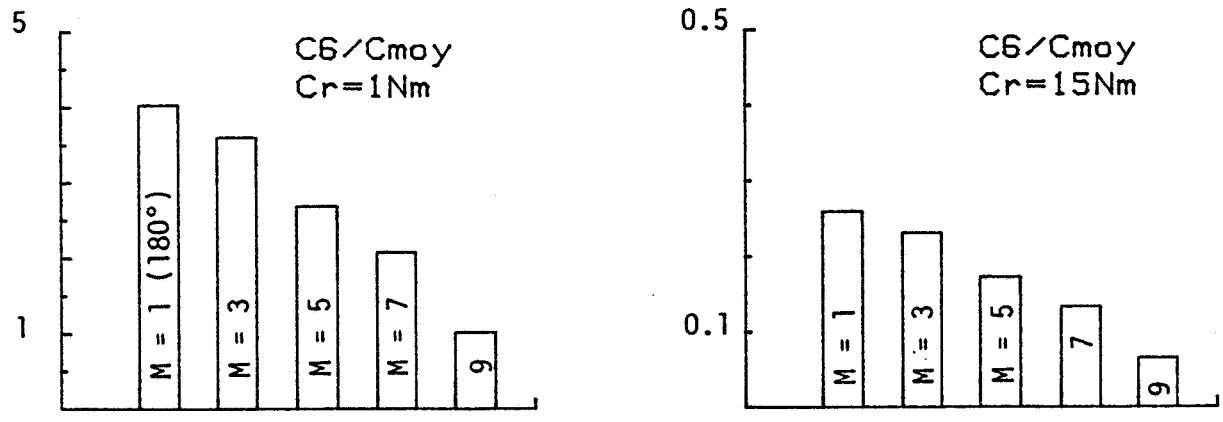
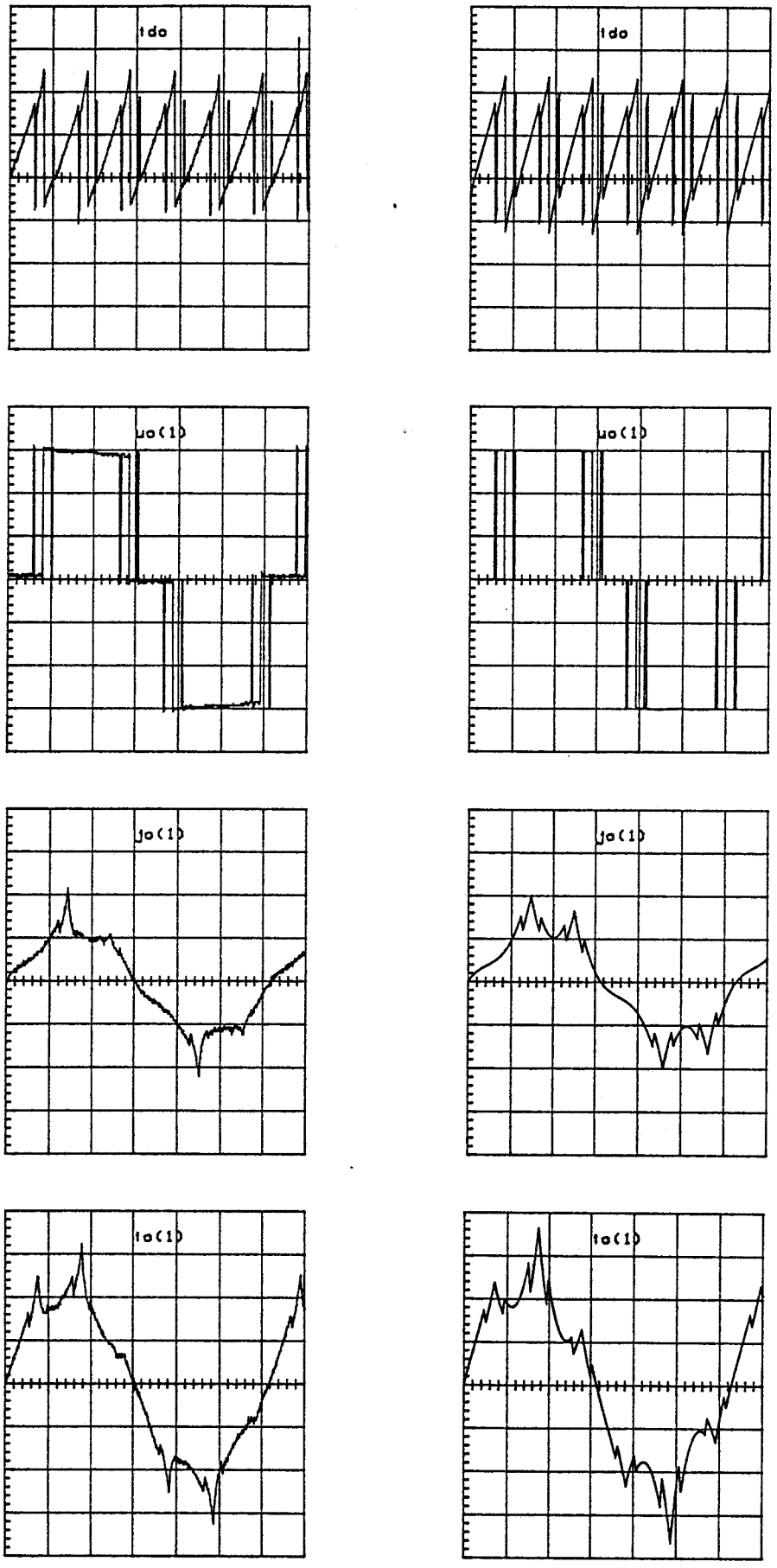


Figure 3.19 : Evolution de l'harmonique 6 du couple en fonction du nombre d'impulsions de tension par ½ période.

Figure 3.20 : Validation du modèle ONDULEUR - MOTEUR

COURBES EXPERIMENTALES *COURBES SIMULEES*



Echelles : 2A/Car 50V/Car 4mS/Car

Conditions des essais : C_r = 1Nm, F_s = 40.5Hz, udo = 150V

1.7 Conclusion

L'alimentation du moteur asynchrone par des tensions non sinusoïdales engendre une série de perturbations : pointes de courants, bruit /52/, couple pulsatoire et pertes supplémentaires /53/ /54/ /55/.

Ces perturbations sont d'autant plus importante que la tension générée par l'onduleur est riche en harmoniques de faible rang (pleine onde par exemple). L'introduction de commutations supplémentaires, dans les formes d'onde des tensions, rejette ces harmoniques vers des fréquences plus élevées et compte tenu du caractère inductif de la machine, l'amplitude des courants harmoniques et le couple pulsatoire /38/ diminuent.

2 - COMMANDE RAPPROCHEE DE L'ONDULEUR

2.1 Introduction - Choix d'une stratégie

L'entraînement en vitesse variable du moteur nécessite le maintien d'une induction constante au sein de l'entrefer. Pour cela, le changeur de fréquence doit assurer la variation de la tension efficace appliquée au moteur, en fonction de la fréquence désirée. Dans les montages classiques, cette variation est réalisée par un étage hacheur intercalé entre le redresseur et l'onduleur. Ici deux modes de réglage sont envisageables :

- ou cette fonction est intégrée au montage redresseur, auquel cas la tension udi doit être asservie à la fréquence de fonctionnement de l'onduleur ; la commande du redresseur devient alors nécessairement plus complexe /56/ ; les composants du filtre intermédiaire prennent des valeurs importantes.

- ou cette fonction est réalisée par l'onduleur qui opère suivant le procédé de Modulation de Largeur d'Impulsions (M.L.I.). La tension de sortie est alors constituée d'une suite de créneaux d'amplitude fixe mais de largeur variable et dans ces conditions, seule la séquence de commande des transistors de l'onduleur détermine l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie.

Le second mode de réglage nous semble le mieux adapté : il ne nécessite pas de boucle de régulation sur la tension intermédiaire et il permet un fonctionnement autonome des deux montages (redresseur et onduleur) ; la stabilité de la tension intermédiaire autorise un filtre plus petit.

Il y a différentes façons de concevoir un modulateur M.L.I. ; P. Mathys /20/ en expose quelques-unes. Les structures les plus couramment rencontrées sont, soit entièrement numériques, soit hybrides. Les réalisations, généralement bâties autour d'un microprocesseur, diffèrent selon que la modulation est CALCULEE ou ENGENDREE /57/.

* Pour une MODULATION CALCULEE, les instants de commutation sont estimés à l'avance sur l'ordinateur en fonction de critères mathématiques ; ils sont ensuite tabulés dans des mémoires mortes /58/ /22/.
  Le microprocesseur qui pilote l'onduleur se contente alors de relire la séquence de commande associée à la fréquence de fonctionnement désirée.

* Dans le cas d'une MODULATION ENGENDREE, les angles de commutation résultent d'une comparaison entre deux signaux périodiques. Le premier, appelé modulante, est de fréquence égale à la fréquence fondamentale de la tension désirée ; le second, le signal porteur, est de fréquence plus élevée.
  La comparaison est réalisée directement par le microprocesseur à partir de ces signaux digitalisés ou après une conversion numérique-analogique, au moyen de circuits logiques /59/.
  Les progrès de l'électronique en matière d'intégration ont permis, depuis quelques années, la réalisation de circuits spécifiques, pour lesquels les différentes fonctions du modulateur (génération de la porteuse et de la modulante - comparaison - restitution des signaux de commande de base déphasés de 120°) se trouvent rassemblées sur une seule pastille de silicium /60/ /61/ /62/.

Après avoir passé très rapidement en revue les différentes solutions envisageables, il convient de choisir l'une d'entre elles, sachant que nous voulons avant tout étudier le comportement de la chaîne de conversion : REDRESSEUR bidirectionnel en courant - ONDULEUR, associée à un MOTEUR ASYNCHRONE ; et non les améliorations apportées par l'une ou l'autre des stratégies.

Les critères déterminants de notre choix sont donc la simplicité de mise en oeuvre et la souplesse d'utilisation.

La solution d'une modulation calculée et tabulée semblerait séduisante puisque, d'une part, elle recouvre ces critères et, d'autre part, permet l'implantation de n'importe quelle forme d'onde ; néanmoins, soulignons qu'elle nécessite beaucoup d'espace mémoire et demande une résolution suffisamment fine des angles de commutation (et donc une phase

de calcul importante), si l'on souhaite une neutralisation correcte des premiers harmoniques (voir Patel et Hoft /22/).
La précision de définition des angles est tributaire du nombre de bits du microprocesseur employé. Par exemple, l'implantation de cette stratégie sur un microprocesseur 8 bits limite cette précision à 1.4° /63/.

Pour toutes ces raisons ce sont les circuits spécifiques qui ont retenu plus particulièrement notre attention et nous avons finalement choisi l'emploi du modulateur tout intégré (HEF 4752) développé par Philips qui, comme nous le verrons, allie à la compacité, la souplesse et la simplicité de mise en oeuvre.

2.2 Description du modulateur

Le circuit intégré HEF 4752 réalisé en technologie MOS complémentaire comporte 28 broches (voir spécifications techniques en annexe 5) ; son organisation interne, relativement complexe, est schématisée sur la figure ci-dessous.

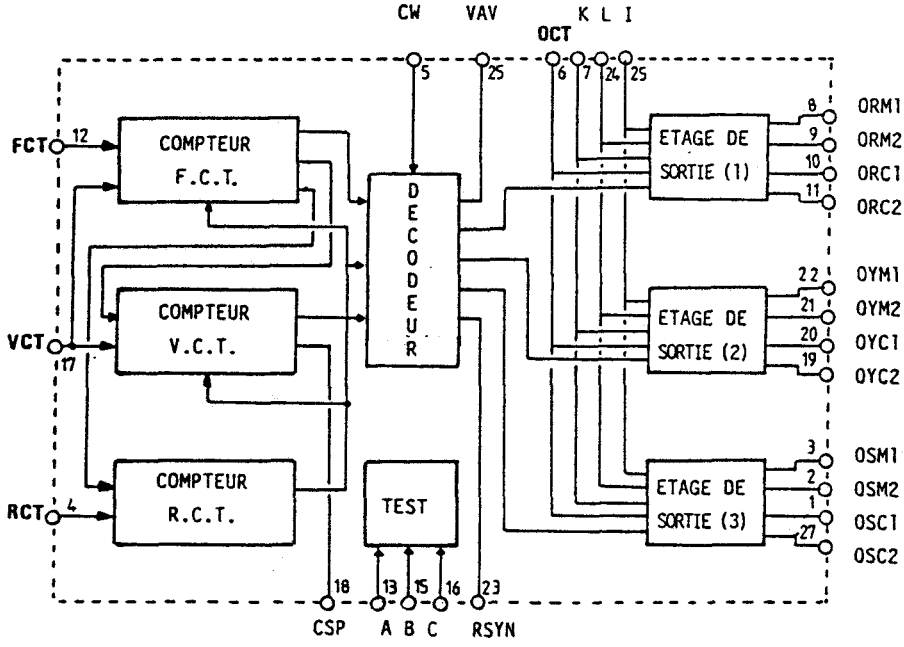


Figure 3.21 : Synoptique du HEF 4752

Le modulateur est piloté par quatre horloges externes :

- F.C.T. (Frequency Clock Trigger) : contrôle la fréquence de sortie, et donc la vitesse du moteur ;
  F.C.T. = 3360 F_s

- V.C.T. (Voltage Clock Trigger) : ajuste la largeur des impulsions pour une fréquence de sortie donnée. Cette horloge détermine donc la loi de variation de la tension efficace en sortie d'onduleur, en fonction de la fréquence de fonctionnement (rapport uo_{sk}/F_s). Par action sur V.C.T., il est donc possible de compenser les chutes de tension ohmiques au stator pour les basses fréquences et de surmoduler à fréquence nominale.

- R.C.T. (Reference Clock Trigger) : fixe la fréquence de commutation maximale ($F_p$max) de l'onduleur ;
  R.C.T. = 280 . $F_p$max. Lorsque le découpage atteint cette fréquence, le circuit sélectionne une modulation d'ordre inférieur.
  Pour éviter les instabilités, une hystérésis est introduite autour de chaque point de transition, de sorte que la passage en sens inverse s'effectue quand la fréquence des commutations chute à 0.6 . $F_p$max.

- O.C.T. (Output Clock Trigger) : permet d'optimiser les conditions de commutation, en ajustant le délai entre deux commutations successives d'une même branche.

Quatre entrées logiques sont également utilisées :

- I : configure les signaux de commande, soit pour un onduleur à transistors, soit pour un onduleur à thyristors (transforme les durées de conduction en train d'impulsions).

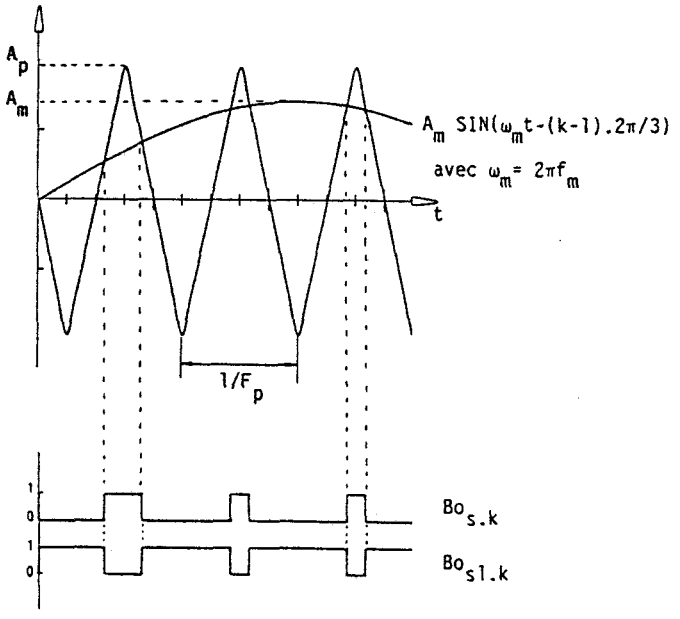
- K : fixe, conjointement avec l'oscillateur O.C.T., le temps de verrouillage durant lequel aucun composant d'une même branche n'est commandé.

- L : inhibe tous les signaux de commande.

- CW : permet d'inverser l'ordre des phases, et donc, le sens de rotation du moteur.

2.3 Principe de fonctionnement

La modulation implantée est une modulation classique du type synchrone à double-flanc : la porteuse, triangle isocèle de fréquence F_p, échantillonne une modulante sinusoïdale de fréquence fondamentale de l'onde souhaitée (figure 3.22).



Modulation synchrone à double flanc

Figure 3.22

Généralement, on désigne par TAUX DE MODULATION, le rapport des amplitudes maximales de ces deux signaux et par ORDRE DE MODULATION le rapport des fréquences :

- Taux de modulation = $Km = A_m/A_p$
- Ordre de modulation = $Kf = F_p/F_m = F_p/F_s$

Une modulation synchrone impose un rapport de fréquence entier Kf ; un calage de phase entre la porteuse et la modulante permet ensuite de tirer profit des symétries dans les formes d'onde générées.

Dans notre cas, le rapport Kf est égal à 15 ou 21 ou encore à l'un des premiers multiples pairs de ces deux valeurs (30, 42, 60, 84, 120, 168). La figure 3.23 donne les variations possibles de la fréquence porteuse en fonction de la fréquence de sortie.

La stratégie de modulation consiste à maintenir dans une bande étroite et autour d'une valeur suffisamment élevée, la fréquence porteuse sur tout le domaine de variation de la fréquence de sortie. Le modulateur assure cette tâche en modifiant le rapport Kf en fonction de la fréquence F_s, de sorte que la fréquence porteuse soit toujours comprise entre $F_p$max et 0.6 $F_p$max (voir figure 3.24).
Le choix de cette fréquence de découpage maximale ($F_p$max) est un compromis entre la distorsion tolérée pour l'onde de courant résultante et la fréquence de commutation acceptable par les composants de puissance.

La modulation triphasée des 6 transistors est obtenue, comme l'illustre la figure 3.25, par comparaison de troix signaux modulants déphasés de 120° (m1, m2, m3) à une porteuse triangulaire commune.

2.4 Modèle numérique du modulateur

Le modèle numérique du modulateur est construit conformément à la description que nous venons d'établir. Un sous-programme est affecté à cette fonction de modulation ; il réalise les différents tests et opérations nécessaires à l'identification des paramètres de modulation (Km, Kf) en fonction des grandeurs d'entrée (FCT, VCT, RCT, OCT) à la suite de quoi, il détermine la commande M.L.I. imposée à l'onduleur.

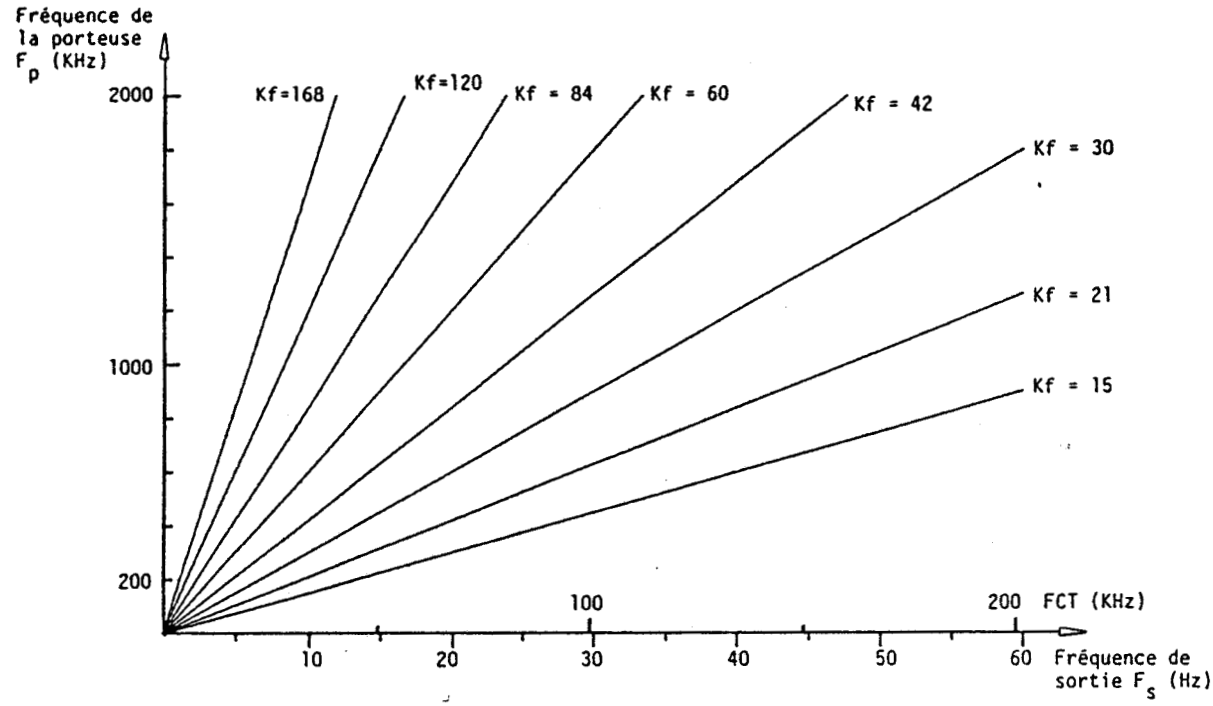


Figure 3.23 : Evolution de la fréquence porteuse

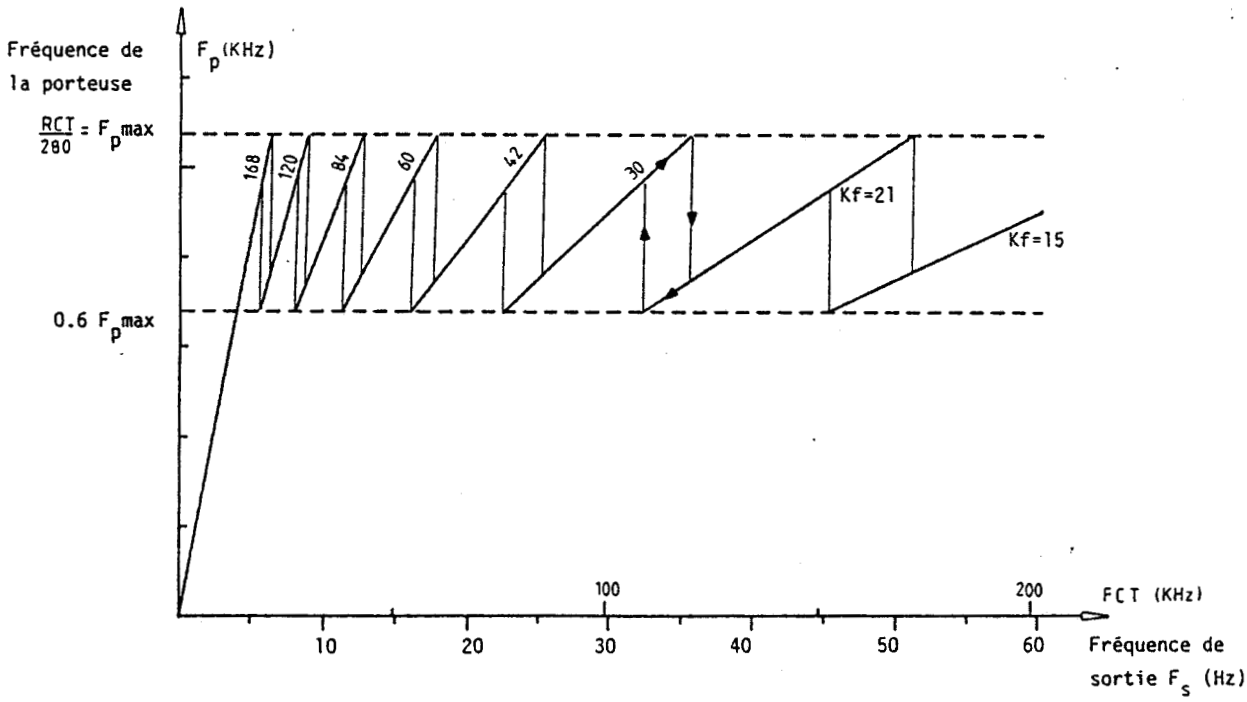


Figure 3.24 : Stratégie de modulation

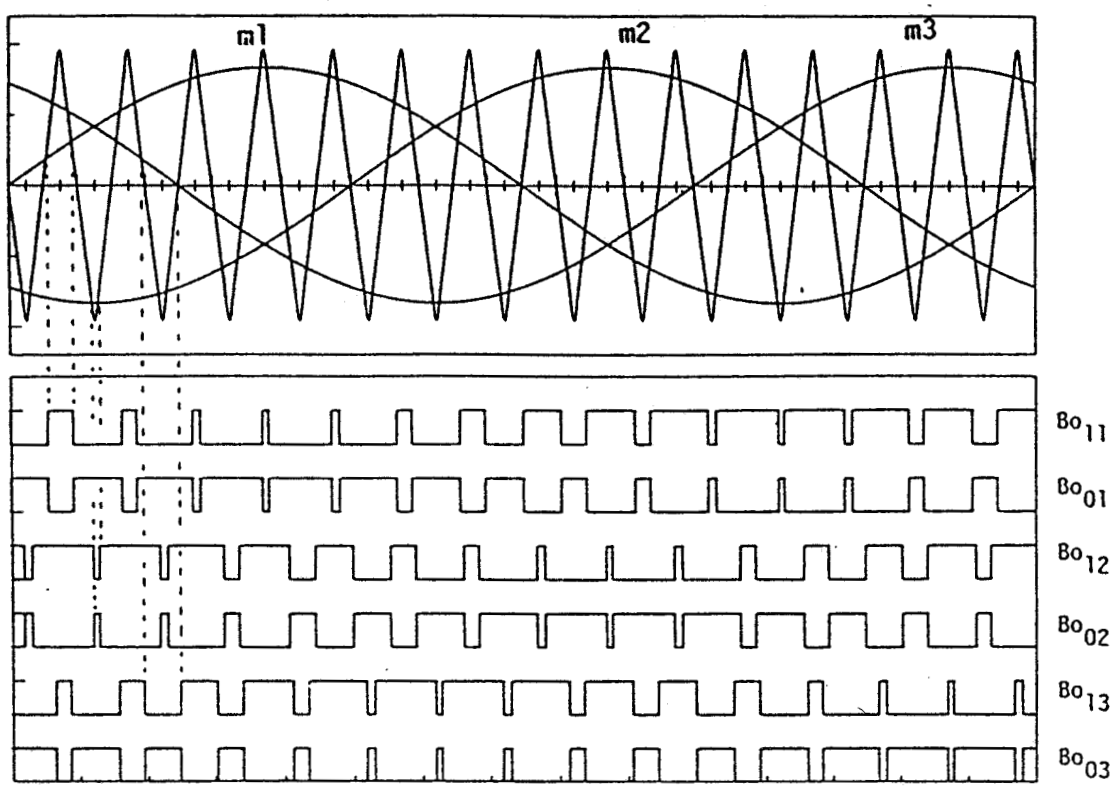
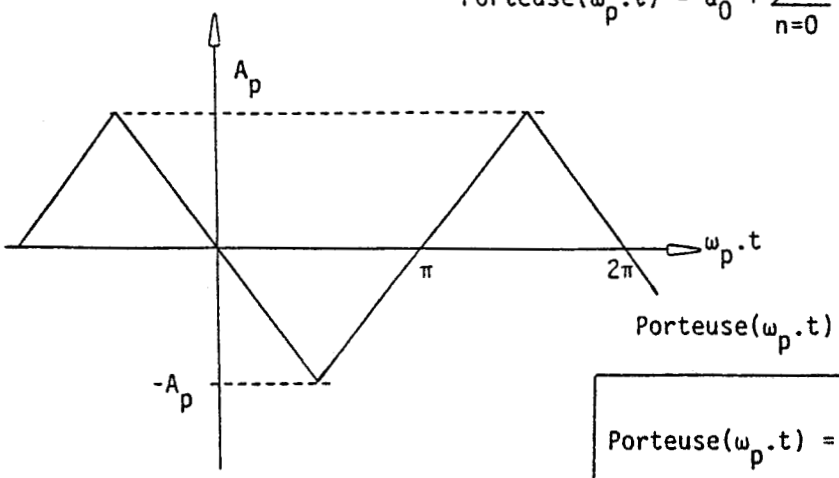


Figure 3.25 : Modulation triphasée
($Kf = F_p/F_s = 15$ - $Km = A_m/A_p = 0.85$)

$$\text{Porteuse}(\omega_p.t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n.\text{COS}(n\omega_p.t) + b_n.\text{SIN}(n\omega_p.t)$$



$a_0 = 0$

$a_n = 0$

$\omega_p = 2.\pi\ F_p$

$$\boxed{\text{Porteuse}(\omega_p.t) = \frac{8.A_p}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^{p+1}}{(2p+1)^2} \text{SIN}(2p+1)\omega_p.t}$$

Figure 3.26 : Mise en équation du signal porteur

La principale difficulté réside dans l'établissement d'un modèle, capable de restituer des signaux de commande corrects, lorsque la fréquence de fonctionnement évolue dans le temps. En effet, les consignes de fréquence variant au gré des accélérations et décélérations sollicitées par le contrôle éloigné du convertisseur, la forme des signaux modulants et porteur subit en conséquence des modifications, qui affectent à la fois leurs fréquence et amplitude.

Pour ce faire, nous avons recherché une formulation mathématique de ces signaux adaptée à notre problème. La porteuse étant un signal périodique, une solution appropriée réside dans l'utilisation de son développement en séries de Fourier (figure 3.26). Pour le triangle isocèle ce développement convergeant très vite vers la solution recherchée, seuls les premiers termes suffisent.

En formulant le signal porteur à partir d'une fonction trigonométrique et non à partir de segments de droite, nous nous affranchissons des tests successifs et du cumul d'erreurs lié au pas de calcul ; nous pouvons garantir un parfait synchronisme entre nos signaux même pour l'ordre de modulation le plus élevé (Kf = 168). Enfin le pas de calcul, n'est plus tenu d'être un sous-multiple de la période porteuse (voir remarque en annexe 3).

A partir de là, l'établissement du modèle dynamique pour le modulateur ne pose plus trop de problèmes à condition toutefois de corriger la phase des signaux lorsque la fréquence de consigne varie. La figure 3.27 explique le principe de cette correction sur la modulante. Il est bien évident que lorsque la fréquence de fonctionnement passe de F_{s1} à F_{s2}, la fréquence du signal porteur varie également de $F_{p1} = Kf_1.F_{s1}$ à $F_{p2} = Kf_2.F_{s2}$ (Kf_1 pouvant être différent de Kf_2) et une correction de même type devra être appliquée.

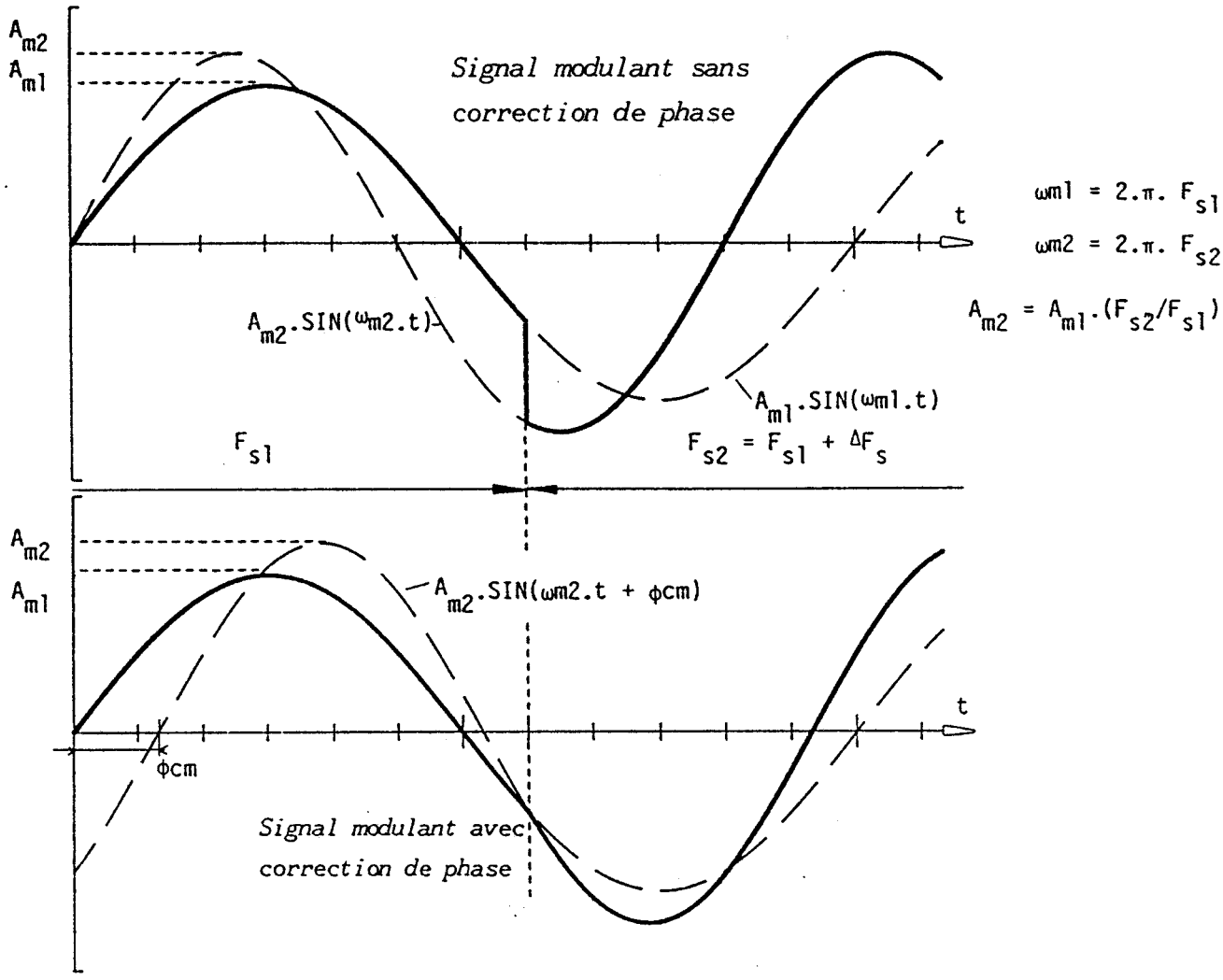


Figure 3.27 : Evolution du signal modulant lors de la variation de fréquence

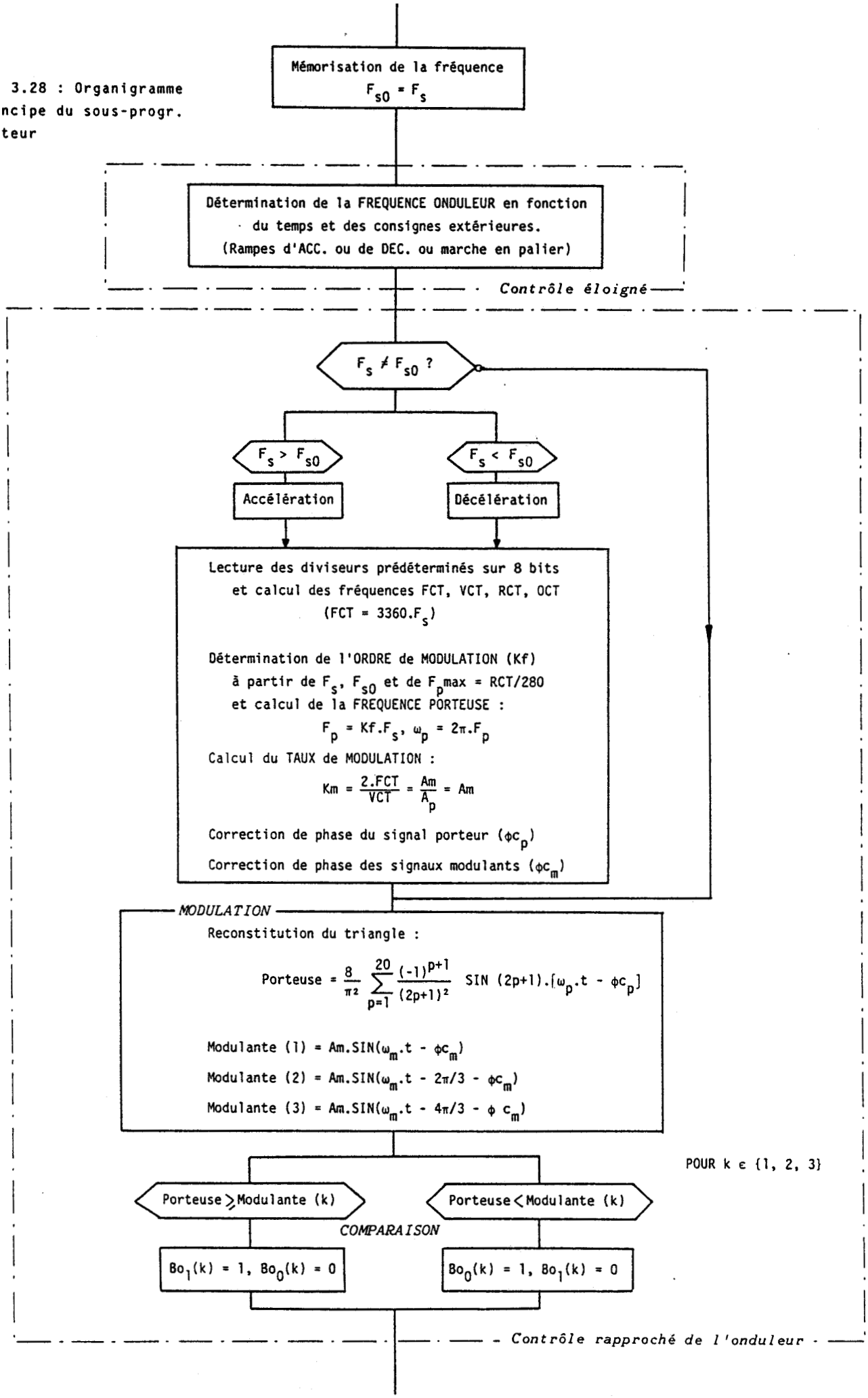
Compte tenu de toutes ces remarques, la structure du sous-programme prend la forme de l'organigramme de la figure 3.28. Nous retrouvons les principales étapes de calcul précitées :

- détermination de la fréquence porteuse à partir des grandeurs de consigne,

- reconstitution du signal triangulaire et des signaux modulants,

- comparaison entre la porteuse et les trois modulantes.

Figure 3.28 : Organigramme de principe du sous-progr. Modulateur



Pour une stratégie de modulation donnée (voir figure 3.24), l'ordre de modulation (Kf) et la fréquence porteuse s'obtiennent sans difficulté, à partir des grandeurs FCT (image de la fréquence de sortie et donc de la vitesse souhaitée) et RCT (image de $F_p$max).
Le taux de modulation (Km), quant à lui, varie linéairement avec la fréquence FCT lorsque la fréquence VCT reste constante. Un tel réglage assure un fonctionnement de la machine à flux constant. D'autre part, pour une fréquence FCT fixée, l'action sur VCT permettra d'appliquer plus ou moins de tension aux enroulements du moteur.

Afin d'assurer la sécurité de fonctionnement de l'onduleur, la commande de deux transistors d'un même bras est nécessairement disjointe. Les risques d'empiétement de conduction qui créeraient des court-circuits sont ainsi supprimés en introduisant un retard entre les ordres d'amorçage de l'un et de blocage de l'autre. Ce temps de garde est déterminé à partir de l'horloge OCT et de l'entrée K comme l'indique le tableau 3.28. Il translate le front de montée de chaque impulsion de commande ; la figure 3.29 montre de quelle façon le motif initial est modifié.

Entrée K	Délai
0	8/OCT
1	16/OCT

Tableau 3.28 : Détermination du temps de garde

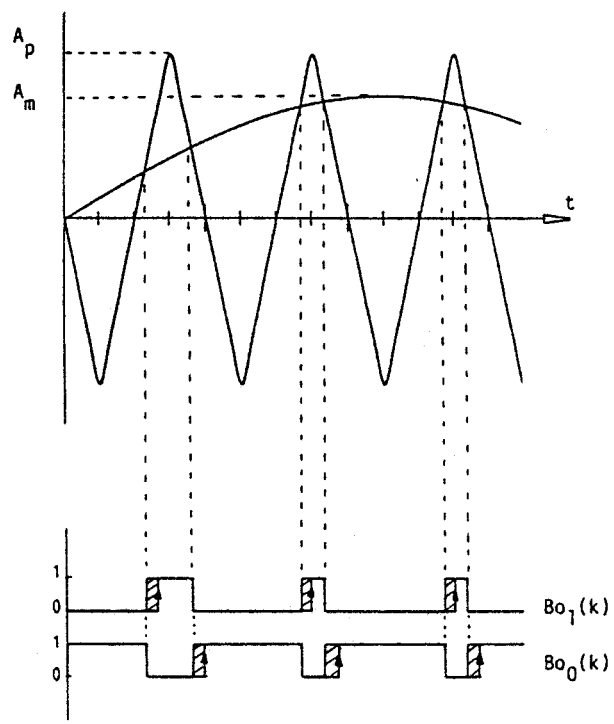


Figure 3.29 : Suppression des empiètement de conduction pour le bras k

L'ordre de grandeur de ce délai (volontairement exagéré sur la figure 3.29) est comparable au temps de stockage du transistor (un peu supérieur). Jusqu'ici, nous avons supposé que les commutations des composants étaient parfaites ; il nous semble donc illusoire de tenir compte de ce retard de commande qui nous imposerait de considérer le modèle onduleur dans son intégralité (classe de commande 0, 1, 2, 3). Les programmes globaux de simulation sont en effet difficilement exploitables pour l'étude des régimes à vitesse variable en raison des temps de calcul nécessaires.

Il est donc tout à fait légitime d'ignorer ces retards de commande. Dans ces conditions le modèle de l'onduleur sera simplifié à la classe de commande où seuls trois transistors sont commandés.

2.5 Résultats

A titre d'exemple nous présentons dans les pages suivantes divers résultats de simulation obtenus à partir du modèle que nous venons de définir. Les consignes de fréquence, issues du contrôle éloigné, sont soit fixes (figures 3.32, 3.34 et 3.36) , soit variables au cours du temps (figure 3.31, 3.33 et 3.35). Pour ce dernier cas, la consigne est établie à partir d'une rampe d'accélération de pente ($\Delta F_s/\Delta t$) égale à 24 Hz/s (voir figure 3.30) ; la fréquence de lecture de cette rampe, fixée à 240 Hz, assure une variation discrète de cette consigne avec un incrément de 0.1 Hz.

La figure 3.31 montre l'évolution des signaux et de la tension appliquée au moteur lorsque l'ordre de modulation passe de 30 à 21 (pour F_s = 36.6 Hz).

Avec les grandeurs de réglage, VCT et RCT, choisies, la surmodulation (taux de modulation >1) est obtenue lorsque la fréquence devient supérieure à 45.7 Hz ; ce mode de fonctionnement, comme nous pouvons l'observer sur les figures 3.33 à 3.34, s'accompagne d'une disparition des impulsions de commande autour du maximum du signal modulant et donc, d'une modification de la forme des tensions générées.

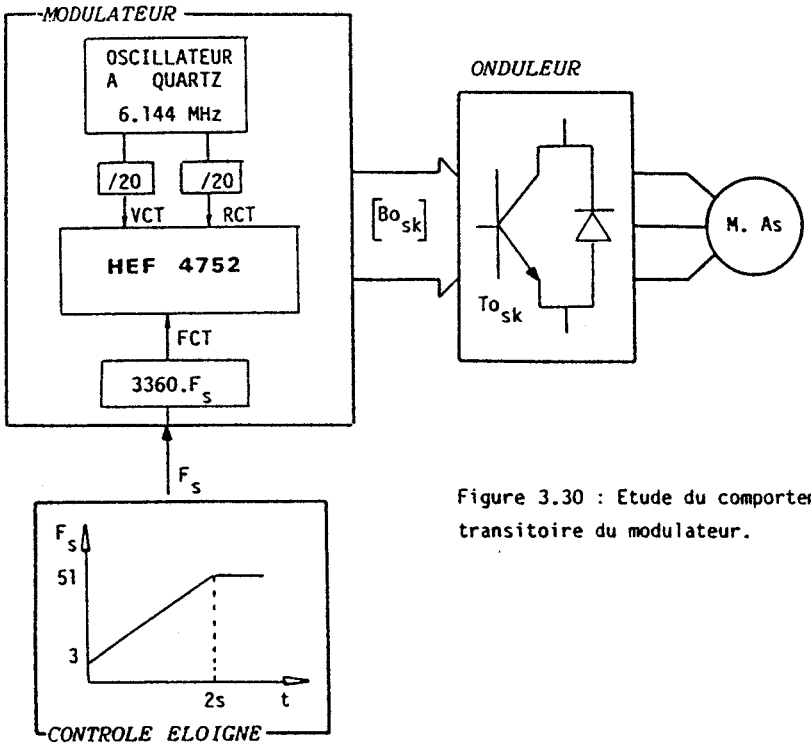


Figure 3.30 : Etude du comportement transitoire du modulateur.

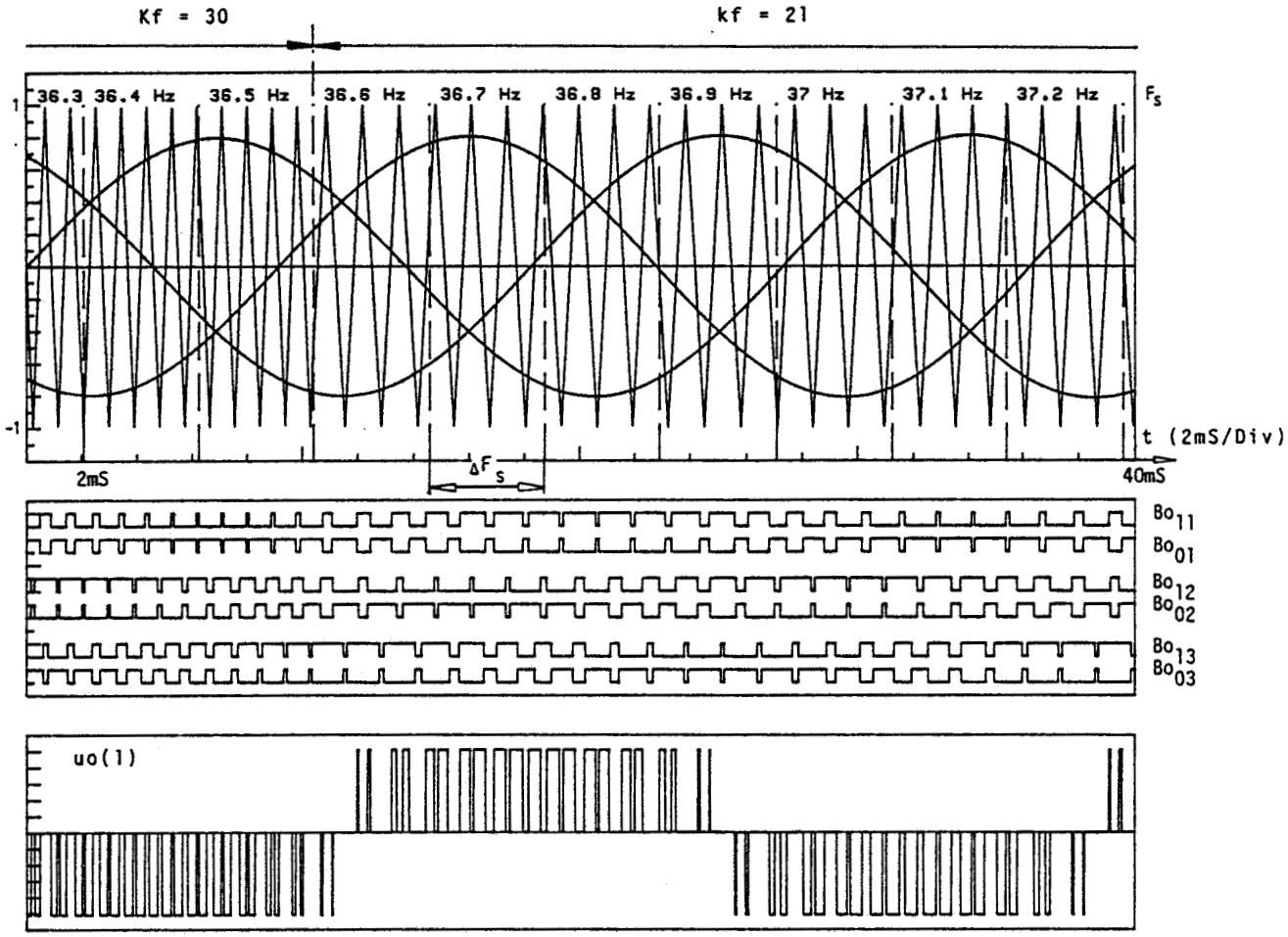


Figure 3.31 : Comportement transitoire du modulateur, passage de Kf = 30 à Kf = 21

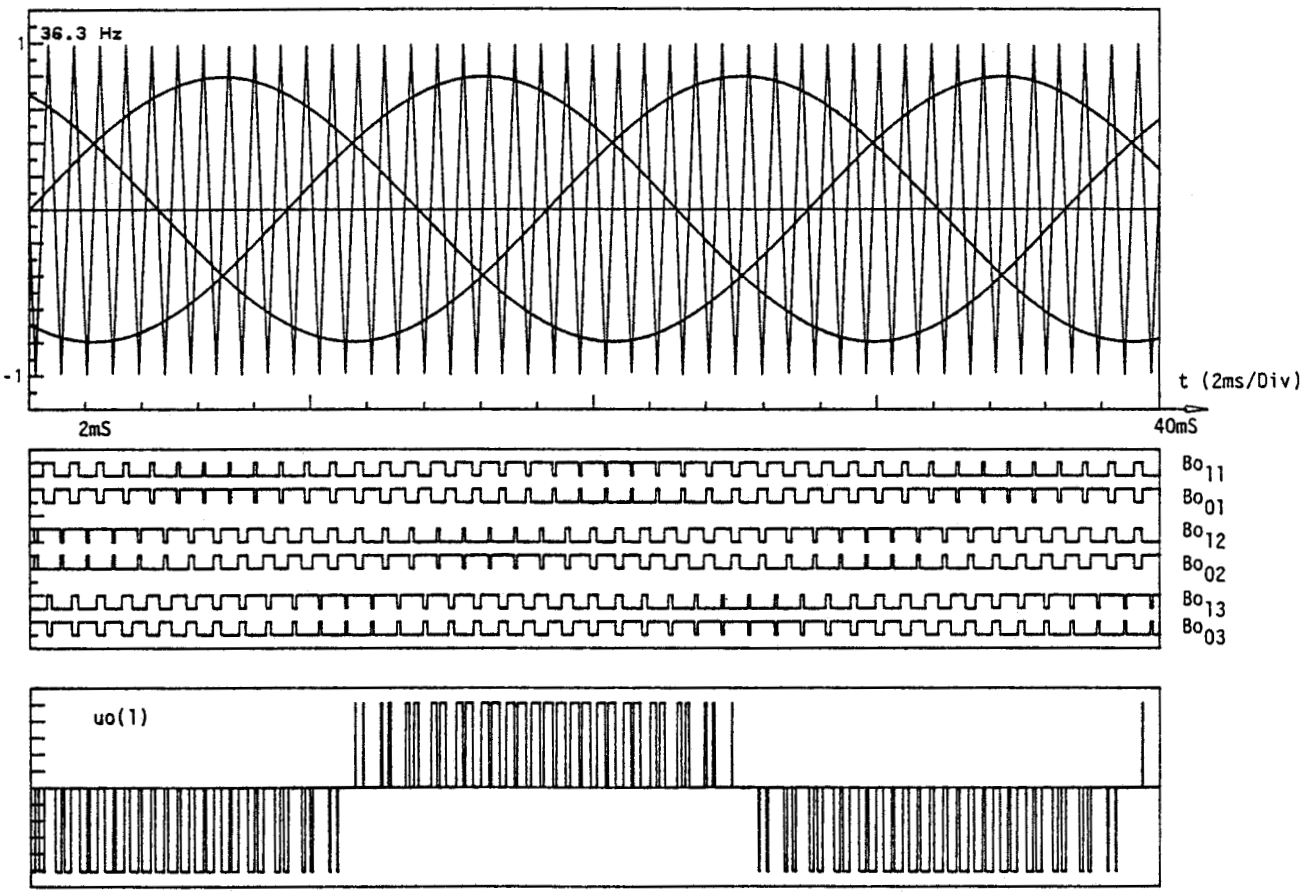


Figure 3.32 : Fréquence de consigne fixe égale à 36.3 Hz

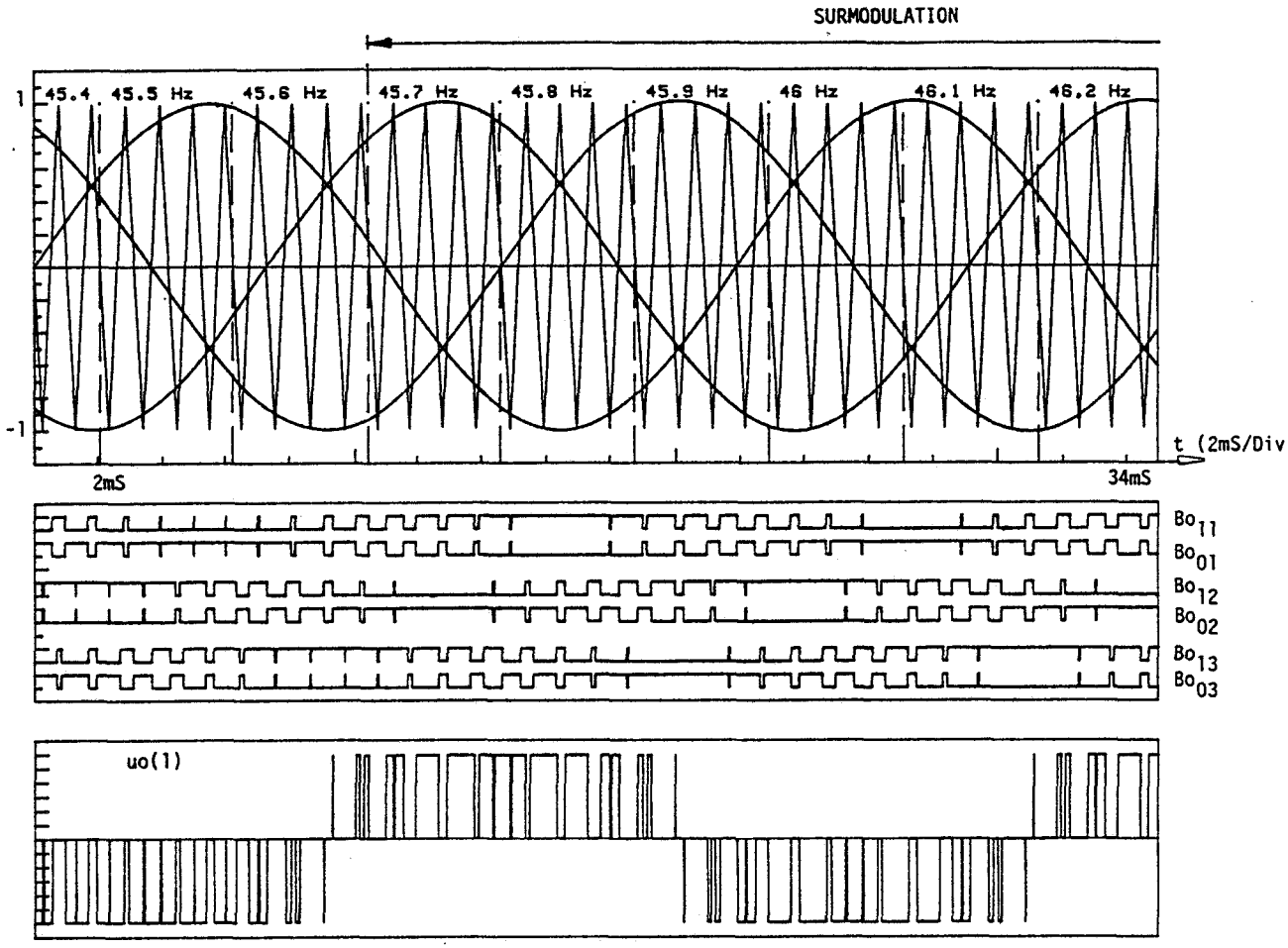


Figure 3.33 : Comportement transitoire du modulateur, fonctionnement en surmodulation

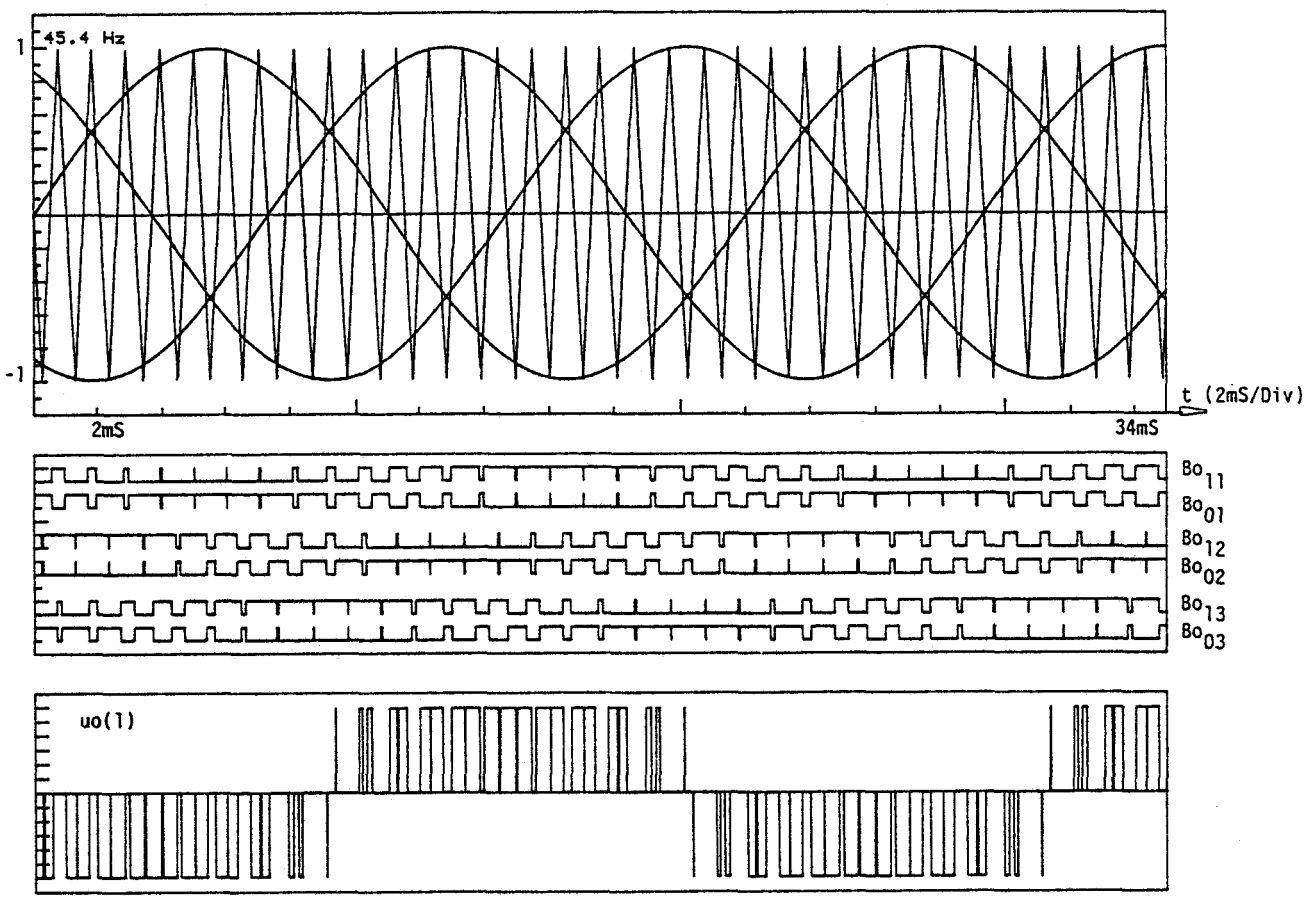


Figure 3.34 : Fréquence de consigne fixe égale à 45.4 Hz

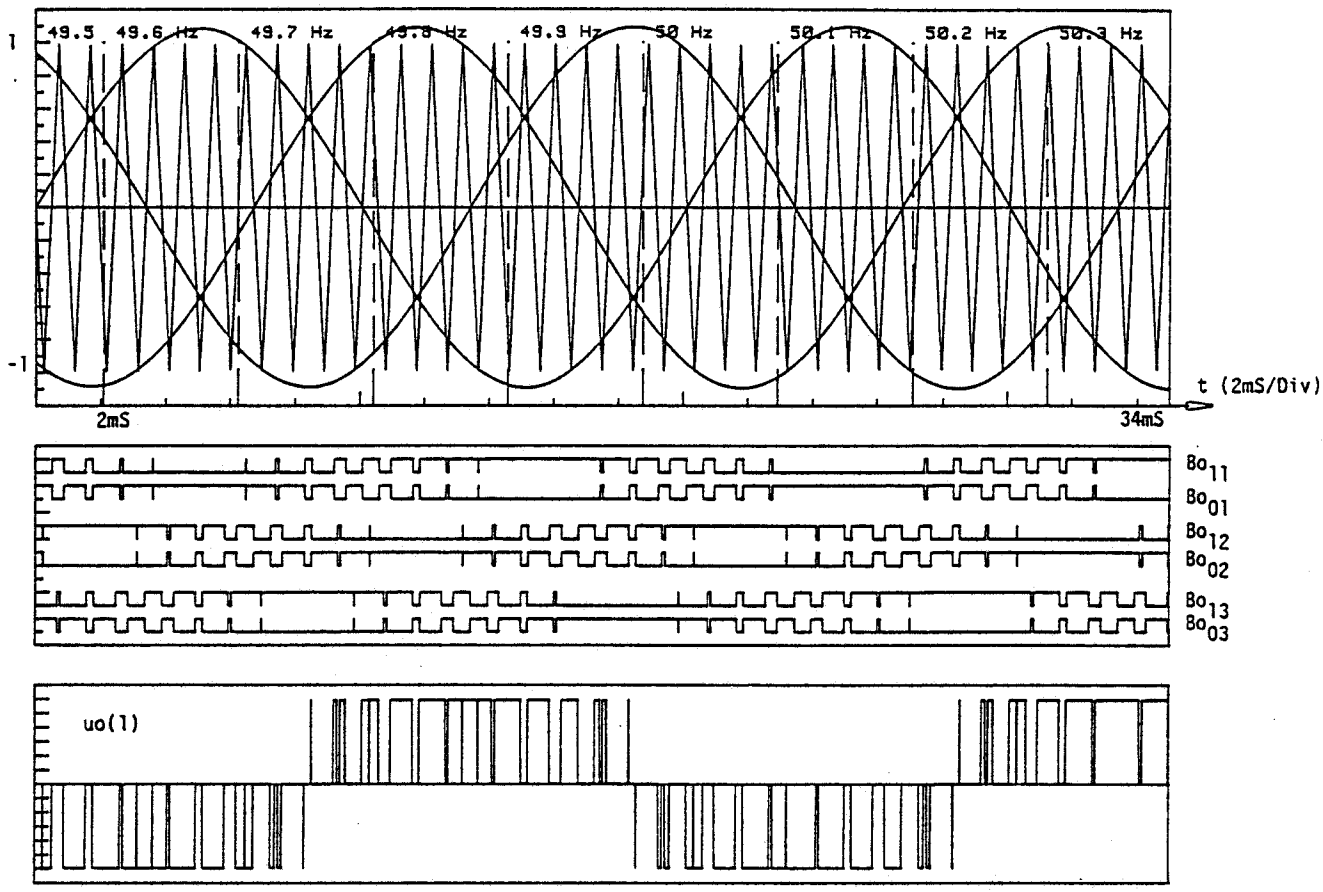


Figure 3.35 : Comportement transitoire du modulateur, fonctionnement autour de 50 Hz

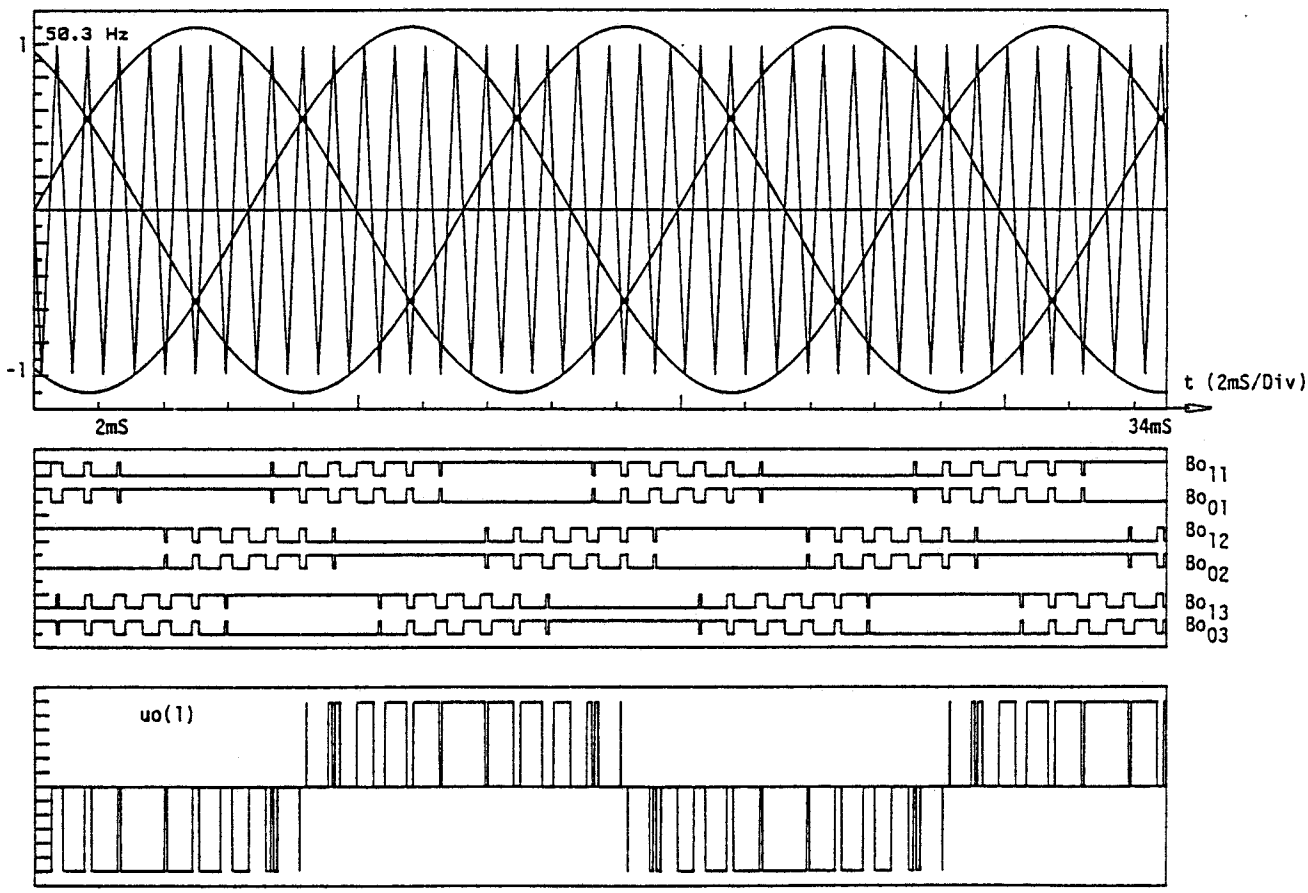


Figure 3.36 : Fréquence de consigne fixe égale à 50.3 Hz

3 - CONCLUSION

Le modèle mathématique réalisé reproduit fidèlement le comportement du modulateur et découle d'une analyse extérieure de son fonctionnement. Cette démarche est indispensable à son insertion dans un système d'asservissement plus complexe d'autant que nous n'avons émis aucune hypothèse sur le fonctionnement du contrôle éloigné. Celui-ci, réalisé indépendamment du contrôle rapproché, élabore des ordres qui peuvent être totalement asynchrones par rapport aux instants de traitements numériques du dispositif de commande de l'onduleur.
La solution retenue consiste donc à préférer un modèle de comportement à un modèle de connaissance reprenant les mécanismes mis en jeux dans le modulateur. La complexité excessive de ce circuit et le manque d'information précise à son sujet valident notre choix.

Nous envisageons dans le chapitre suivant de décrire le système complet dans le double but de confirmer la faisabilité de l'ensemble, et de vérifier les hypothèses de modélisation.

CHAPITRE 4

MISE EN OEUVRE DU SYSTEME DE CONTROLE ET RESULTATS D'ENSEMBLE

Dans ce chapitre, nous décrivons la réalisation du contrôle global de la cascade de conversion présentée précédemment. Les organisations matérielle et logicielle sont successivement abordées.

L'architecture proposée est construite en associant un microprocesseur huit bits (8085 de Intel) à divers boîtiers spécialisés. Le logiciel qui en découle assure la gestion de cinq niveaux d'interruption qui, classés par ordre de priorité, permettent la commande en temps réel des deux convertisseurs tout en répondant aux différentes exigences du système.

Divers relevés expérimentaux sont enfin confrontés aux formes d'onde prédéterminées par ordinateur pour quelques points de fonctionnement.

1 - ARCHITECTURE DE CONTROLE

1.1 Organisation générale

Le dispositif de commande et de contrôle du changeur de fréquence est réalisé en grande partie au moyen de cartes industrielles SIEMENS /64/. Son architecture, représentée sur la figure 4.1 est développée autour d'un microprocesseur 8 bits de Intel (8085). Elle utilise divers boîtiers spécialisés : compteurs programmables (8253 et 8254), ports parallèles d'entrées-sorties (8255), contrôleur d'interruption (8259), modulateur M.L.I. (HEF 4752). Chacun de ces circuits périphériques est affecté à une tâche bien définie, l'ensemble assurant la commande en temps réel des deux convertisseurs.

1.2 Partie commune

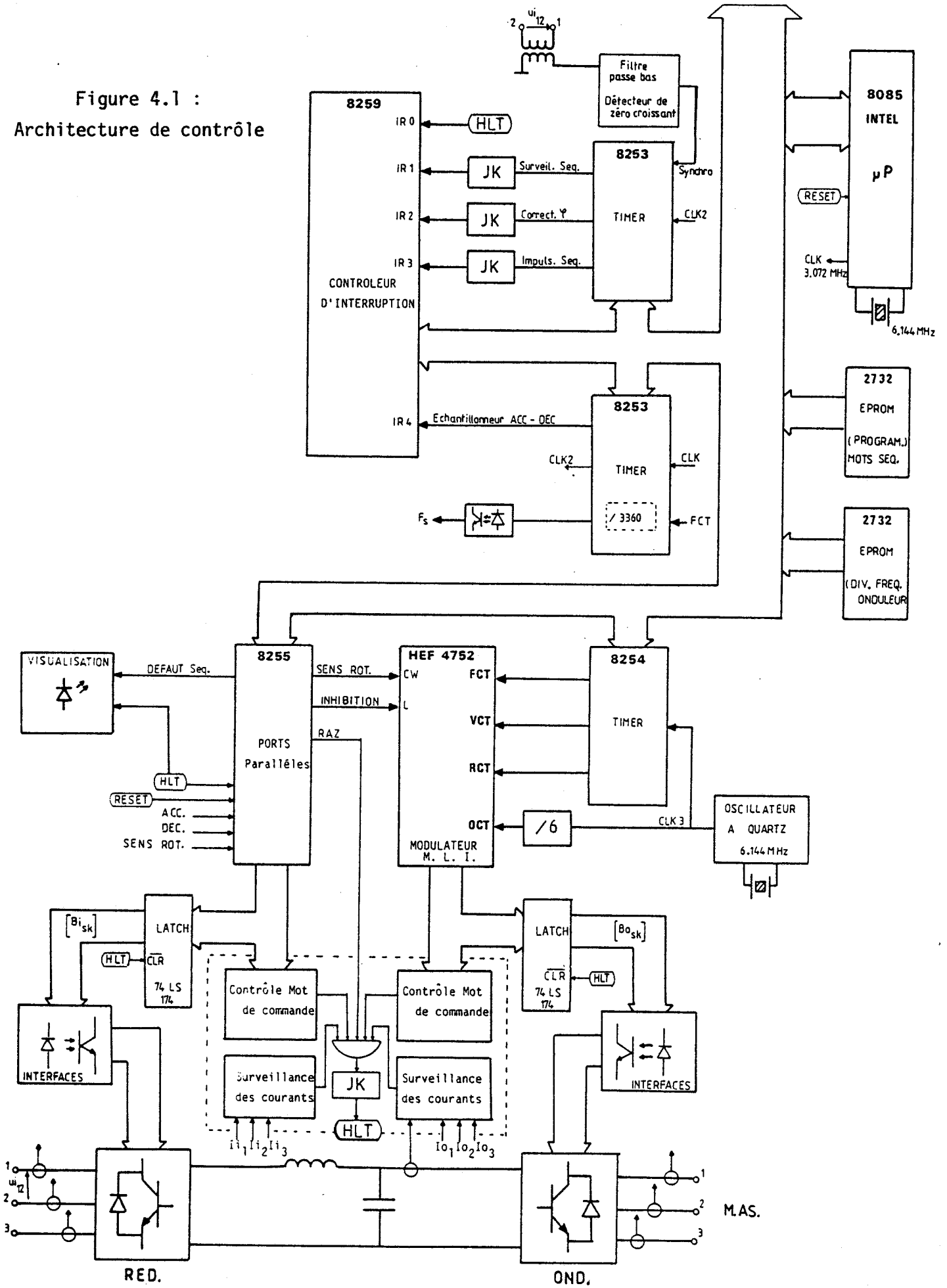
Nous avons opté pour l'emploi d'un seul microprocesseur pour piloter les deux convertisseurs de puissance ; la commande de chacun d'eux étant naturellement asynchrone, le contrôleur d'interruption (8259) hiérarchise les différents ordres survenant au cours du temps.

L'application utilise deux mémoires (EPROM 2732) de 32K octects contenant, d'une part, le programme et les mots de commande du redresseur et, d'autre part, les diviseurs précalculés nécessaires au fonctionnement du modulateur M.L.I.

Un module de protection locale assure la surveillance des courants d'entrée du redresseur (Ii_1, Ii_2, Ii_3), du courant intermédiaire (ido) et des courants en ligne du moteur (io_1, io_2, io_3), et, contrôle les mots de commande envoyés sur les interfaces de base de chaque convertisseur.

En cas de défaut, ce module active le signal HLT qui provoque l'arrêt d'urgence du système. Pour des questions de rapidité, ce signal agit directement, sans transiter par le microprocesseur, sur les bascules en amont des interfaces de base, et inhibe la sortie de celles-ci. Le signal HLT est également envoyé sur l'entrée d'interruption la plus prioritaire du système (IR0) ; le microprocesseur ainsi informé de la présence d'un défaut, inhibe alors le fonctionnement du modulateur et place le système en état d'attente ; enfin, il signale la nature du défaut.

Figure 4.1 :
Architecture de contrôle



La remise en fonctionnement de l'ensemble, après disparition du défaut, n'est possible que par intervention de l'opérateur (RESET général).

1.3 Commande rapprochée du redresseur

La commande rapprochée du redresseur est conçue selon le réseau de Pétri établi au cours du chapitre 2 (voir figure 2.34), lequel décrit son séquencement.

Pour ce faire, les six mots de commande mémorisés dans une EPROM sont périodiquement lues par le microprocesseur et envoyés via le bus de données sur un port parallèle fonctionnant en sortie. Seul six bits de l'octect transféré sont naturellement significatifs, chacun d'eux représentant l'état de l'une des commandes des 6 transistors du redresseur.
Afin de réduire au minimum le nombre de capteurs de tension, les ordres de lecture correspondant aux instants de changement d'état du séquenceur sont calculés à partir du passage par zéro d'une seule tension composée (ui_{12}).

Pour cela, nous avons utilisé trois compteurs programmables : CPT01, CPT02 et CPT10 (voir figure 4.2). La sortie de ces compteurs, lorsqu'elle passe par zéro, occasionne respectivement les demandes d'interruption IR2 IR3 et IR1. Le compteur CPT00 est utilisé en prédiviseur de fréquence et fournit une horloge commune, CLK2, aux autres compteurs.

Le microprocesseur traitant les demandes d'interruption par ordre de priorité, afin de ne pas perdre d'information, (le traitement d'une interruption pouvant en effet masquer l'apparition d'une autre demande moins prioritaire), chaque demande est mémorisée au moyen d'une bascule JK, et la sortie de cette bascule n'est repositionnée à 1 qu'après le traitement complet de l'interruption correspondante.

Le compteur CPT01 associé à l'interruption IR2 délivre une impulsion tous les 20ms, à chaque passage par zéro croissant de la tension ui_{12} ; il permet d'ajuster au mieux le front de descente de l'impulsion sur ce passage par zéro, tout en synchronisant cet instant sur l'horloge commune (CLK2).

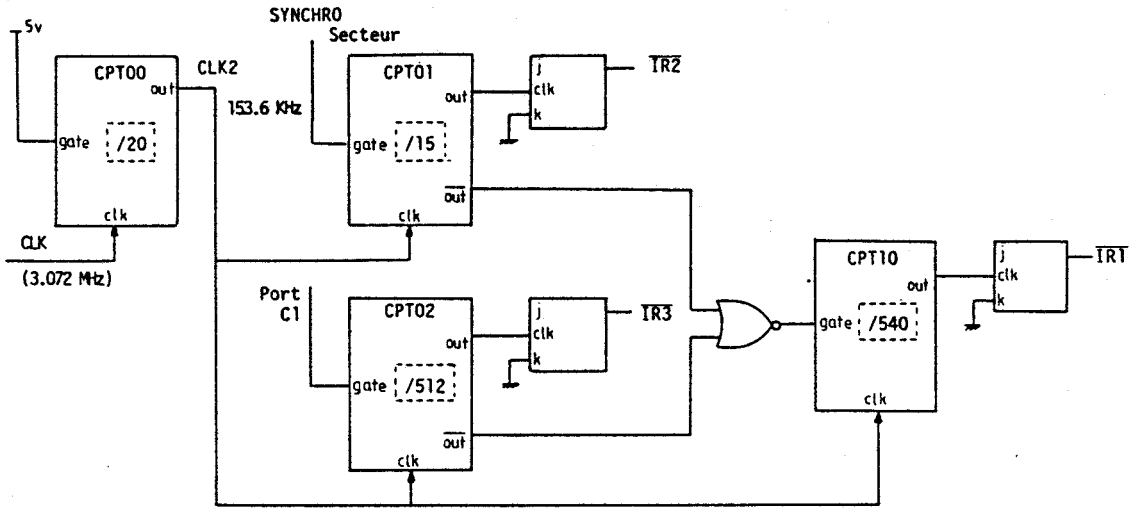


Figure 4.2 : Elaboration des signaux nécessaires au séquenceur

Le compteur CPT02 associé à l'interruption IR3 délivre 5 impulsions, espacées de 3,3ms, qui correspondent aux autres instants de passage par zéro des tensions composées. Un chronogramme retraçant l'historique de ces signaux est représenté figure 4.3.

Le compteur CPT10 associé à l'interruption IR1 surveille le bon fonctionnement du séquenceur. Si l'une des 6 impulsions fait défaut, il transmet alors l'information au microprocesseur par le biais de l'interruption IR1, provoquant ainsi l'arrêt d'urgence de l'ensemble. En effet, comme nous l'avons évoqué au cours du chapitre 2, la séquence de commande des transistors doit impérativement être synchrone avec la séquence de conduction des diodes (voir figures 2.32 et 2.33).

1.4 Commande rapprochée de l'onduleur

La commande rapprochée de l'onduleur ne pose pas de grande difficulté. Etudiée en détail au chapitre 3, nous savons qu'elle est construite autour du modulateur M.L.I. HEF 4752 programmé par les quatre oscillateurs : FCT, VCT, RCT, OCT.

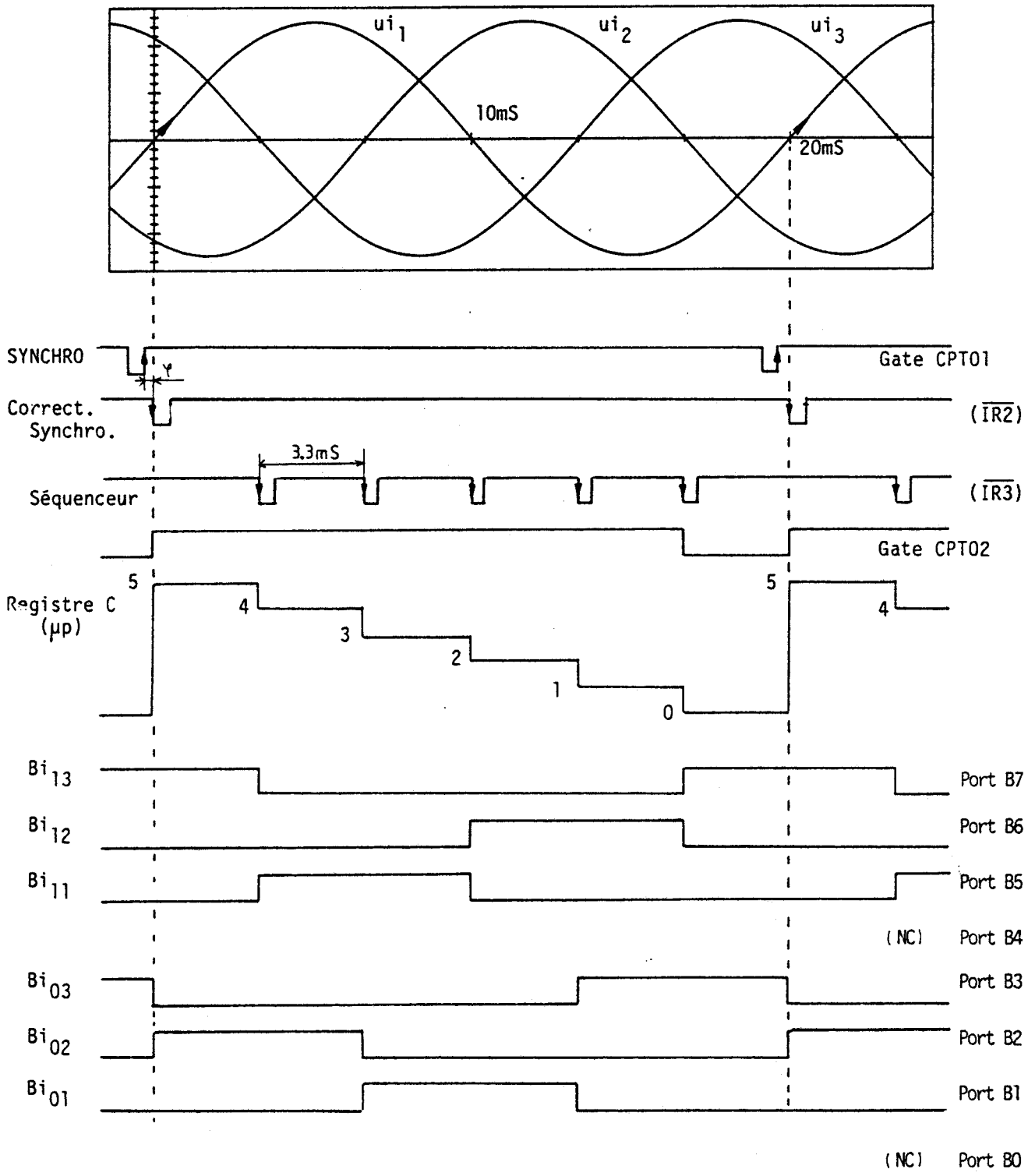


Figure 4.3 : Chronogramme de séquencement du redresseur

L'horloge commune à cet ensemble, CLK3, est réalisée au moyen d'un oscillateur à quartz, de 6.144 MHz. Comme nous le verrons par la suite, le choix de cette fréquence de base, élevée, est justifié par la précision souhaitée sur la fréquence de sortie.

Les fréquences de programmation du modulateur sont sélectionnées par le microprocesseur, à partir des consignes issues du contrôle éloigné, en envoyant les diviseurs correspondant sur les trois compteurs : CPT20, CPT21, CPT22 (voir figure 4.4). Le microprocesseur pilote ainsi à tout instant les consignes VCT, FCT, RCT du modulateur.
La fréquence de l'oscillateur OCT, quant à elle, est figée à 1.024 MHz ; l'entrée K du modulateur étant au niveau haut, le temps de garde entre la commande des transistors d'un même bras de l'onduleur est donc égal à : 16/OCT soit 15,6 µS.

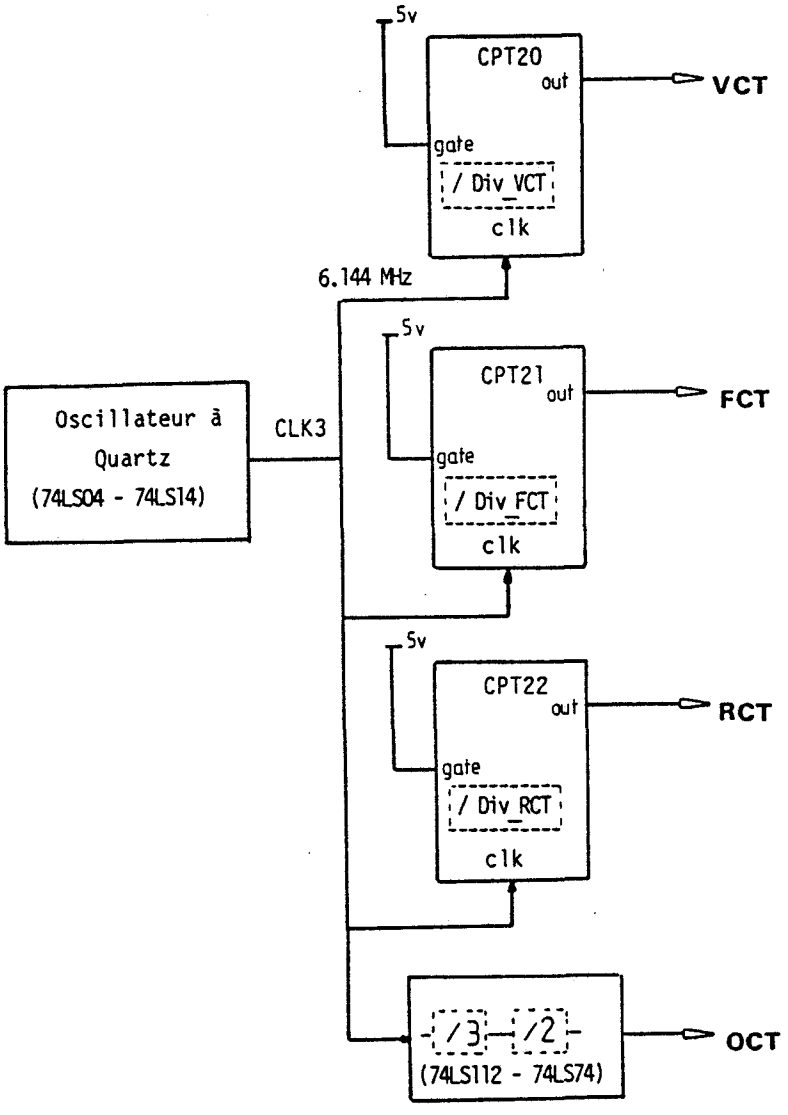


Figure 4.4 : Elaboration des signaux de programmation du modulateur M.L.I.

1.5 Dispositif de protection

Le module de protection du changeur de fréquence (figure 4.1) intègre, d'une part la détection de surcharge en amont et en aval des deux convertisseurs et, d'autre part, la surveillance des mots de commande envoyés aux transistors de puissance de chaque convertisseur. Dans les deux cas, l'apparition d'un défaut entraîne l'arrêt d'urgence du dispositif en bloquant tous les transistors.

1.5.1. Protection en courant

La mesure des courants est réalisée au moyen de capteurs de courant à effet Hall /65/. Ces capteurs* reproduisent au secondaire un courant proportionnel au courant primaire mesuré ; ils assurent une parfaite isolation galvanique entre les circuits de puissance et de commande ; leur bande passante autorise la mesure de la composante continue du signal et leurs performances dynamiques permettent la mesure de variation de courant de 50A/ µS.

L'information de surcharge est obtenue par comparaison, au moyen de circuits analogiques, des courants mesurés à un seuil de disjonction. Le schéma de principe de ce module de mesure et comparaison est donné figure 4.5 ; la surveillance des courants en sortie de l'onduleur, en tout point similaire à celle utilisée pour l'entrée du redresseur, n'est pas représentée ici.

1.5.2. Contrôle des commandes de base

La surveillance des commandes de base réalisée également au moyen de circuits analogiques évite l'envoi de combinaisons illicites sur les interfaces de commande et permet de s'affranchir du parasitage éventuel des circuits de commande.

Pour l'onduleur, la recherche d'éventuels court-circuits de bras nous conduit au schéma simple de la figure 4.6. Pour le redresseur 2^5 combinaisons sont possibles ; or, seules 6 possibilités parmi ces 32 combinaisons sont correctes.

*Capteurs de courant EA 100 AP TRANSTRONIC (Petercem)

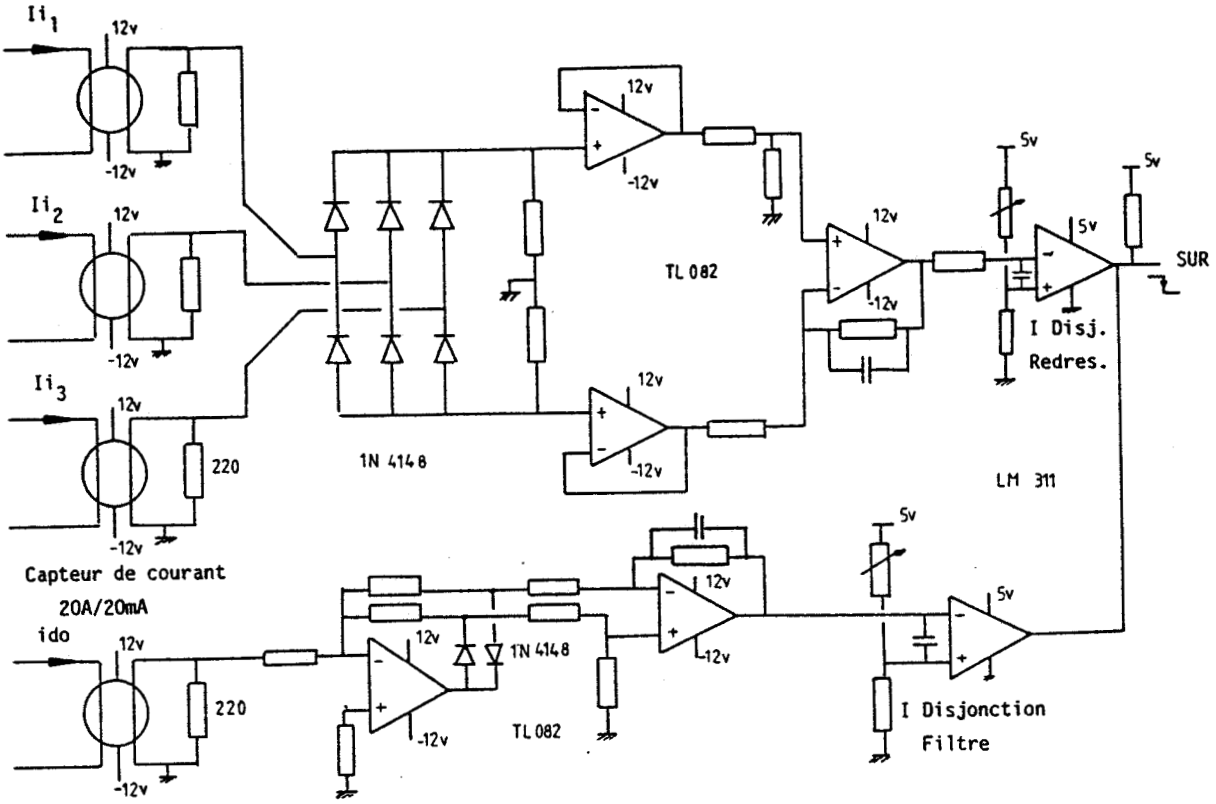


Figure 4.5 : Module de protection en courant

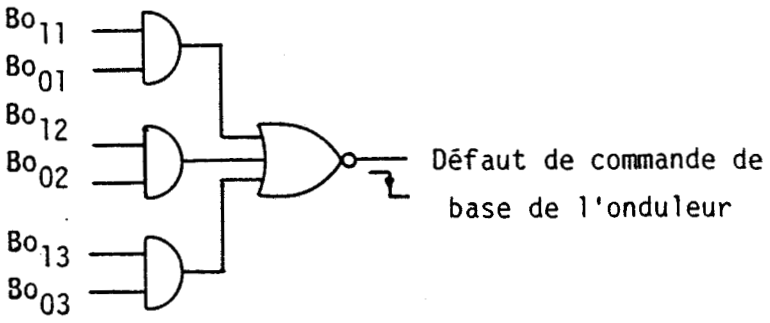


Figure 4.6 : Contrôle des commandes de
de base de l'onduleur

La solution retenue est représentée sur la figure 4.7. Elle utilise 3 multiplexeurs assurant le combinatoire entre la sortie Y et l'une des entrées de donnée (E0... E32) /66/. La valeur des entrées de sélection (Bi_{02}, Bi_{03}, Bi_{11}, Bi_{12}, Bi_{01}) aiguille donc l'une des 32 valeurs vers la sortie ; ces valeurs d'entrée sont fonctions de la variable Bi_{13} et égalent 1 ou 0 ou Bi_{13}, selon que la combinaison sélectionnée est autorisée ou non.

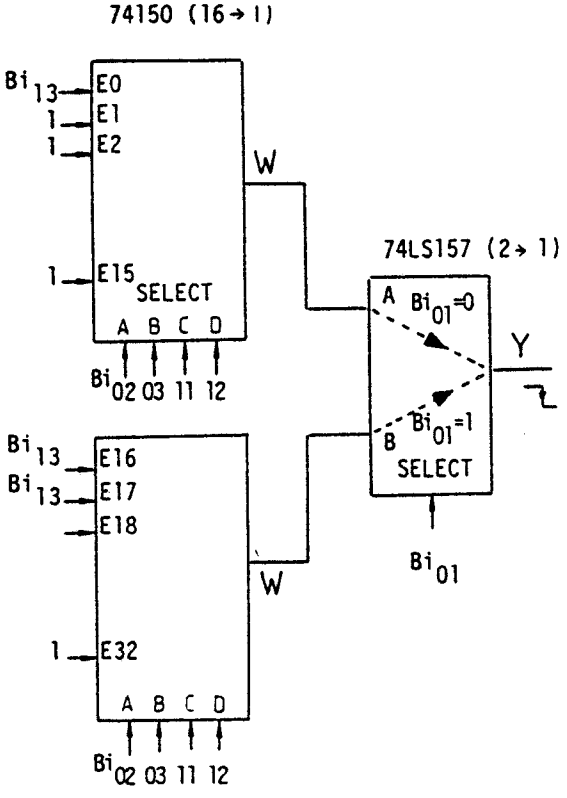


Figure 4.7 : Schéma de principe du contrôle des commandes pour le redresseur

'150

FUNCTION TABLE

INPUTS					OUTPUT
SELECT				STROBE	W
D	C	B	A	S	
X	X	X	X	H	H
L	L	L	L	L	$\overline{E0}$
L	L	L	H	L	$\overline{E1}$
L	L	H	L	L	$\overline{E2}$
L	L	H	H	L	$\overline{E3}$
L	H	L	L	L	$\overline{E4}$
L	H	L	H	L	$\overline{E5}$
L	H	H	L	L	$\overline{E6}$
L	H	H	H	L	$\overline{E7}$
H	L	L	L	L	$\overline{E8}$
H	L	L	H	L	$\overline{E9}$
H	L	H	L	L	$\overline{E10}$
H	L	H	H	L	$\overline{E11}$
H	H	L	L	L	$\overline{E12}$
H	H	L	H	L	$\overline{E13}$
H	H	H	L	L	$\overline{E14}$
H	H	H	H	L	$\overline{E15}$

FUNCTION TABLE

INPUTS				OUTPUT Y	
STROBE	SELECT	A	B	'157 *LS157,*S157	*LS158 *S158
H	X	X	X	L	H
L	L	L	X	L	H
L	L	H	X	H	L
L	H	X	L	L	H
L	H	X	H	H	L

2 - ORGANISATION DU LOGICIEL

2.1 Principe

La gestion du système de contrôle et de commande du changeur de fréquence est confiée à un microprocesseur 8 bits, le 8085 de Intel. Ce microprocesseur répond en effet aux différentes exigences de notre application. Pour le programmer, nous disposons d'un jeu d'instructions relativement complet (voir en annexe 6) ; en effet, en plus de l'accumulateur A, le 8085 possède 6 registres (B, C, D, E, H, L) qui peuvent être groupés par deux pour constituer des registres de 16 bits.

Les tâches à accomplir sont bien définies ; seules leur apparition et évolution au cours du temps ne le sont pas.
Pour résoudre ce problème temporel, nous avons affecté chaque tâche à un sous-programme d'interruption. La commande en temps réel s'effectue alors par demandes d'interruptions adressées indirectement au microprocesseur par l'intermédiaire du contrôleur d'interruption (8259) ; ce circuit périphérique permet la commande de priorité à 8 niveaux, chaque demande pouvant être masquée individuellement. Des bascules JK en amont du contrôleur mémorisent les demandes lorsque celles-ci ne peuvent être traitées immédiatement ; ces bascules sont "armées" ou vérouillées de manière programmée.

Dans ces conditions, l'organisation du logiciel devient relativement simple. Celui-ci se compose (figure 4.8) d'une phase d'initialisation des différents boîtiers et de tests de l'ensemble, après quoi, le programme principal, extrêmement simple, se contente d'attendre la venue d'une interruption pour la traiter.

L'organigramme de la figure 4.9 détaille la chronologie des différentes tâches à effectuer avant d'accéder au programme principal ; les étiquettes utilisées sont celles du programme donné en annexe 6.

Les figures 4.10 à 4.14 présentent les organigrammes des sous-programmes affectés aux cinq premiers niveaux d'interruption, leur fonction étant la suivante :

- Interruption IR0 : Arrêt d'urgence du système suite à un défaut de commande ou sur charge,

- Interruption IR1 : Arrêt d'urgence du système suite à une erreur de séquencement,

- Interruption IR2 : Début de la séquence du redresseur,

- Interruption IR3 : Séquencement du redresseur,

- Interruption IR4 : Rampe d'accélération et de décélération.

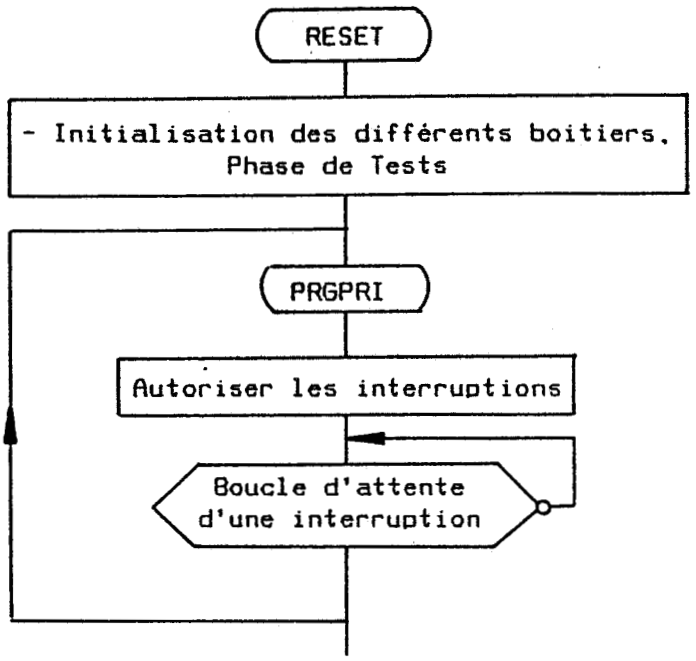


Figure 4.8 : Organisation du logiciel

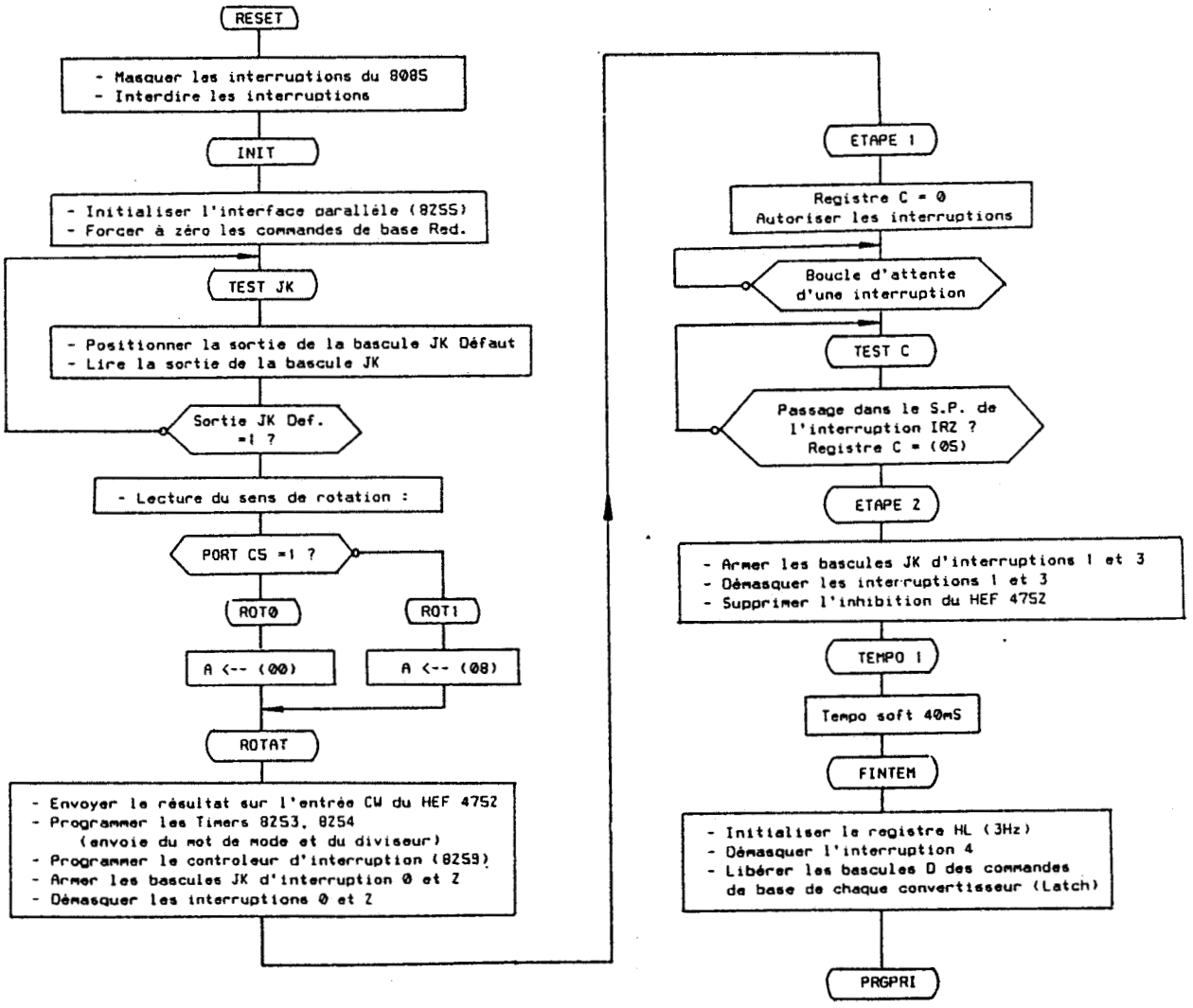


Figure 4.9 : Organisation du logiciel (Initialisation et tests)

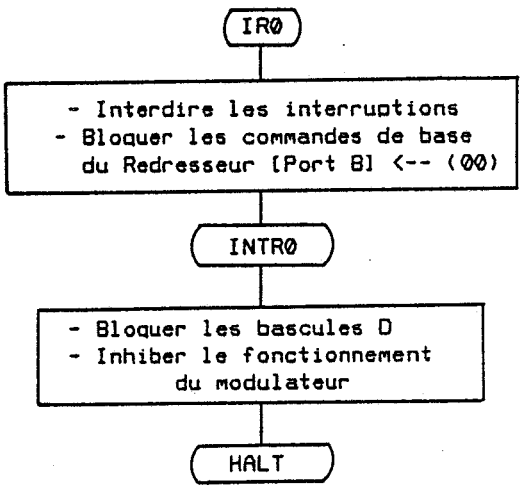


Figure 4.10 : Interruption IR0

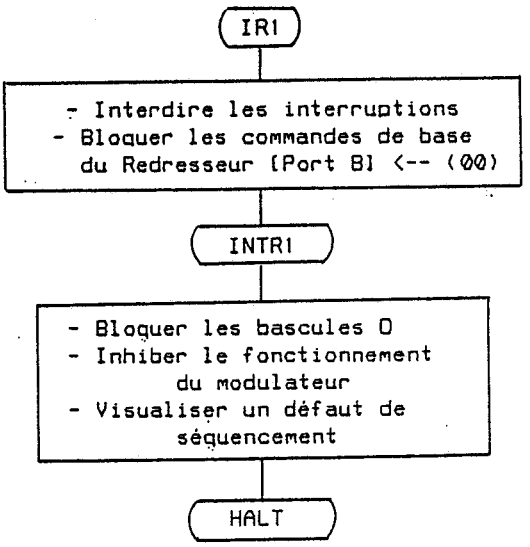


Figure 4.11 : Interruption IR1

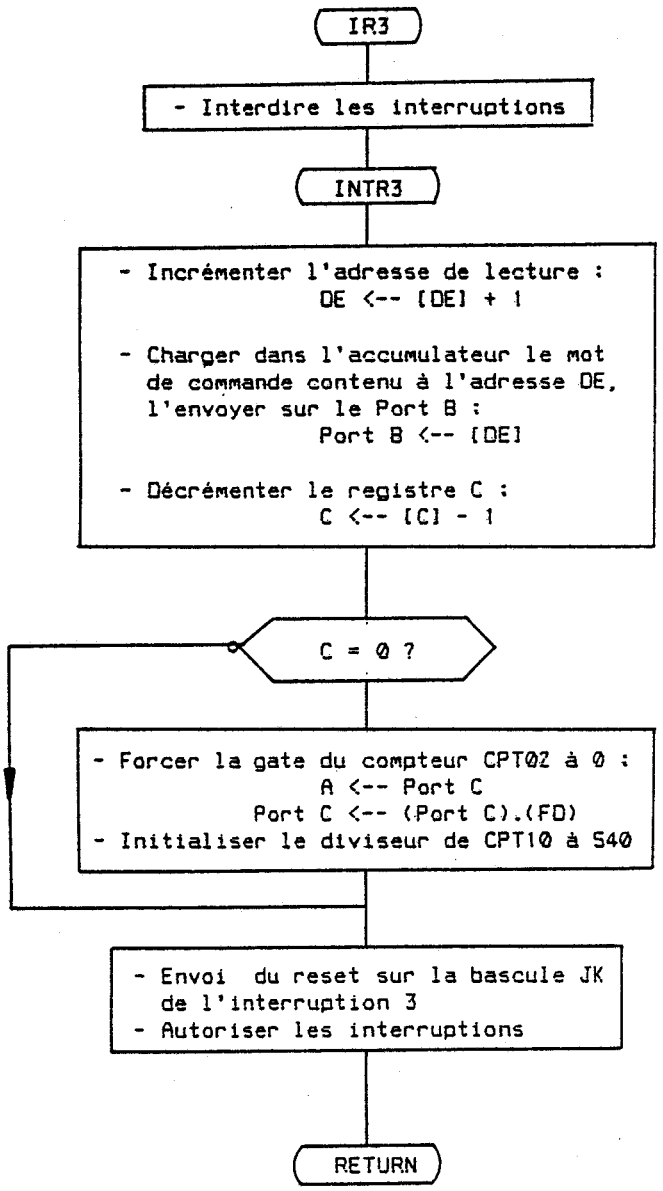


Figure 4.13 : Interruption IR3

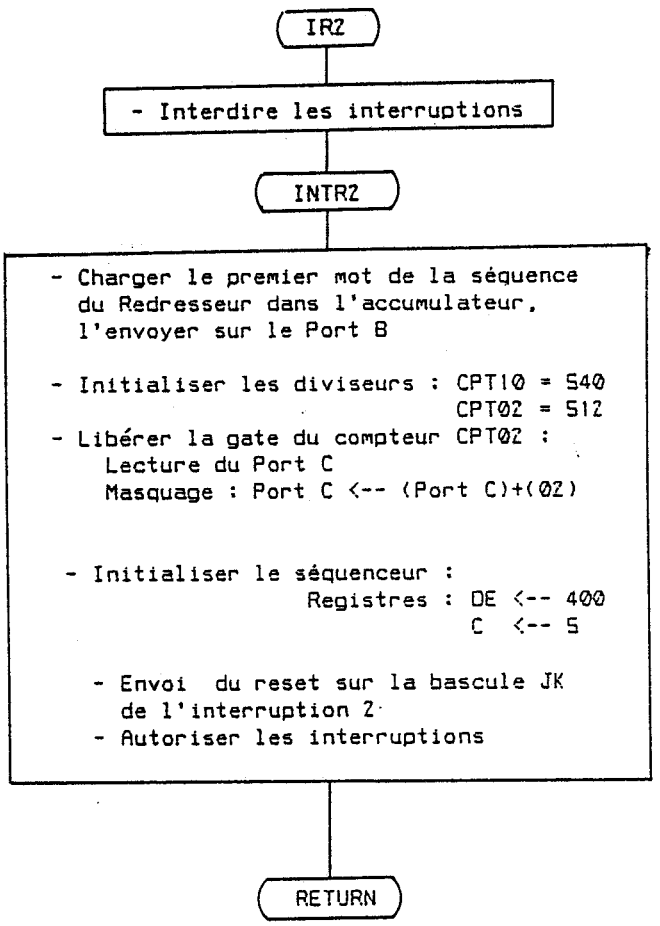


Figure 4.12 : Interruption IR2

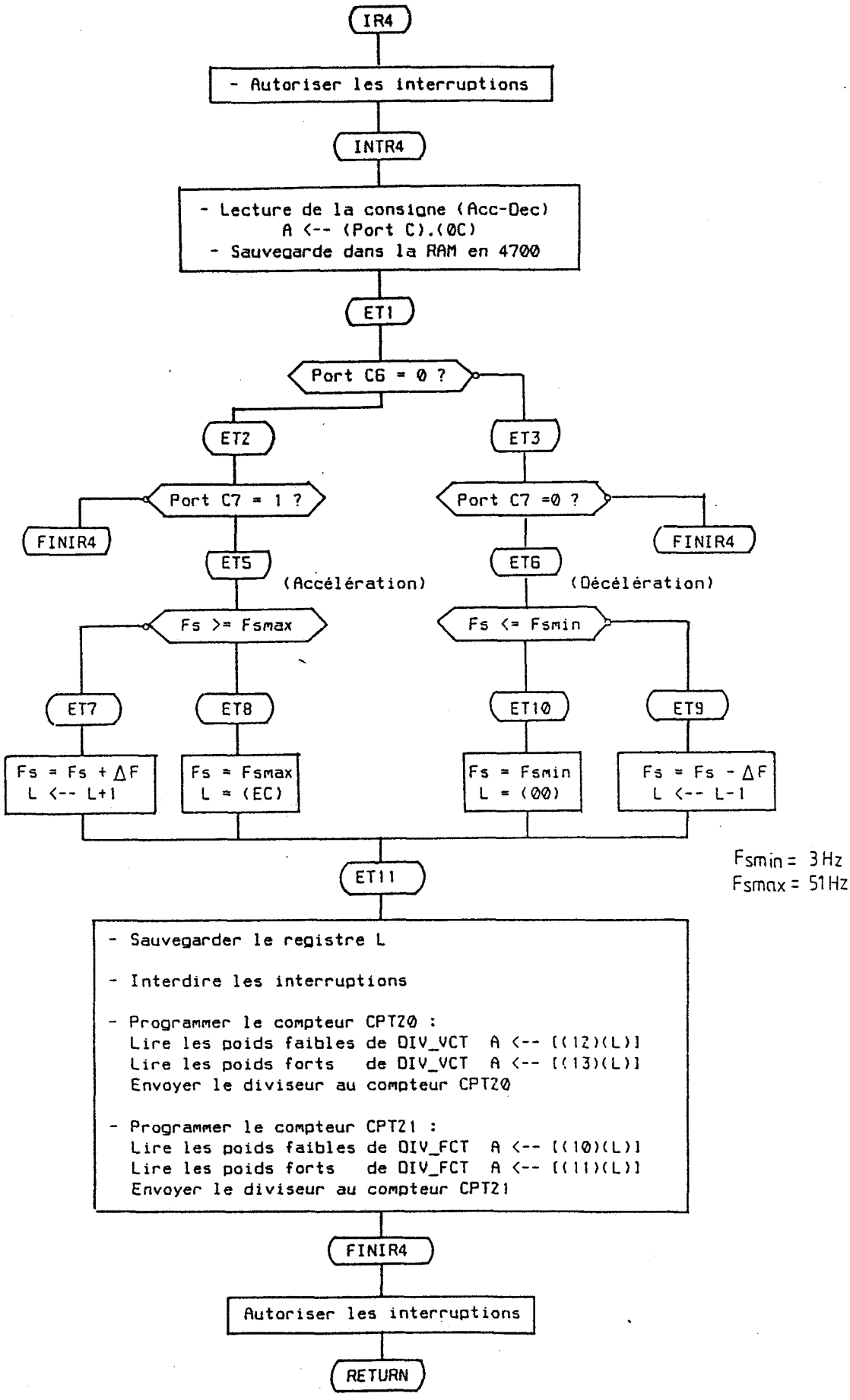


Figure 4.14 : Interruption IR4

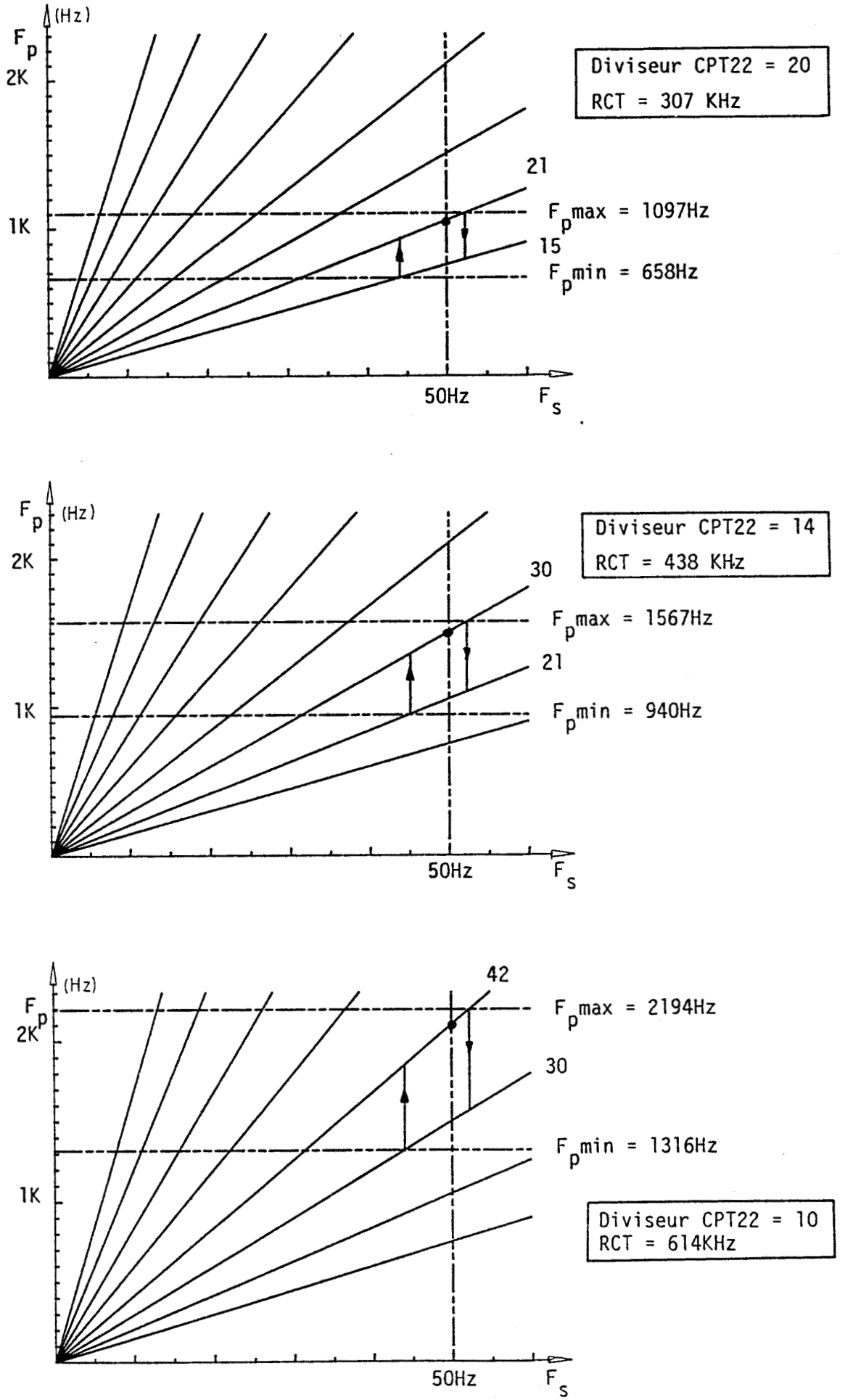
2.2 Commande du modulateur

Comme nous l'avons vu, la commande de l'onduleur est assurée par un modulateur entièrement piloté par le microprocesseur. Cette solution nous laisse beaucoup de liberté, et le choix des différents paramètres de programmation peut être une étape délicate pour le concepteur, si elle prend la tournure d'une campagne d'essais visant à adapter au mieux le changeur de fréquence à sa charge. Le programme de simulation globale, établi au cours des deux chapitres précédents, offre, dans ce cas, une aide incontestable, puisque les formes d'ondes relativement complexes pour une commande M.L.I. peuvent être facilement synthétisées et analysées par l'ordinateur.

Le choix de la stratégie de modulation, par exemple, consiste à définir la fréquence porteuse maximale (et donc la fréquence générée par le compteur CPT22, appliquée sur l'entrée RCT du modulateur). Pour un fonctionnement de l'onduleur à 50Hz (régime normal de la machine), l'ordre de modulation ($Kf = F_p/F_s$) peut ainsi prendre les valeurs 15, 21, 30 ou 42 (voir figure 4.15) ; les figures 4.16 représentent, dans ces conditions, les formes des tensions de sortie obtenues et leur analyse harmonique. L'ordre de modulation étant multiple de 3, on constate la disparition de la raie correspondante à la fréquence de découpage dans le spectre de la tension composée. Lorsque ce coefficient est pair (30 et 42), la symétrie par rapport au quart de période n'est pas obtenue, et le spectre contient des harmoniques de rang pair. Dans notre application, nous avons fixé le diviseur du compteur CPT22 à 20. La fréquence porteuse maximale est ainsi sensiblement égale à 1KHz ce qui permet de conserver un ordre de modulation égal à 21, et ce jusque 51Hz (excursion maximale de la fréquence F_s) ; le premier harmonique significatif rencontré dans le spectre est celui de rang 19 (950Hz).

L'évolution de la tension efficace appliquée au moteur en fonction du taux de modulation (Km) peut, de même, être facilement obtenue par simulation ; elle est représentée figure 4.16. On retrouve des résultats classiques, à savoir que pour $Km < 1$, la valeur efficace du fondamental évolue linéairement en fonction du taux de modulation

Figure 4.15 : Choix de la stratégie de modulation



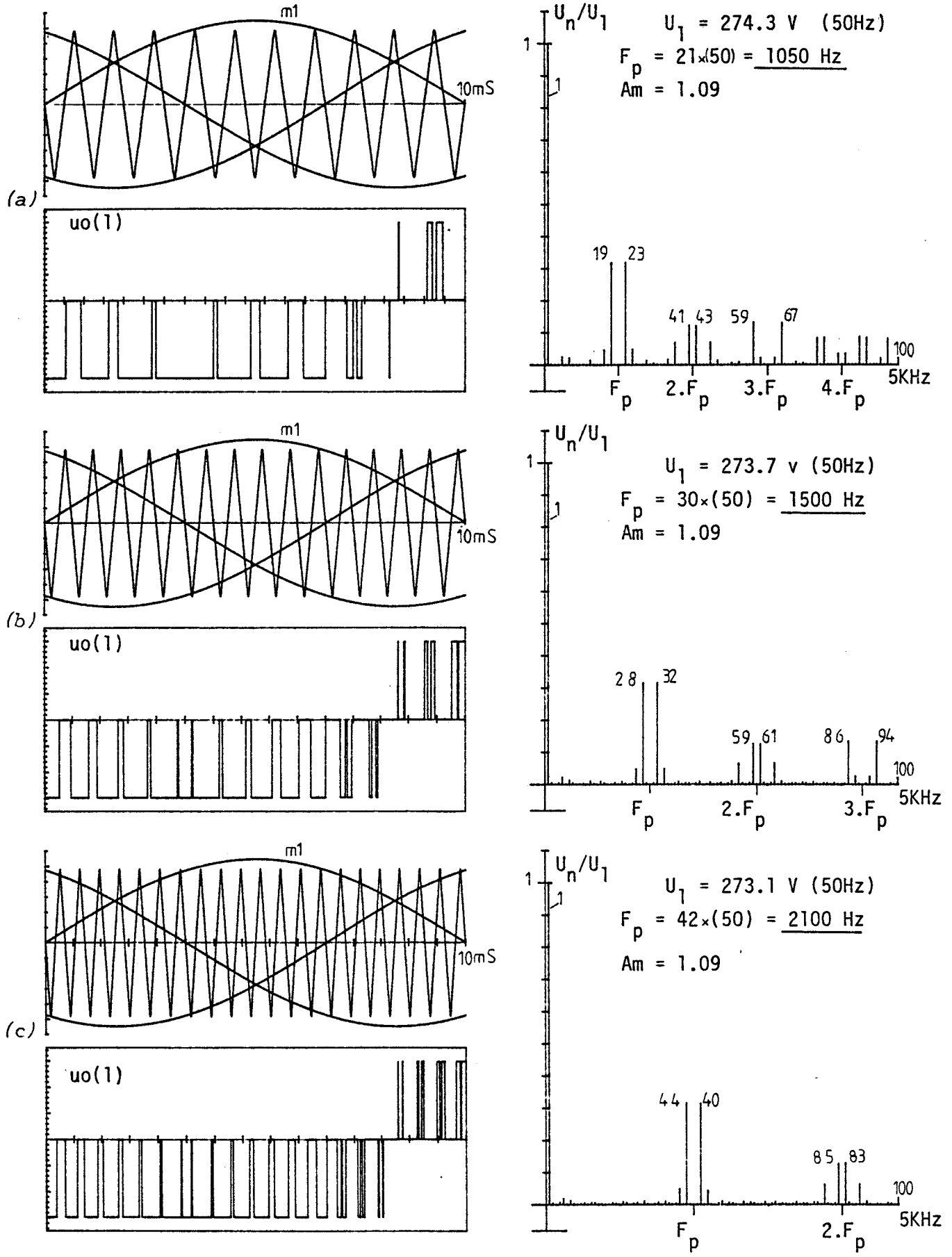


Figure 4.16 : Tension de sortie à 50Hz et analyse spectrale en fonction de l'ordre de modulation sélectionné

puis, lorsque la surmodulation est atteinte (Am⩾ Ap), cette évolution est beaucoup plus lente. Il est à noter que ces courbes, tracées pour Kf égal à 21, sont pratiquement indépendantes de ce coefficient.

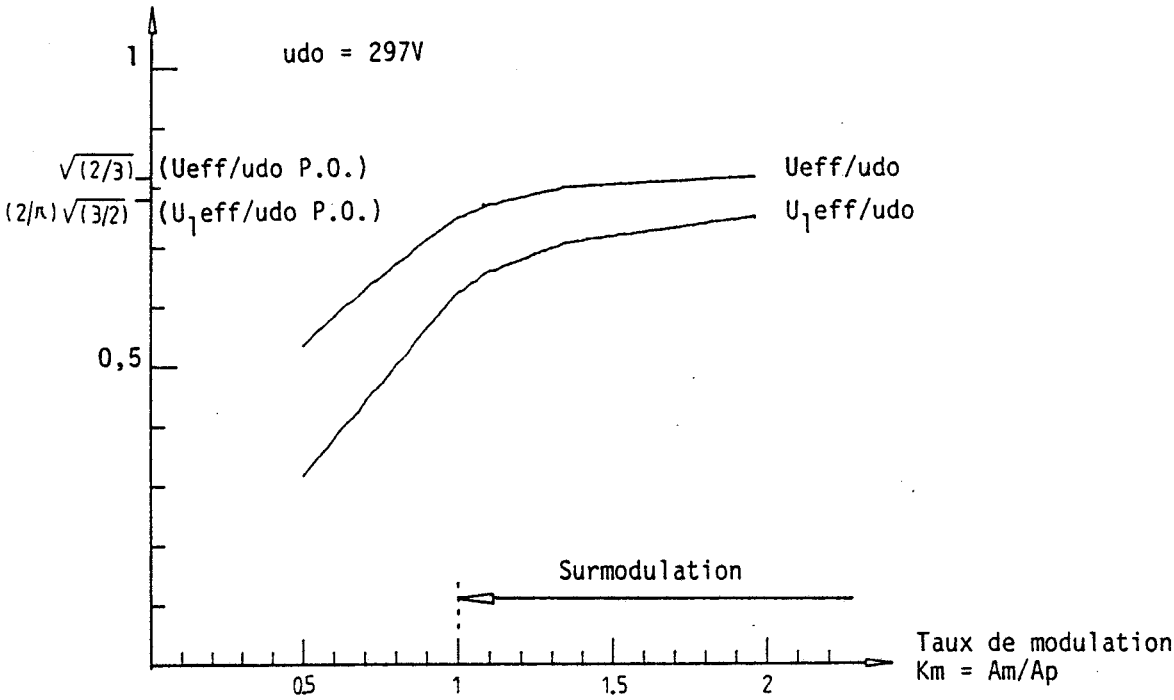


Figure 4.17 : Evolution des tensions efficaces en fonction du taux de modulation

Les propriétés énoncées sont particulièrement intéressantes, puisque, dans le cas de l'alimentation du moteur asynchrone à fréquence variable, l'amplitude du fondamental doit croître linéairement avec la fréquence ; or les paramètres de modulation sont liés au taux de modulation par relation :

$$Km = \frac{Am}{Ap} = \frac{2.FCT}{VCT} = \frac{2.3360.F_s}{VCT} \qquad (4.1)$$

Pour une fréquence de sortie fixée, le taux de modulation est inversement proportionnel à la fréquence VCT. L'action sur cette fréquence permet donc d'ajuster la tension efficace à la valeur voulue pour un point de fonctionnement donné (le régime nominal par exemple). Dans notre application, nous avons choisi un diviseur fixe et égal à 20 pour le compteur CPT20. La surmodulation est, dans ces conditions, atteinte lorsque la fréquence de sortie dépasse 45,7Hz ; le taux de modulation à 50Hz est égal à 1.09.

La variation simultanée de la fréquence et de la tension est donc obtenue en modifiant la valeur de l'entrée de consigne FCT. Nous avons, pour cela, calculé et tabulé les diviseurs du compteur CPT21 pour toute la plage de variation de la fréquence de sortie, 3Hz à 51Hz, en discrétisant celle-ci sur 256 valeurs ; l'incriment fréquentiel est donc de 0,2Hz.
L'acquisition des consignes de vitesse est effectuée en générant périodiquement l'interruption IR4. La lecture de deux boutons poussoirs détermine alors l'adresse de lecture du diviseur souhaité (voir figure 4.14) ; cette valeur est sauvegardée dans la paire de registres HL du microprocesseur.

3 - RESULTATS

Divers résultats sont présentés dans les pages suivantes ; ils montrent à la fois les formes d'ondes expérimentales et calculées des tensions et courants pour les différentes branches de montage.

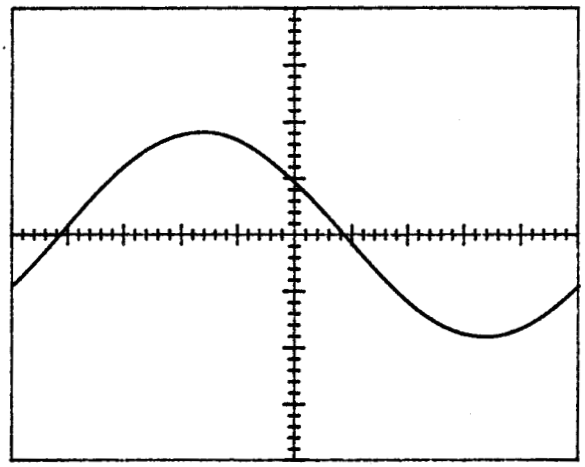
Lors de ces essais, la tension intermédiaire est réglée à 150V. Pour des questions de représentations graphiques, nous nous sommes uniquement intéressés à trois fréquence de sortie : 50.8Hz, 39.7Hz, 30Hz. Dans chaque cas, la machine asynchrone couplée en triangle, est soumise à un couple résistant de 3 Nm. Ne disposant pas, sur le banc d'essai, de capteur pour mesurer cette grandeur, son évolution n'a pu être tracée que par simulation.

Une légère déformation est observée, à l'entrée du changeur de fréquence, entre les relevés expérimentaux et les courbes simulées. Celle-ci résulte de la présence d'un autotransformateur et d'un transformateur d'isolement en amont du montage.

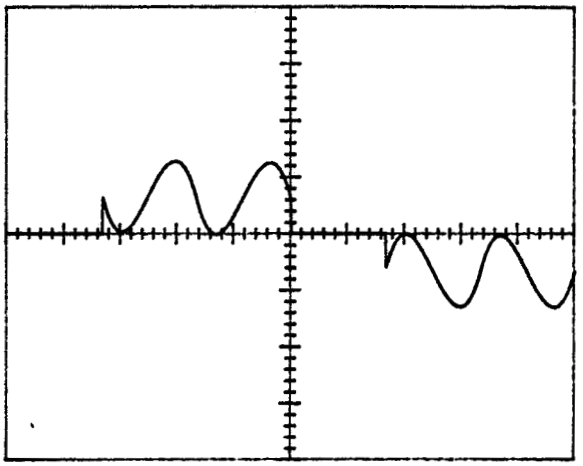
La figure 4.27 représente l'allure du couple électromagnétique (Cem) et du courant appelé par le moteur (io(1)), lors de la mise en vitesse du moteur. La consigne de fréquence appliquée au modulateur évolue linéairement de 3Hz à 51Hz en 2 secondes ; les fréquences, comme en pratique, sont discrétisées à 0.1Hz.

Les échanges de puissance avec le réseau et la réversibilité du montage redresseur sont mis en évidence sur la figure 4.28. Ces courbes sont relevées lors d'un fonctionnement en décélération.

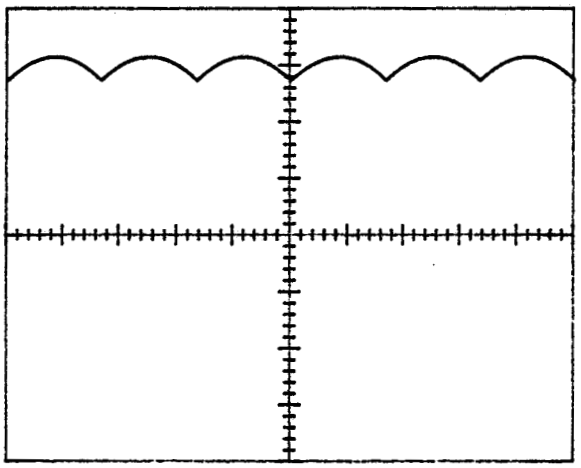
Figure 4.18 : Formes d'ondes calculées, Fréquence onduleur = 50.8Hz



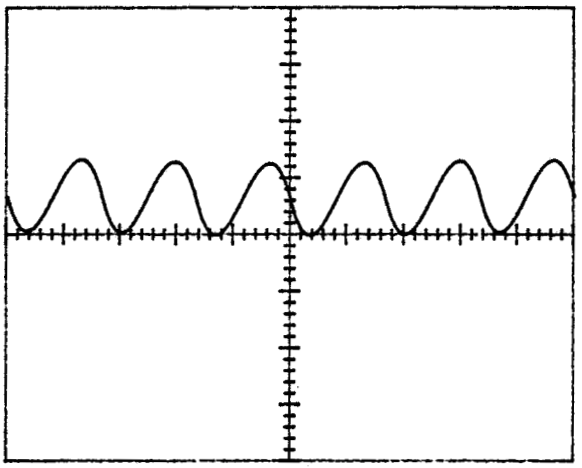
vi(1) 50V/Car 2mS/Car



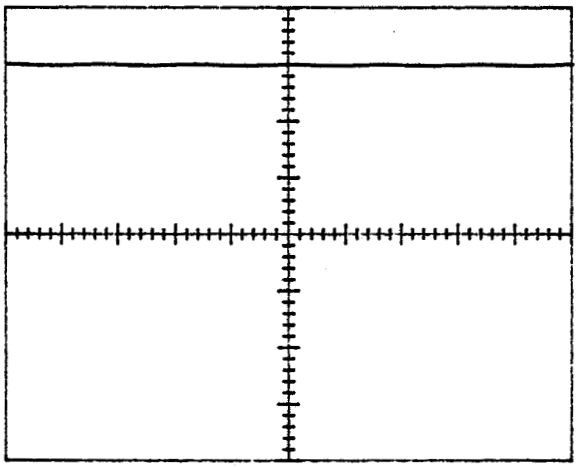
Ii(1) 5A/Car 2mS/Car



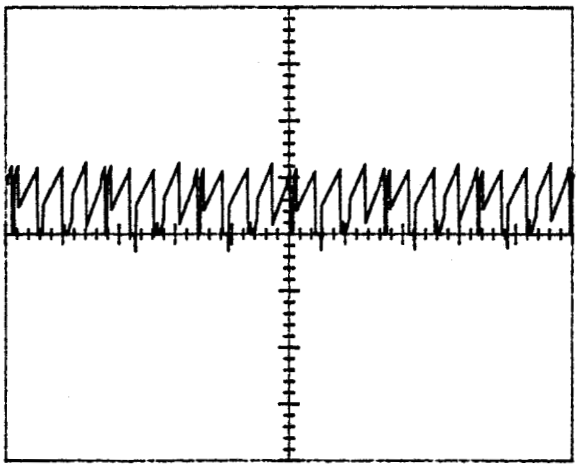
udi 50V/Car 2mS/Car



idi 5A/Car 2mS/Car

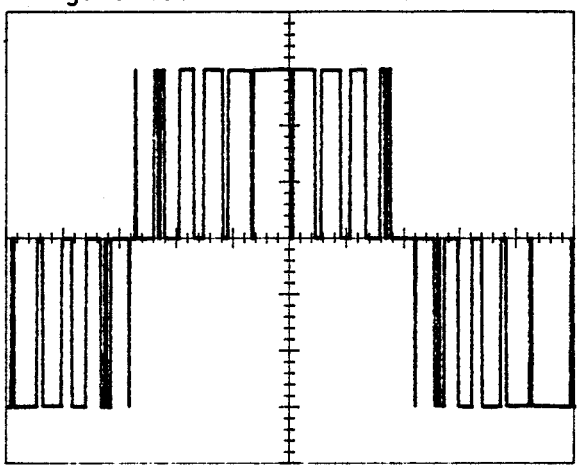


udo 50V/Car 2mS/Car

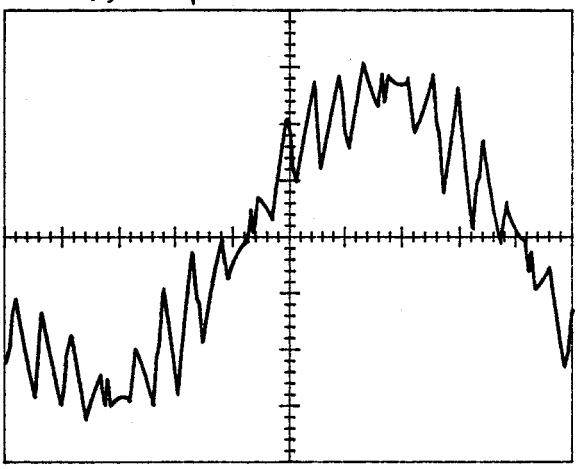


ido 5A/Car 2mS/Car

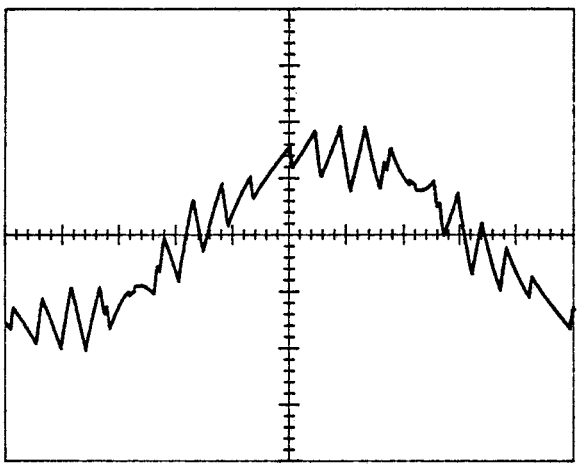
Figure 4.19 : Formes d'ondes calculées (suite), fréquence onduleur = 50.8Hz



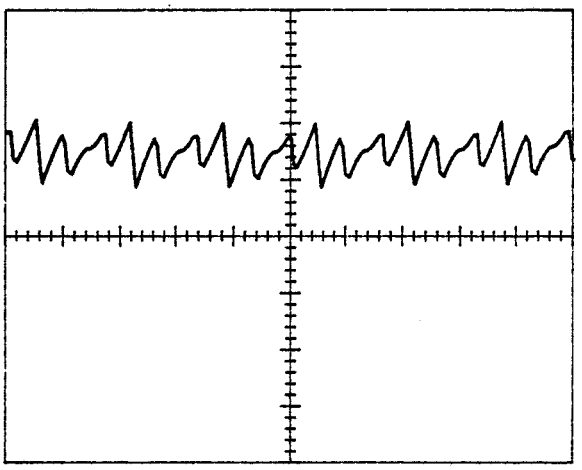
uo(1) 50V/Car 2mS/Car



io(1) 2A/Car 2mS/Car

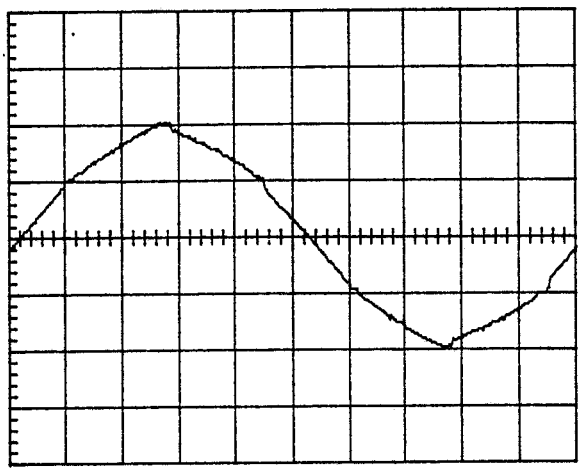


jo(1) 2A/Car 2mS/Car

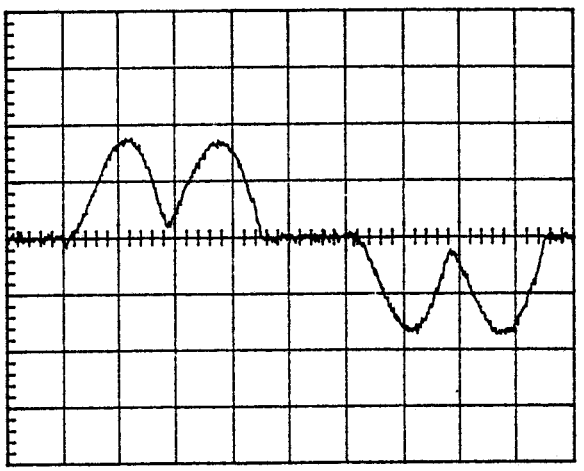


Couple Cem 2Nm/Car 2mS/Car

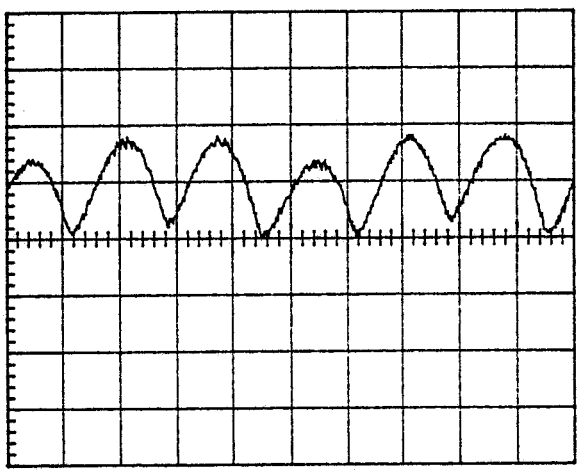
Figure 4.20 : Relevés expérimentaux, fréquence onduleur = 50.8Hz



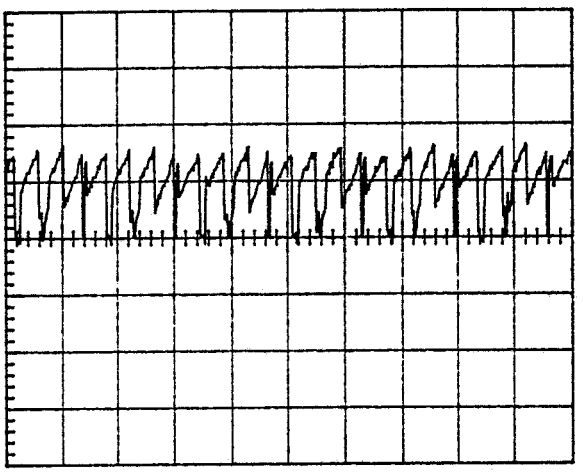
vi(1) 50V/Car 2mS/Car



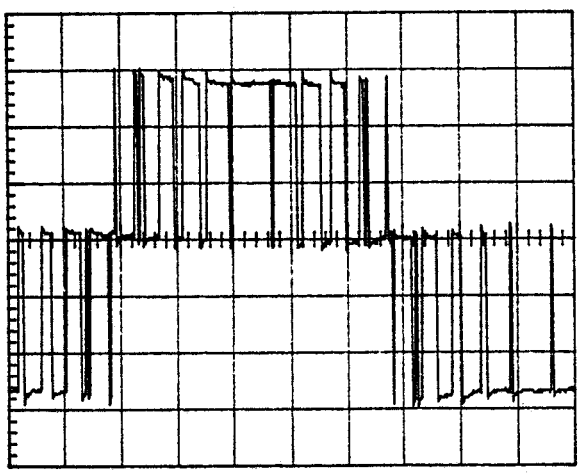
Ii(1) 5A/Car 2mS/Car



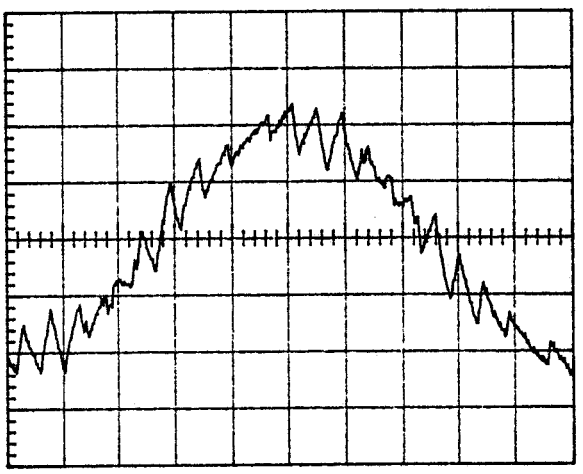
idi 5A/Car 2mS/Car



ido 5A/Car 2mS/Car

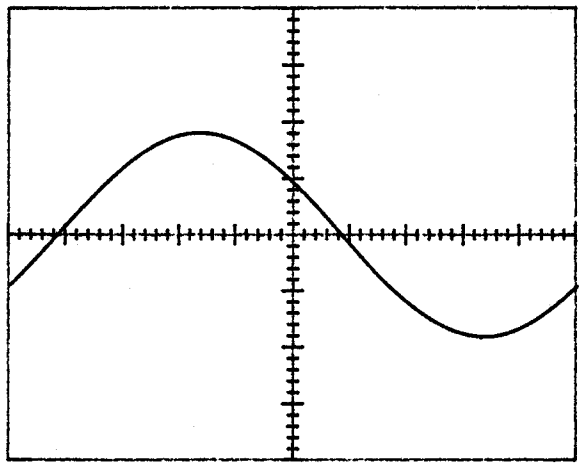


uo(1) 50V/Car 2ms/Car

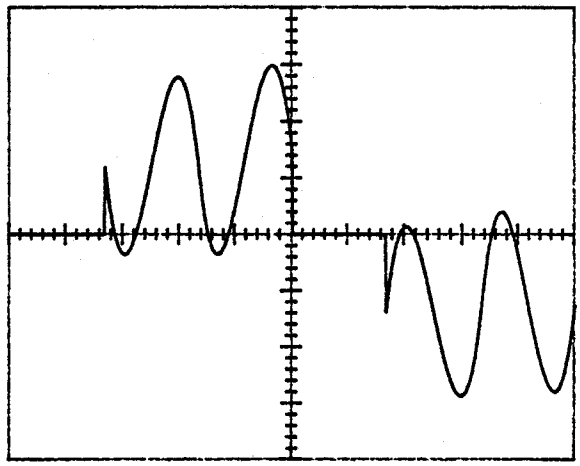


jo(1) 2A/Car 2mS/Car

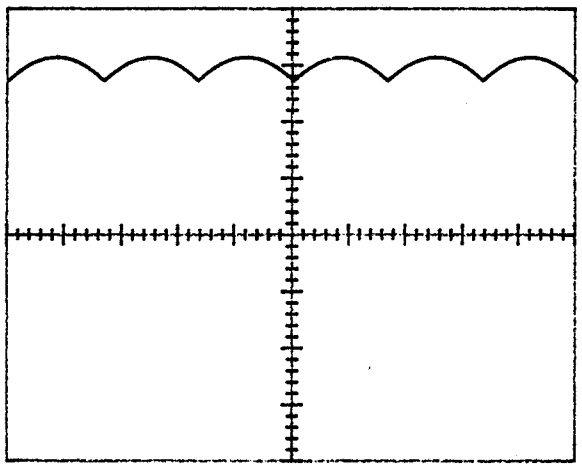
Figure 4.21 : Formes d'ondes calculées, fréquence onduleur = 39.7Hz



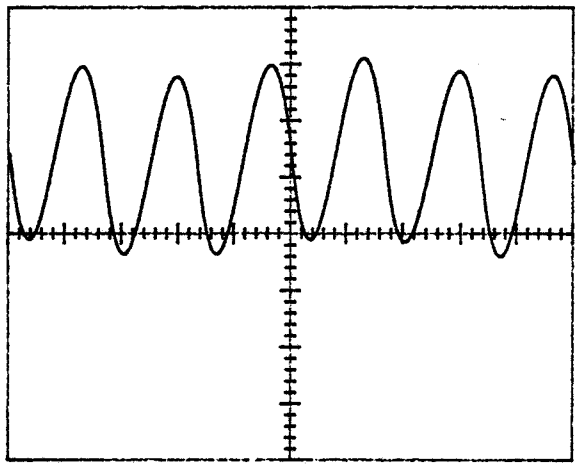
vi(1) 50V/Car 2mS/Car



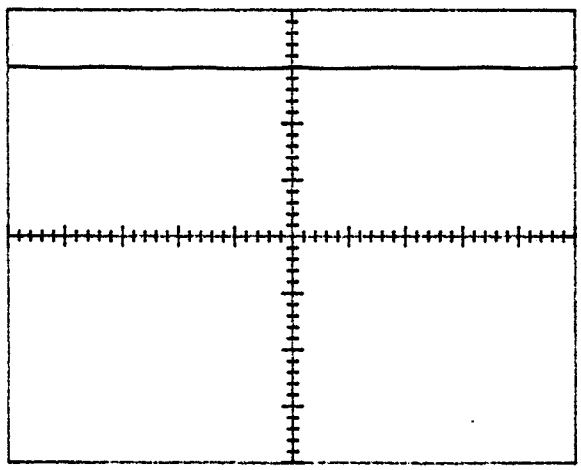
idi 2A/Car 2mS/Car



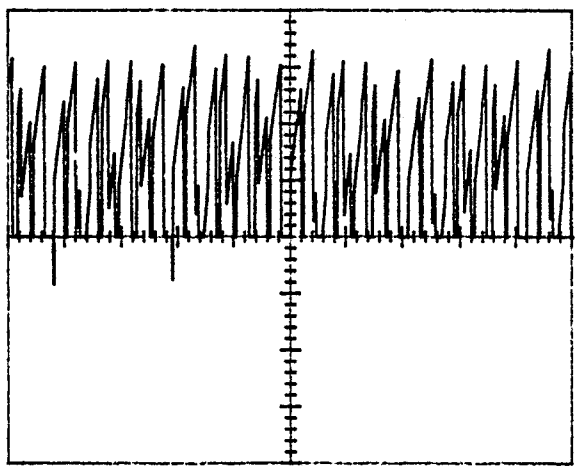
udi 50V/Car 2mS/car



idi 2A/Car 2mS/car

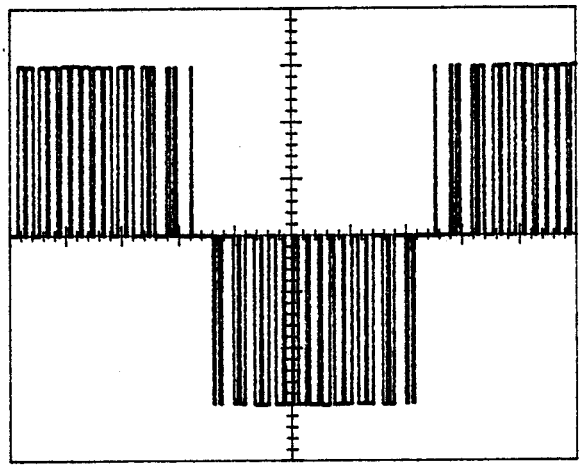


udo 50V/Car 2mS/Car

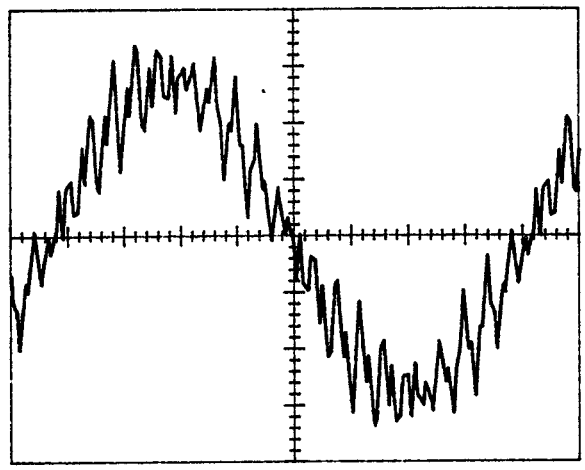


ido 2A/Car 2mS/Car

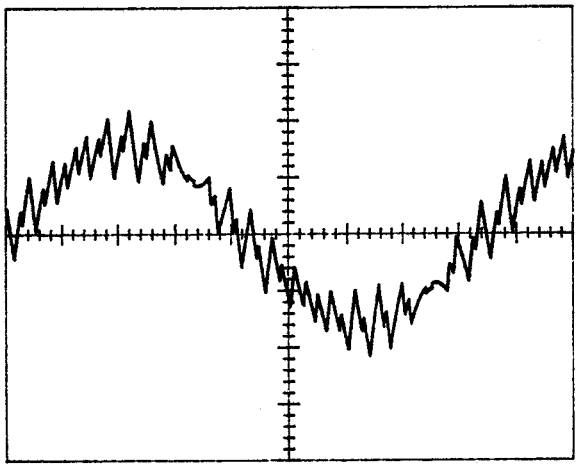
Figure 4.22 : Formes d'ondes calculées (suite), fréquence onduleur = 39.7Hz



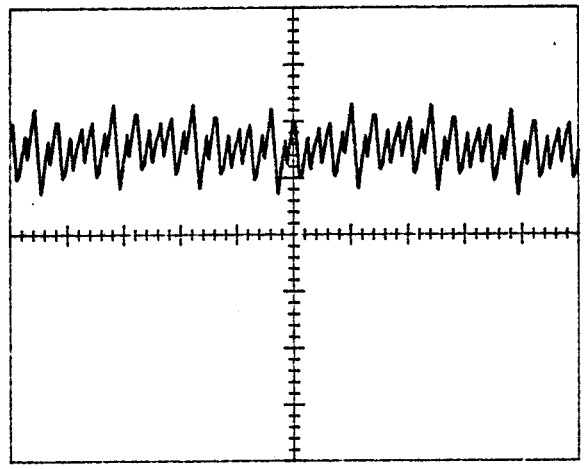
uo(1) 50V/Car 3mS/Car



io(1) 2A/Car 3mS/Car

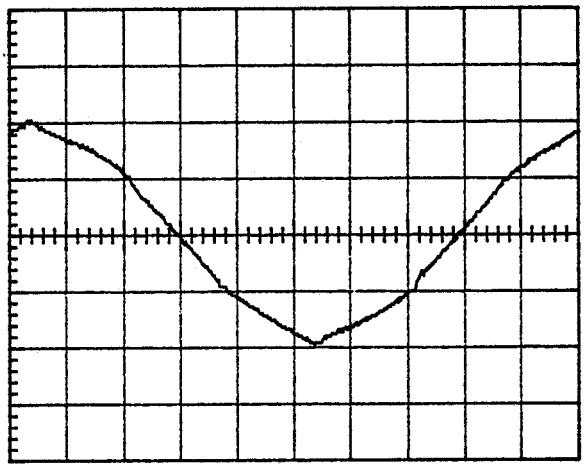


jo(1) 2A/Car 3mS/Car

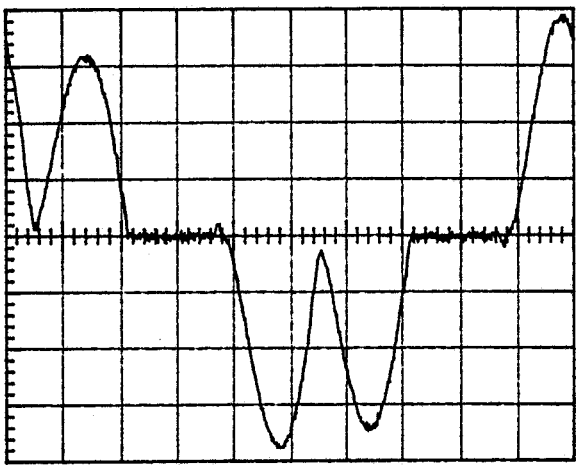


Couple : Cem 2Nm/Car 3mS/Car

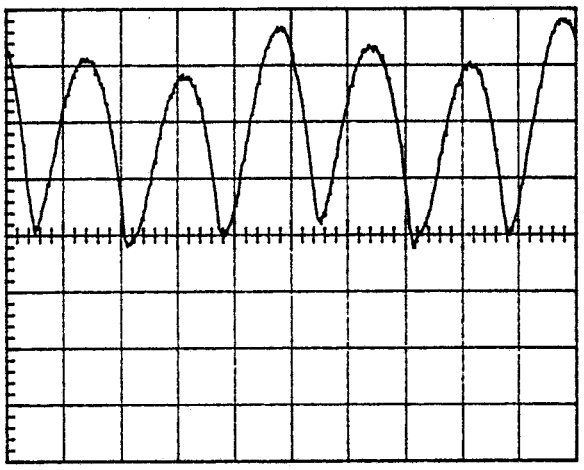
Figure 4.23 : Relevés expérimentaux, fréquence onduleur = 39.7Hz



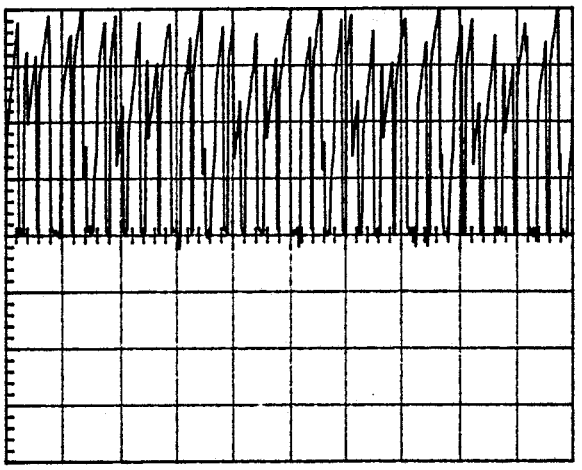
vi(1) 50V/Car 2mS/Car



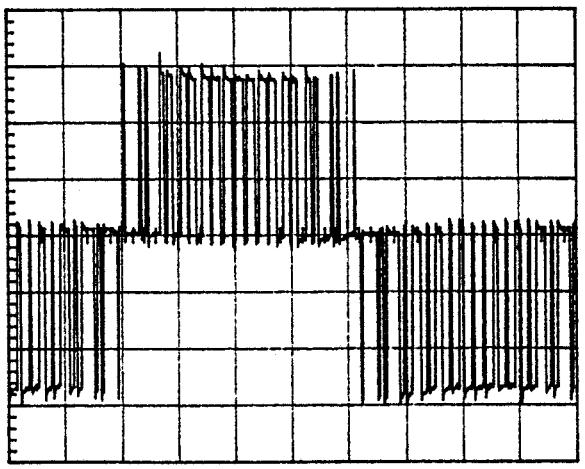
Ii(1) 2A/Car 2mS/Car



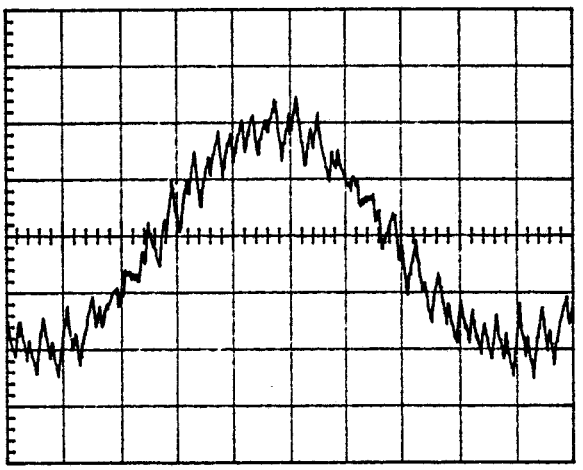
idi 2A/Car 2mS/Car



ido 2A/Car 2mS/Car

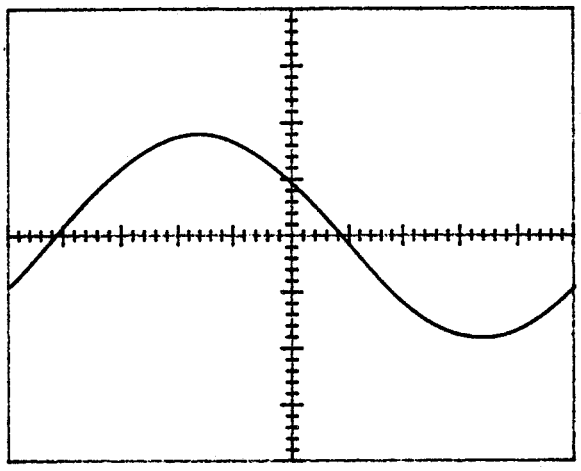


uo(1) 50V/Car 3mS/Car

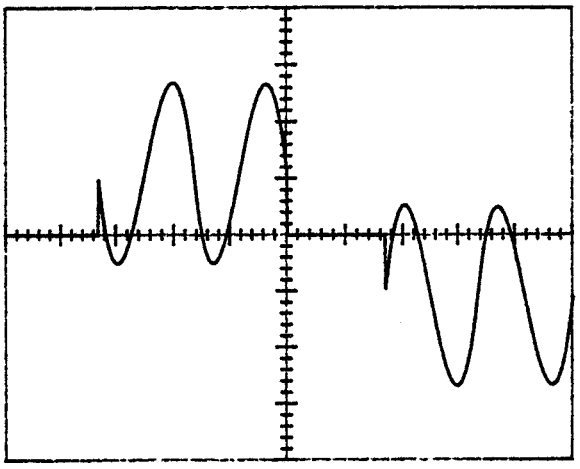


jo(1) 2A/Car 3mS/Car

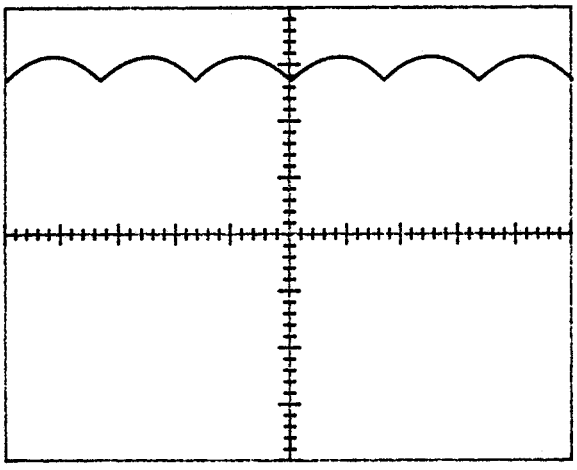
Figure 4.24 : Formes d'ondes calculées, fréquence onduleur = 30Hz



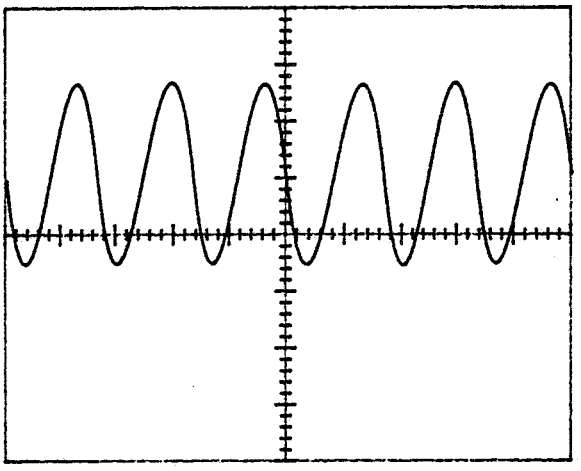
vi(1) 50V/Car 2mS/Car



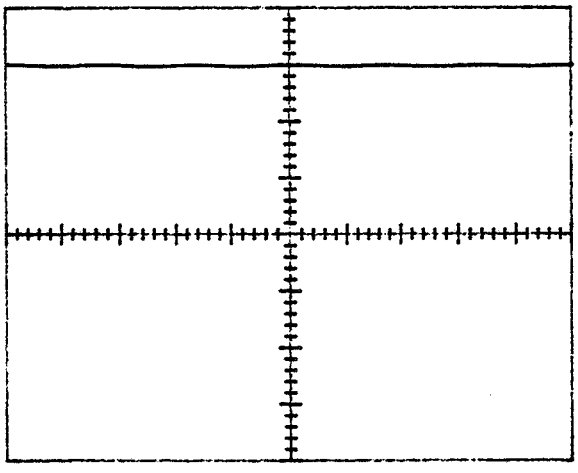
Ii(1) 2A/Car 2mS/Car



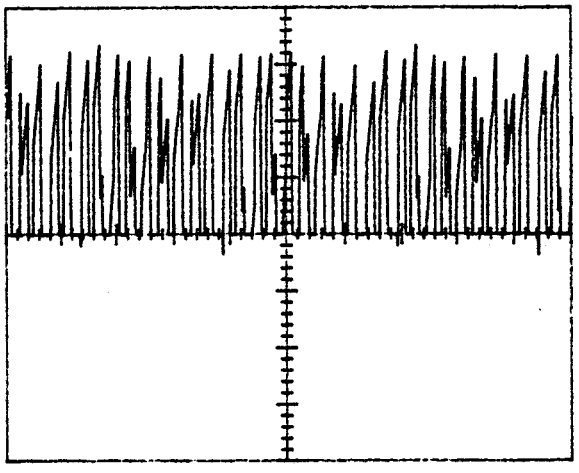
udi 50V/Car 2mS/Car



idi 2A/Car 2mS/Car

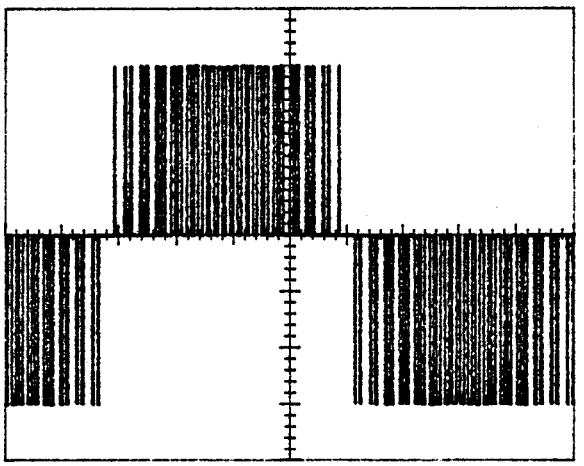


udo 50V/Car 2mS/Car

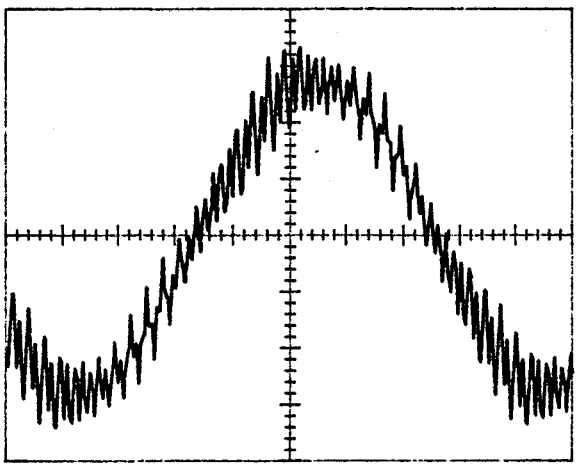


ido 2A/Car 2mS/Car

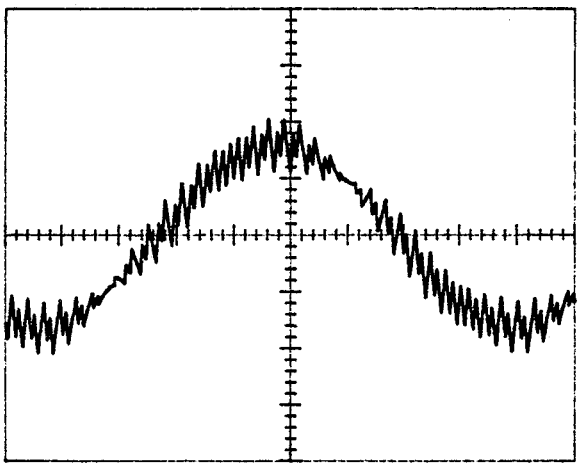
Figure 4.25 : Formes d'ondes calculées (suite), fréquence onduleur = 30Hz



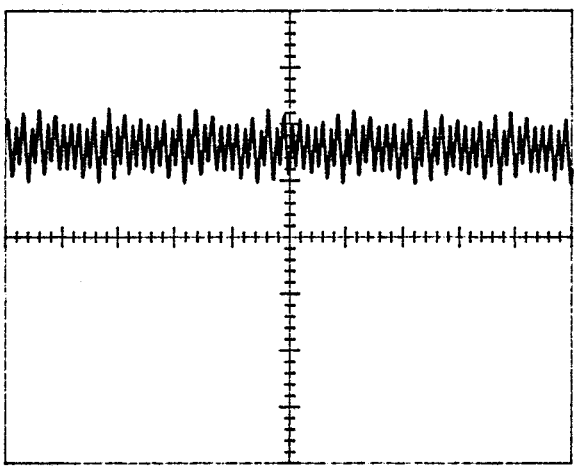
uo(1) 50V/Car 4mS/Car



io(1) 2A/Car 4mS/Car

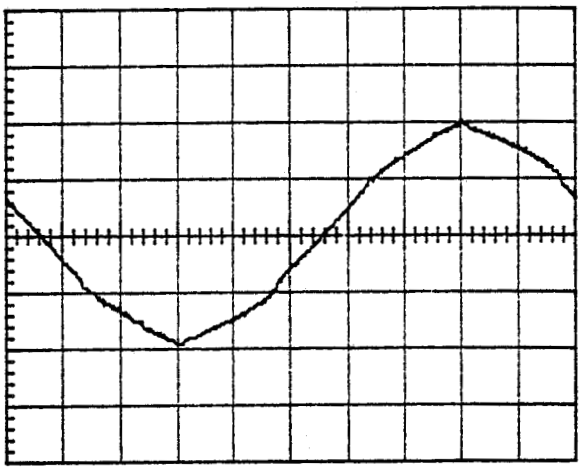


jo(1) 2A/Car 4mS/Car

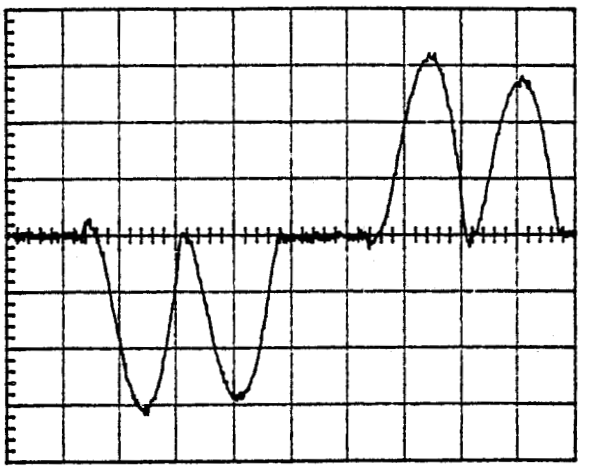


Couple : Cem 2Nm/Car 4mS/Car

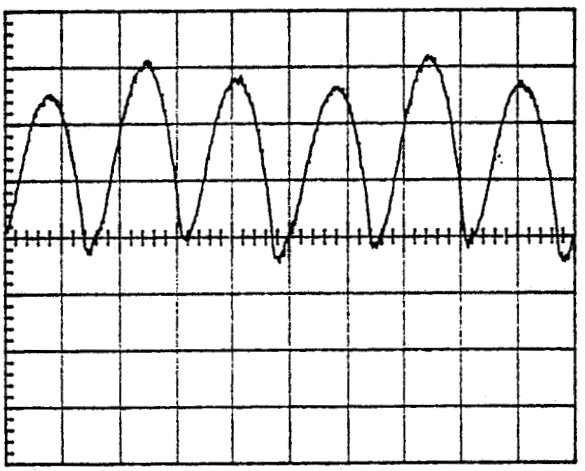
Figure 4.26 : Relevés expérimentaux, fréquence onduleur = 30Hz



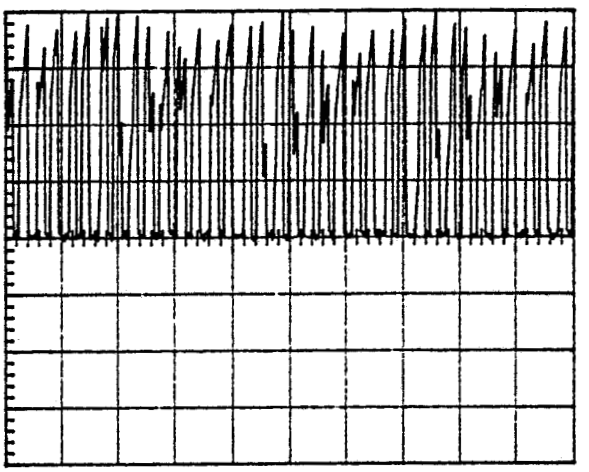
vi(1) 50V/Car 2mS/Car



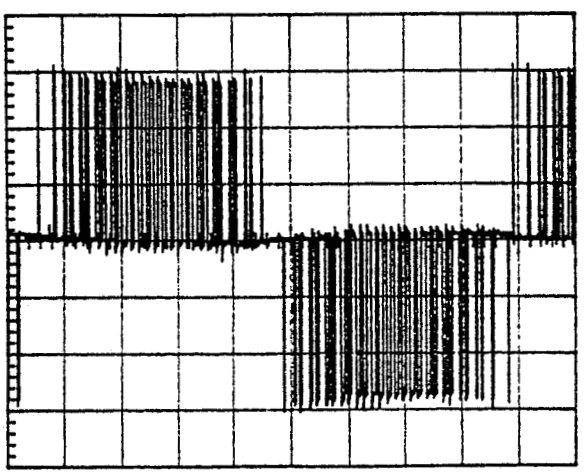
Ii(1) 2A/Car 2mS/Car



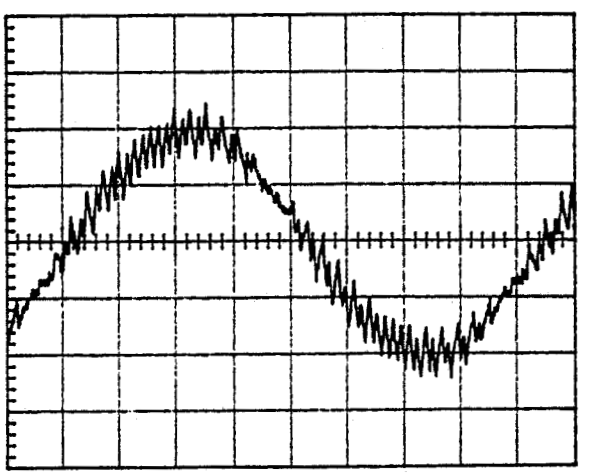
idi 2A/Car 2mS/Car



ido 2A/Car 2mS/Car



uo(1) 50V/Car 4mS/Car



jo(1) 2A/Car 4mS/Car

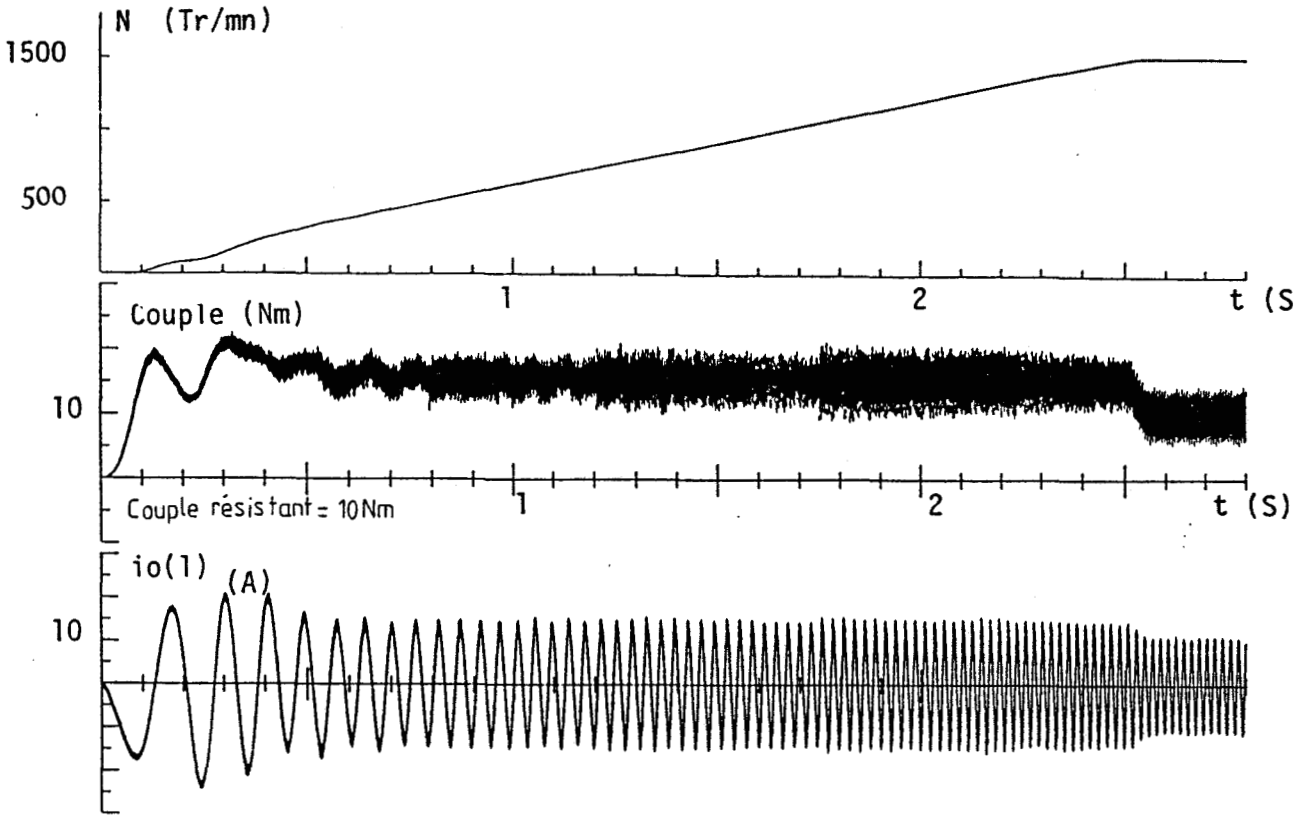


Figure 4.27 : Régime transitoire lors de la montée en vitesse (simulation)

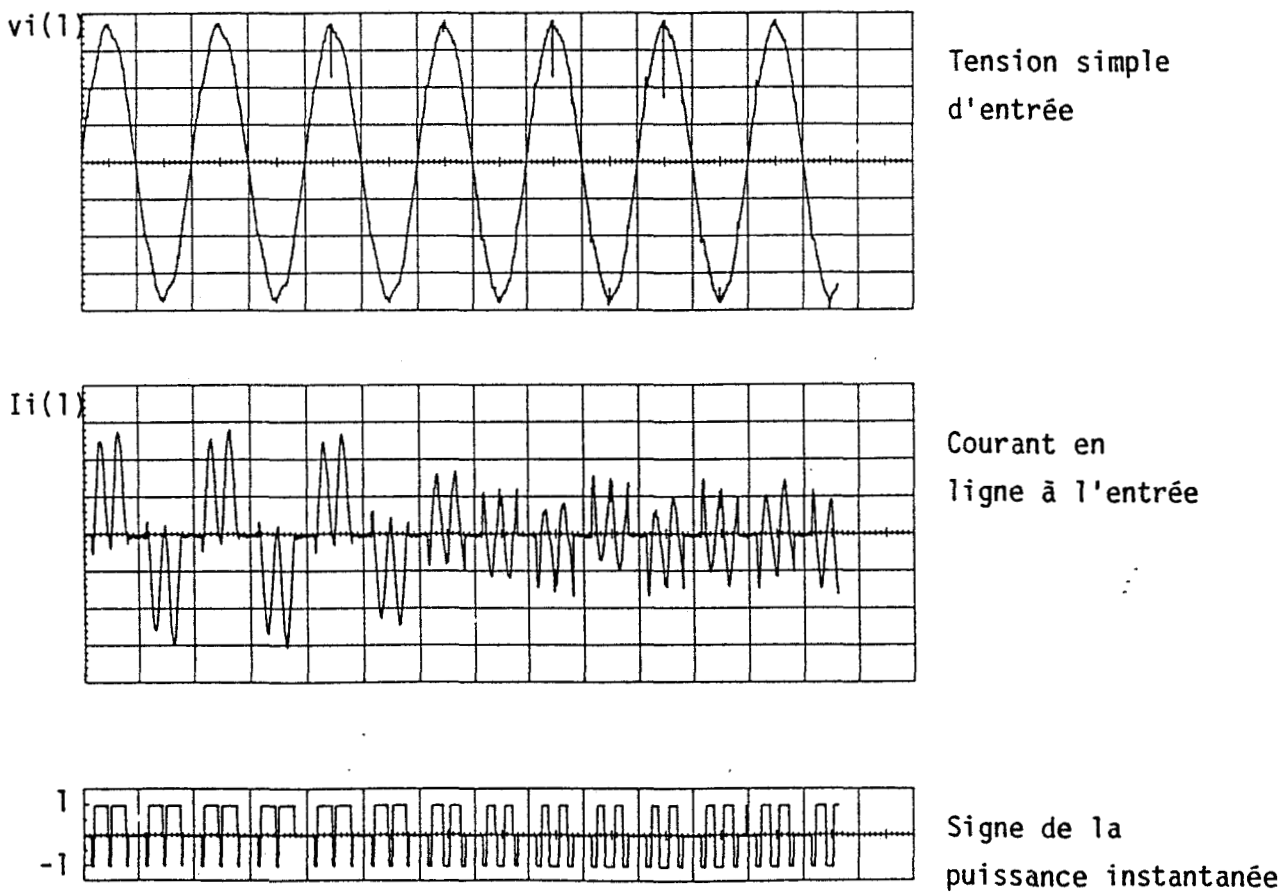


Figure 4.28 : Echange de puissance avec le réseau lors d'une décélération (Relevés expérimentaux)

4 - CONCLUSION

Les résultats précédents montrent clairement que l'association proposée fonctionne effectivement dans les conditions prévues par la modélisation présentée précédemment. Le montage constitue par conséquent une étape préliminaire indispensable à la construction d'un prototype capable de servir de base au développement d'un produit industriel. Un tel convertisseur a été mis au point au sein du Laboratoire dans le cadre d'une aide à l'innovation ANVAR. Il reprend la même architecture générale dans une gamme de puissance plus élevée (10KW) en incluant des fonctions supplémentaires de protection et de surveillance qui améliorent sa fiabilité.

Ce produit devient, dans ces conditions, parfaitement exploitable sur un plan industriel ; il présente en effet de nombreux points intéressants :

- Un coût raisonnable puisque les composants de la partie puissance sont classiques et que le dispositif de commande est relativement simple.
- Un volume réduit puisqu'aucun élément dissipateur n'est nécessaire et que les composants passifs du filtre intermédiaire sont de faible valeur.
- Un facteur d'utilisation du réseau très voisin d'un redresseur à diodes.

Compte-tenu de ces caractéristiques ce système pourrait trouver des applications intéressantes dans tous les domaines où les chaînes de conversion électromécaniques réclament une grande dynamique alliée à une réversibilité totale.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail montre qu'une méthode d'analyse structurée permet d'établir un modèle numérique en dépit de la complexité des systèmes étudiés, notamment dans le cas d'une association de plusieurs convertisseurs statiques utilisée pour l'alimentation d'une machine électrique.

La structure modulaire adoptée confère aux programmes de simulation qui en découlent de grandes qualités de flexibilité et de transparence.

L'originalité de cette étude réside dans la démarche utilisée pour l'analyse fonctionnelle de l'onduleur, uniquement fondée sur un a priori structurel, sans a priori de commande.

Les logiciels développés font évoluer les différentes parties opératives à la même vitesse que les parties commande. Ceci permet, d'une part, le traitement des grandeurs temporelles sous un aspect "microscopique" relevant de la commande microinformatique du dispositif, lorsque la fonction de commutation des composants de puissance est idéalisée et, d'autre part, le traitement des grandeurs "macroscopiques", (plus lentes), relatives aux évolutions électromécaniques de la machine.

Les divers résultats expérimentaux montrent que les hypothèses de modélisation admises sur le comportement du redresseur synchrone sont parfaitement justifiées, lorsque la commande des transistors recouvre exactement les intervalles de conduction des diodes placées en antiparallèle ; en revanche, elles sont plus discutables si l'on souhaite compliquer cette loi de commande en introduisant, par exemple, une modulation de largeur d'impulsions. Cette idée mériterait une étude approfondie afin, notamment, d'estimer les améliorations apportées au contenu harmonique des courants d'entrée et de définir les contraintes supplémentaires imposées à cette structure indirecte (composants de puissance et filtre).

Il faut enfin souligner l'intérêt de la solution retenue sur un plan industriel. La cascade de conversion proposée apporte en effet une solution originale au problème de la non-réversibilité de l'étage continu utilisé dans les chaînes de conversion classiques. L'emploi de modules de puissance hybrides permet une réalisation compacte, tandis que la mise en oeuvre de la commande microinformatique de l'ensemble demeure à un niveau de complexité raisonnable, puisqu'elle fait intervenir un simple microprocesseur 8 bits.

ANNEXE 1 :

OPTIMISATION DES FORMES D'ONDE POUR UN ONDULEUR MONOPHASE.

1 - INTRODUCTION

La loi de commande optimale proposée par PATEL et HOFT /22/ vise à éliminer un nombre fixé d'harmoniques dans les formes d'onde en sortie des onduleurs. La formulation du problème conduit à un système d'équations non linéaires dont la résolution numérique est traitée par la méthode du gradient.

Nous proposons ici la mise en oeuvre de cette méthode, ainsi que quelques solutions, appliquées au cas d'un onduleur en pont monophasé. En effet, pour cette topologie, il convient d'éliminer l'harmonique 3 et éventuellement ses premiers multiples qui sont inexistants lors d'un couplage triphasé de la charge (sans neutre) /22/ mais qui en revanche, prennent une amplitude non négligeable pour une charge monophasée.

2 - MISE EN EQUATIONS POUR UNE ONDE A 2 NIVEAUX

La figure A1.1 représente une onde de sortie, à deux états, généralisée. Cette fonction, $f(\omega t)$, est périodique ; son alternance négative est égale au signe près à son alternance positive :

$$f(\omega t+\pi) = -f(\omega t)$$

Les angles α_0, $\alpha_1 \ldots \alpha_{2M+1}$ définissent les instants de commutation sur une demi- période. De plus, $\alpha_0=0$ et $\alpha_{2M+1}=\pi$

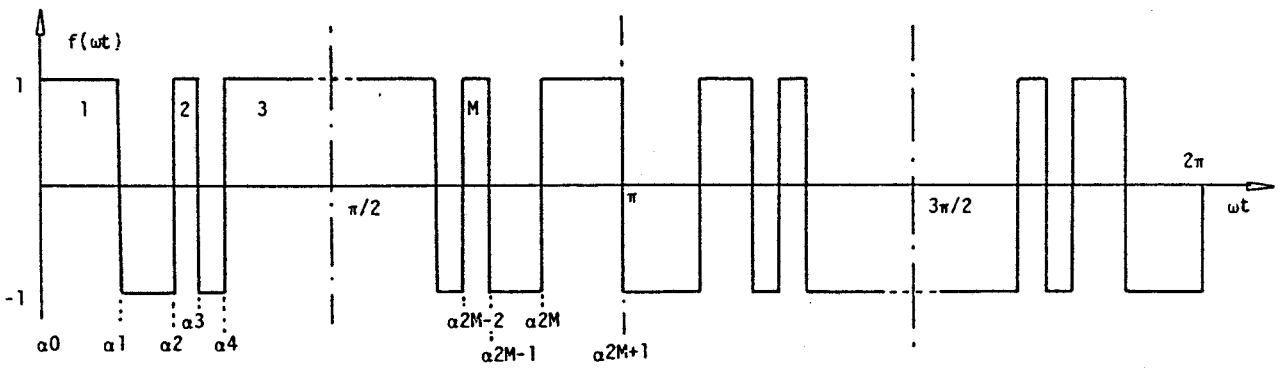


Figure A1.1 : Onde à 2 états généralisée

Le développement en série de Fourier s'écrit :

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \qquad (A1.1)$$

avec : - $an = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\,\omega t)\, d(\omega t)$ (A1.2)

- $bn = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\,\omega t)\, d(\omega t)$ (A1.3)

La symétrie de "glissement" par rapport à la demi-période /67/ et la symétrie par rapport à l'origine nous permettent de simplifier ces expressions. En effet, en prenant l'origine en α_0, le développement en série de Fourier ne contient pas de terme pair. Pour n impair, les coefficients s'écrivent :

$$bn = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{2M} (-1)^k \int_{\alpha_k}^{\alpha_{k+1}} \sin(n\omega t)\, d(\omega t)$$

$$= \frac{2}{n\pi} \sum_{k=0}^{2M} (-1)^k \left[\cos(n\,\alpha_k) - \cos(n\,\alpha_{k+1}) \right]$$

$$= \frac{2}{n\pi} \left[\cos n\alpha_0 - \cos n\alpha_{2M+1} + 2 \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \cos n\alpha_k \right]$$

or $\alpha_0 = 0$ et $\alpha_{2M+1} = \pi$ donc $\cos(n\alpha_0) = 1$ et $\cos(n\alpha_{2M+1}) = -1$

$$bn = \frac{4}{n\pi} \left[1 + \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \qquad (A1.5)$$

De la même façon : $an = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{2M} (-1)^k \int_{\alpha_k}^{\alpha_{k+1}} \cos(n\omega t)\, d(\omega t)$

$$an = \frac{-4}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \sin n\alpha_k \right] \qquad (A1.4)$$

Les équations A1.4 et A1.5 sont fonctions de 2M variables $\alpha_1, \alpha_2 \ldots \alpha_{2M}$. Pour obtenir une solution unique, 2M équations sont nécessaires. Elles sont obtenues en égalant M harmoniques à zéro. Soit un système de M équations obtenues à partir du coefficient an et M équations pour le coefficient bn. Si l'on assure en plus une symétrie des instants de commutation par rapport au quart de période, le nombre d'angles inconnus peut être divisé par deux (figure A1.2).

en effet : $\boxed{\alpha_k = \pi - \alpha_{2M+1-k}}$ pour k=1, 2, ... M (A1.6)

et l'on vérifie : an = 0 quel que soit n.

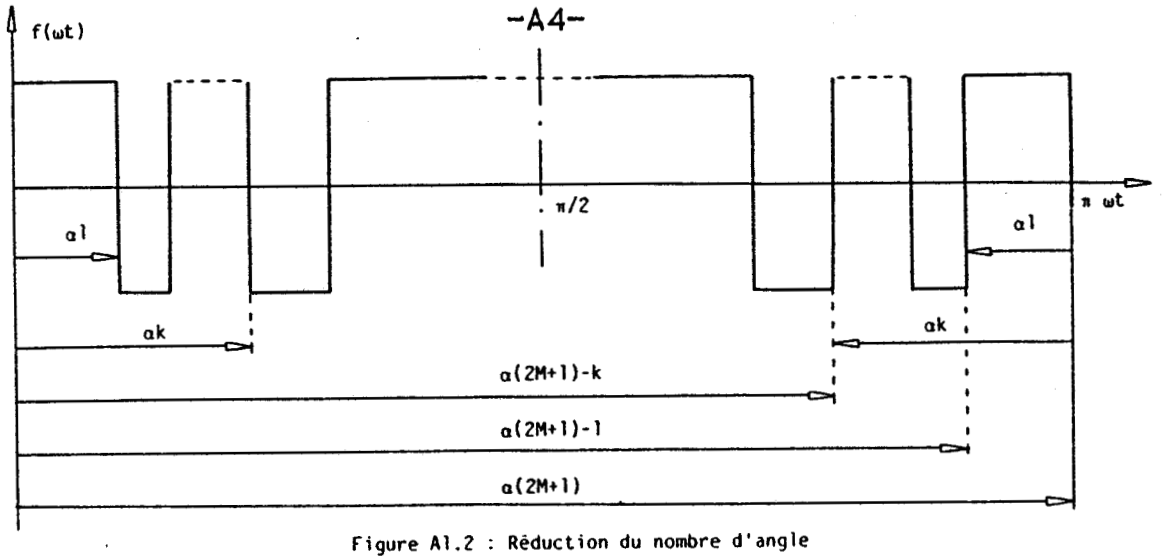


Figure A1.2 : Réduction du nombre d'angle

On remplace α_k par son expression A1.6 dans A1.5

Il vient : $\cos n\,\alpha_k = \cos n(\pi - \alpha_{2M+1-k})$

$$= \cos n\pi . \cos n\alpha_{2M+1-k} - \sin n\pi . \sin n\alpha_{2M+1-k}$$

$$= (-1) \cos n\alpha_{2M+1-k}$$

donc A1.5 peut encore s'écrire :

$$\boxed{bn = \frac{4}{n\pi} \left[1+2 \sum_{k=1}^{M} (-1)^k \cos n\alpha_k \right]} \qquad (A1.7)$$

Finalement le problème revient à résoudre M équations du type A1.7. Ces équations non linéaires sont de nature transcendante. Il n'existe pas de méthode analytique pour résoudre de telles équations, la technique numérique est donc tout à fait adaptée à la recherche des solutions.

3 - METHODE NUMERIQUE DE RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS NON LINEAIRES

Soit le système d'équations non linéaires suivant :

$$\begin{cases} f_1 (\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_M) = 0 \\ f_2 (\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_M) = 0 \\ f_M (\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_M) = 0 \end{cases}$$

soit $f_i (\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_M) = 0$ pour $i = 1, 2 \ldots M$ (A1.8)

En utilisant les notations matricielles suivantes :

$$[\ f\ ] = [\ f_1,\ f_2 \ldots f_M\ ]^T \quad \text{matrice de dimension Mx1}$$

$$[\ \alpha\ ] = [\ \alpha_1, \alpha_2 \ldots \alpha_M\ ]^T \quad \text{matrice de dimension Mx1}$$

Le problème réside dans la résolution du système : $[\ f(\alpha)\ ] = [0]$ (A1.9)

La démarche de calcul se décompose de la manière suivante :

- estimation d'un ensemble de valeurs initiales pour la matrice $[\ \alpha]$: $[\alpha]^0 = [\ \alpha_1^0, \alpha_2^0 \ldots \alpha_M^0\ ]^T$

- calcul de $[f(\alpha)^0\ ] = [\ f\ ]^0$

- linéarisation de $[f(\alpha)^0]$ autour d'une solution approchée $[\alpha]^0$

soit $$[f(\alpha)] = [f]^0 + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0 . \ [d\alpha]^0 = 0 \qquad \text{(A1.10)}$$

avec $$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1^0}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f1^0}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial f1^0}{\partial \alpha_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial fM^0}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial fM^0}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial fM^0}{\partial \alpha_M} \end{bmatrix} \quad \text{calculé pour } [\alpha]^0 \qquad \text{(A1.11)}$$

et $$[d\alpha] = [d\alpha_1,\ d\alpha_2 \ldots d\alpha_M\ ]^T$$

La résolution de l'équation "linéarisée" (A1.10) permet de calculer $[\ d\alpha\ ]^0$ et, ainsi, d'en déduire de proche en proche la nouvelle valeur de la matrice $[\alpha] \Rightarrow [\alpha]^1 = [\alpha]^0 + [d\alpha]^0$

Le processus est répété jusqu'à ce que l'équation (A1.9) soit obtenue avec la précision souhaitée.
Il faut toutefois s'assurer qu'il n'y ait pas divergence ($\alpha_{N+1} < \alpha_N$ par exemple), auquel cas il convient de recommencer le processus avec une nouvelle valeur initiale.

4 - IMPLANTATION SUR CALCULATEUR

4.1 Adaptation de la méthode pour une onde à 2 ou 3 niveaux

En désignant par n_1, $n_2 \ldots n_M$ les M harmoniques à supprimer, le système A1.8 s'écrit :

$$\begin{cases} f_1(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{M} (-1)^k \cos n_1\alpha_k = 0 \\ f_2(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{M} (-1)^k \cos n_2\alpha_k = 0 \\ f_M(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{M} (-1)^k \cos n_M\alpha_k = 0 \end{cases}$$

soit $f_i(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{M} (-1)^k \cos n_i\alpha_k = 0$ pour $i = 1, 2 \ldots M$.

La matrice des dérivées partielles (A1.10) est donc égale à :

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right] = \begin{bmatrix} 2n_1 \sin n_1\alpha_1 - 2n_1 \sin n_1\alpha_2 \ldots (-1)^{M+1} 2n_1 \sin n_1\alpha_M \\ 2n_2 \sin n_2\alpha_1 - 2n_2 \sin n_2\alpha_2 \ldots (-1)^{M+1} 2n_2 \sin n_2\alpha_M \\ 2n_M \sin n_M\alpha_1 - 2n_M \sin n_M\alpha_2 \ldots (-1)^{M+1} 2n_M \sin n_M\alpha_M \end{bmatrix}$$

Le même raisonnement peut être tenu pour une onde à 3 niveaux constituée de M impulsions par demi-période (figure A1.3) et possédant une symétrie de glissement par rapport à la demi-période et une symétrie par rapport à l'origine. Son développement en série de Fourier s'obtient aisément ; il ne comporte que des termes en sinus de rang impair :

$$\boxed{b_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^{M} (-1)^{k+1} \cos n\alpha_k}$$

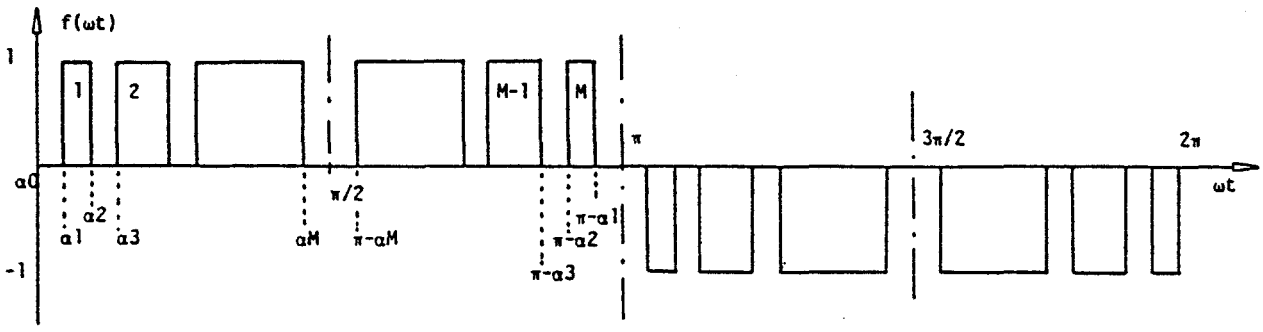


Figure A1.3 : Onde généralisée à 3 niveaux

L'annulation de M harmoniques, dans ce cas, est obtenue en résolvant le système suivant :

$$f_i(\alpha) = \sum_{k=1}^{M} (-1)^{k+1} \cos n_i \alpha_k = 0 \qquad \text{pour } i = 1, 2 \ldots M$$

4.2 Programme de calcul

L'adaptation de la méthode du gradient au problème posé nous conduit à l'organigramme de programmation représenté ci-dessous, figure A1.4, et au programme de simulation numérique qui suit.

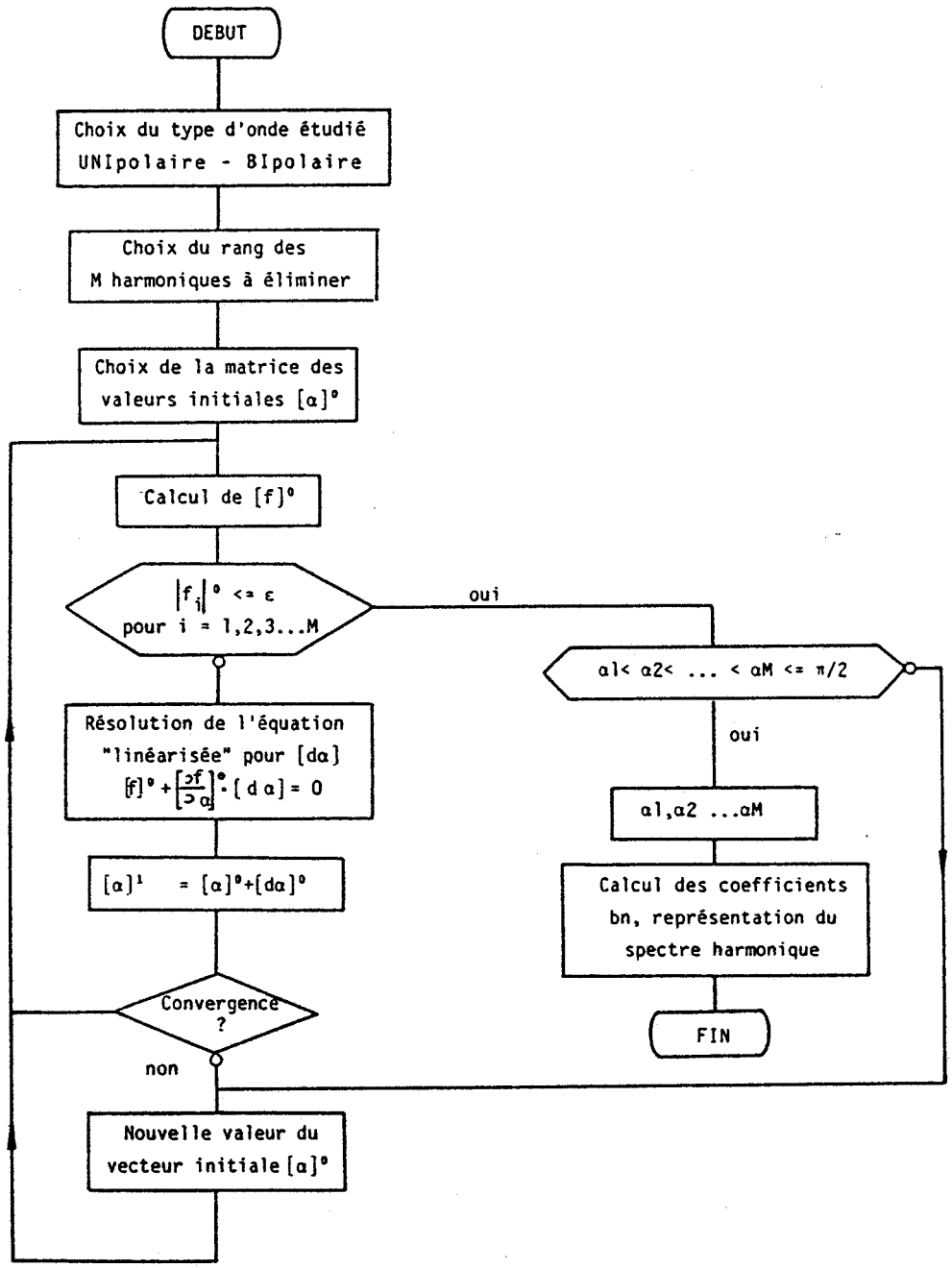


Figure A1.4 : Organigramme de programmation

```
10   !*************************************************
20   !
30   !      PROGRAMME D'ELIMINATION DE  M  HARMONIQUES
40   !       DETERMINATION DES ANGLES DE COMMUTATION
50   !            --- METHODE DU GRADIENT ---
60   !          ONDE DE TENSION à 2 ou 3 NIVEAUX
70   !
80   !    D'aprés :IEEE IA-9  May-June 1973  PATEL/HOFT
90   !                 (Evolution Thèse)
100  !*********************************************P-L**
110  !  PROG "PATEL_HOFT"                        22 DEC 87
120  !
130     DEG
140     OPTION BASE 1
150     INTEGER K,H,M,H1
160     INTEGER Colonne,Ligne
170  !
180  DIM Alpha0(10),Alphai(10)   !............ Matrice des angles recherchés
190  DIM An(10)                  !................ Matrice des harmoniques An
200  DIM Df(10,10)               !........... Matrice des dérivées partielles
210  DIM Dfi(10,10)              !.................... Matrice inverse de [Df]
220  DIM Dalpha(10)              !....... Ecart (ALPHAi+1) -(ALPHAi)= dALPHAi
230  DIM Hn(50)                  !....... Tableau des 50 premiers harmoniques
240  DIM Critere(10)             !........................... Variable binaire
250  DIM He(10)                  ! Valeur du rang des M harmoniques concernés
260  DIM Fich_angle(15)          !....... Fichier pour le stockage des angles
270                              ! ...........Nombre d'harmoniques à éliminer
280                              ! ..........  = Nbre d'angles / demi-période
290  !
300        INPUT "Nombre d'harmoniques à éliminer  ? ",M
310  !
320        REDIM Alpha0(M),Alphai(M)
330        REDIM An(M),He(M)
340        REDIM Df(M,M),Dfi(M,M)
350        REDIM Dalpha(M)
360        REDIM Critere(M)
370  !
380        MAT Alphai= (0)
390        MAT An= (0)
400        MAT Df= (0)
410        MAT Dfi= (0)
420        MAT Dalpha= (0)
430        MAT Fich_angle= (0)
440  !
450  ! ------------------- Sélection du type d'onde ------------
460  !
470  INPUT "Type d'onde étudié : UNIpolaire OU BIpolaire ",Onde$
480  Inprimante=1
490  PRINTER IS Inprimante
500  SELECT Onde$
510       CASE "BI"
520       PRINT "  Etude pour une fonction à 2 états (Tension Bipolaire)"
530       CASE "UNI"
540       PRINT "  Etude pour une fonction à 3 états (Tension Unipolaire)"
550       CASE ELSE
560       DISP "Erreur dans votre choix "
570       PAUSE
580    END SELECT
590       !
600 Part1:!-------------------- Valeur initiale de la matrice [ALPHA]
610       !
620       PRINT "  Neutralisation de : ";M;"harmoniques"
630       PRINT
640       PRINTER IS Inprimante
650  FOR K=1 TO M
660       DISP "Rang de l'harmonique à éliminer ";
670       INPUT He(K)
680       PRINT "rang de l'harmonique éliminé :";He(K)
690  NEXT K
700  FOR K=1 TO M
710       DISP "Valeur initiale de ALPHA(";K;") ";
720       INPUT Alpha0(K)
730       PRINT "ALPHA0(";K;") =";Alpha0(K)
740  NEXT K
750  Mmax=MAX(He(*))              ! Rang du dernier harmonique à supprimer
760  !
770  MAT Alphai= Alpha0
780  Iteration=0                  !            Nombre de boucles de calcul
790  Delta=1/2000                 !  Valeur mini tolérée pour l'harmonique
800       !
810 Part2:!------------------------------- Calcul de [F(ALPHA)]
820       !
830         MAT Hn= (0)              ! Valeurs des harmoniques
840         MAT An= (0)              !    <<          <<    à annuler
850  FOR H=1 TO Mmax                 ! Calcul des Mmax premiers harmoniques
860         Signe=1
870        SELECT Onde$
880               CASE "BI"
890               FOR K=1 TO M       ! Boucle sur les M angles
900                   Signe=-Signe   ! (-1)^K
910                   Hn(H)=Hn(H)+Signe*COS(H*Alphai(K))
920                   NEXT K
930                   Hn(H)=(4/(H*PI))*(1+2*Hn(H))
940               CASE "UNI"
950               FOR K=1 TO M       ! Boucle sur les M angles
960                   Signe=-Signe   ! (-1)^K
970                   Hn(H)=Hn(H)-Signe*COS(H*Alphai(K))
980                   NEXT K
990                   Hn(H)=(4/(H*PI))*(Hn(H))
1000              END SELECT
```

```
1010   NEXT H
1020   !
1030   IF Iteration=0 THEN
1040                      GOSUB Impression
1050                      GOSUB Spectre
1060                      END IF
1070   FOR H=1 TO M
1080       An(H)=Hn(He(H))   ! Harmoniques à supprimer
1090   NEXT H
1100       !
1110 Part3:!----------------- Linéarisation de F[ALPHA] autour de ALPHA0
1120       !
1130   !
1140   ! -3.1- Calcul de la matrice [dF/dALPHA]
1150   !
1160           Signe=-1
1170           FOR Colonne=1 TO M
1180               Signe=-Signe    ! (-1)^(colonne+1)
1190           FOR Ligne=1 TO M
1200            SELECT Onde$
1210       CASE "BI"
1220            Df(Ligne,Colonne)=Signe*2*He(Ligne)*SIN(He(Ligne)*Alphai(Colonne
))
1230       CASE "UNI"
1240            Df(Ligne,Colonne)=-Signe*He(Ligne)*SIN(He(Ligne)*Alphai(Colonne)
)
1250       END SELECT
1260           NEXT Ligne
1270           NEXT Colonne
1280  !
1290  !  -3.2- Calcul de la matrice colonne [dALPHA]
1300  !
1310           MAT Dfi= INV(Df)
1320           MAT Dfi= (-1)*Dfi
1330           MAT Dalpha= Dfi*An
1340       !
1350 Part4:!----------------- Nouvelle valeur pour la matrice [ALPHA]
1360       !
1370           Iteration=Iteration+1
1380           MAT Alphai= Alphai+Dalpha
1390           IF Alphai(1)<0 OR Alphai(1)>90 THEN Diverge
1400           IF Alphai(2)<0 OR Alphai(2)<Alphai(1) THEN Diverge
1410           IF Alphai(M)>90 THEN Diverge
1420       !
1430 Part5:! ---------------- Critère de qualité - Sortie des résultats
1440       !
1450      MAT Critere= (1)
1460      Somcol=0
1470      FOR K=1 TO M
1480          IF ABS(An(K)/Hn(1))<Delta THEN Critere(K)=0
1490          Somcol=Somcol+Critere(K)
1500      NEXT K
1510      IF Somcol=0 THEN !...................... Sortie des résultats
1520                 GOSUB Impression
1530                 GOSUB Spectre
1540          FOR K=1 TO M
1550          Fich_angle(K)=Alphai(K)
1560          NEXT K
1570          Enr=M       !.................................... Stockage
1580          SELECT Onde$
1590          CASE "UNI"
1600               IF He(1)=3 THEN Fichier$="FICHUNI_N3"
1610               IF He(1)<>3 THEN Fichier$="FICHUNI_A3"
1620          CASE "BI"
1630               IF He(1)=3 THEN Fichier$="FICHBI_N3"
1640               IF He(1)<>3 THEN Fichier$="FICHBI_A3"
1650          END SELECT
1660          Msi$=":,704,0"
1670          PRINT USING "DD.DDDD,XX";Fich_angle(*)
1680          ASSIGN @Fichier TO Fichier$&Msi$
1690          OUTPUT @Fichier,Enr;Fich_angle(*)
1700                 PAUSE
1710                 END IF
1720      GOTO Part2
1730           !
1740 Impression: !-------------------------------------------------------
1750           !
1760      PRINTER IS Imprimante
1770      PRINT
1780      PRINT "  Neutralisation de ";M;"harmoniques -";
1790      PRINT M;"Impulsions par demi-période"
1800      PRINT "  Critère : rapport An/fond <";Delta*100;"%"
1810      PRINT
1820      PRINT "  Nombre d'itération : ";Iteration
1830      PRINT
1840     FOR K=1 TO M
1850        PRINT USING Image1;"Alpha",K," = ",PROUND(Alphai(K),-3),"°"
1860 Image1:IMAGE 3X,5A,D,3A,X,3D.3D,A
1870     NEXT K
1880     PRINTER IS 1
1890     RETURN
1900         !
1910 Spectre:!----------------------------------------------------------
1920         !
1930        MAT Hn= (0)
1940        PRINTER IS Imprimante
1950        PRINT
1960        PRINT "  SPECTRE HARMONIQUE :"
1970        PRINT
1980  FOR H=1 TO 21 STEP 2        ! Boucle sur les harmoniques
1990          Signe=1
2000      FOR K=1 TO M            ! Boucle sur les M angles
```

```
2010        Signe=-Signe        ! (-1)^K
2020        SELECT Onde$
2030        CASE "BI"
2040             Hn(H)=Hn(H)+Signe*COS(H*Alphai(K))
2050        CASE "UNI"
2060             Hn(H)=Hn(H)-Signe*COS(H*Alphai(K))
2070        END SELECT
2080     NEXT K
2090        SELECT Onde$
2100        CASE "BI"
2110             Hn(H)=(4/(H*PI))*(1+2*Hn(H))
2120        CASE "UNI"
2130             Hn(H)=(4/(H*PI))*Hn(H)
2140        END SELECT
2150 !
2160        Fond=Hn(1)
2170 !
2180 PRINT USING Image2;"An(",H,") = ",PROUND(ABS(Hn(H)),-4)," !  ",ABS(100*PRO
UND(Hn(H)/Fond,-3)),"%"
2190 Image2: IMAGE 6X,3A,2D,4A,3D.4D,4A,2X,3D.2D,A
2200 NEXT H
2210 PRINTER IS 1
2220  RETURN
2230        !
2240 Diverge:!-------------------------------------------------------------
2250        !
2260     BEEP
2270     BEEP
2280     BEEP
2290     DISP "conditions initiales incorrectes, divergence de la recherche"
2300     PAUSE
2310     RETURN
2320 END
```

5 - RESULTATS

Compte tenu des symétries dans les formes d'onde de tension que nous venons de définir, le spectre en fréquence de celles-ci ne contient que les multiples impairs de la fréquence fondamentale. Dans les tableaux ci-dessous, nous proposons quelques valeurs d'angle de commutations, définies sur un quart de période (90°), éliminant une partie de ces harmoniques.

Pour chaque forme d'onde, respectivement bipolaire et unipolaire, nous présentons deux types de résultats ; d'une part la valeur approchée des N angles permettant l'annulation des N premiers harmoniques (tableaux A1.5 et A1.7) et d'autre part, la valeur approchée des N angles assurant l'annulation des N premiers harmoniques de rang non multiple de 3 (tableaux A1.6 et A1.8).

Pour les formes d'onde unipolaire formées de 2N impulsions par demi-période, aucune solution convergente n'a été obtenue avec la méthode proposée ; en effet, ce type d'onde ne permet pas l'annulation simultanée des premières composantes harmoniques indésirables /68/.

	α1	α2	α3	α4	α5	α6	α7
N = 2	23.63	33.31	-----	-----	-----	-----	-----
3	13.99	37.24	42.62	-----	-----	-----	-----
4	15.45	24.32	46.10	49.39	-----	-----	-----
5	10.68	26.33	32.27	52.38	54.52	-----	-----
6	11.50	19.14	34.41	38.58	57.07	58.55	-----
7	8.64	20.38	26.03	40.66	43.68	60.70	61.76

Figure A1.5 : Onde bipolaire (2 niveaux),
Annulation des harmoniques de rang 3, 5, 7, 9, ...

2	16.21	22.02	-----	-----	-----	-----	-----
3	8.75	24.41	27.77	-----	-----	-----	-----
4	10.56	16.10	30.96	32.92	-----	-----	-----
5	6.79	17.29	21.02	34.67	35.99	-----	-----
6	7.81	12.68	23.11	25.65	38.15	39.03	-----
7	5.55	13.42	16.98	26.90	28.77	40.31	40.96

Figure A1.6 : Onde bipolaire (2 niveaux),
Annulation des harmoniques de rang 5, 7, 11, ...

	α1	α2	α3	α4	α5	α6	α7	α8	α9
N = 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	22.72	37.84	46.81	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	18.18	26.65	36.89	52.93	56.70	-----	-----	-----	-----
6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	15.13	20.56	30.51	40.99	46.38	61.10	63.03	-----	-----
8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Figure A1.7 : Onde unipolaire (3 niveaux)
Annulation des harmoniques de rang 3, 5, 7, 9, ...

2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	14.03	24.53	30.31	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	11.34	17.25	23.80	34.89	37.28	-----	-----	-----	-----
6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	9.52	13.35	19.70	27.01	30.41	40.53	41.72	-----	-----
8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	8.24	10.94	16.81	21.82	25.49	32.48	34.49	43.37	44.12

Figure A1.8 : Onde unipolaire (3 niveaux),
Annulation des harmoniques de rang 5, 7, 11, ...

ANNEXE 2 :

PROGRAMME DE SIMULATION DE L'ASSOCIATION : REDRESSEUR SYNCHRONE - ONDULEUR

Débit sur charge R - L - e

```
10 !*****************************************************************
20 !
30 !        ASSOCIATION  REDRESSEUR SYNCHRONE - FILTRE - ONDULEUR
40 !                Structure Monophasée - Monophasée
50 !             Alimentation d'une charge R-L-Em.SIN(O)
60 !
70 !            Source :     PROG  "CASCADFILT"    (V1.0)       14 JANV 87
80 !                         Evolution THESE       (V2.1)        4 JANV 88
90 !            Prog   :     "CASC_THESE"
100!*****************************************************************P-L**
110       DEG
120       OPTION BASE 1
130       Debutprog=TIMEDATE
140          !------------------------------ Input part statements ------
150       DIM Tabli(1440,3)
160       INTEGER Ti1(2),Ti0(2),Di1(2),Di0(2)
170       INTEGER Bi1(2),Bi0(2)            !      Commandes de base
180       INTEGER Bi1k0(2),Bi0k0(2)        !          <<    au pas précédent
190       INTEGER Pgti(2)                  !      Pointeurs de commande
200       INTEGER Pci0,Pci2                !      Pointeurs de classes
210       DIM Aci1(2),Aci0(2)
220       DIM Vdi1(2),Vdi0(2)              !      Tensions VAK des diodes
230       DIM Vi(2)                        !      Tensions et Courants
240       DIM Ii(2)                        !          d'entrée
250       DIM Signi(2)                     !      Signe de Ii
260       INTEGER Si,Ki,Si1,Ki1            !      Indices S,K,S+1,K+1
270       INTEGER Condi
280          !------------------------------ Filter part statements ------
290       DIM Lf1(2,2)
300       DIM Lf2(2,2)
310       DIM Ef(2)
320       DIM Sf(2)
330       DIM Mef(2)
340       DIM Medf(2)
350       DIM Mf1(2)
360       DIM Mf2(2)
370          !------------------------------ Output part statements ------
380       DIM Tablo(1440,3)
390       INTEGER To1(2),To0(2),Do1(2),Do0(2)
400       INTEGER Bo1(2),Bo0(2)            !      Commandes de base
410       INTEGER Bo1k0(2),Bo0k0(2)        !          <<    au pas précédent
420       INTEGER Pgto(2)                  !      Pointeurs de commande
430       INTEGER Pco0,Pco1,Pco2           !      Pointeurs de classes
440       DIM Aco1(2),Aco0(2)
450       DIM Vdo1(2),Vdo0(2)              !      Tensions VAK des diodes
460       DIM Vo(2),Eo(2)                  !      Tensions - Fcem - Courants
470       DIM Io(2),Io0(2)                 !              de sortie
480       INTEGER So,Ko,So1,Ko1            !      Indices S,K,S+1,K+1
490       INTEGER Condo
500          !------------------------------ Common part statements -----
510       DIM V(2)                         !      Tensions appliquées
520                                        !      au filtre d'entrée
530       INTEGER Br,Br1                   !      Indices de bras Br,Br+1
540       INTEGER Chang,Cp,Changcom,Inib_temps
550       INTEGER Somcom                   !      Somme des commandes
560 !
570 !-----------------------------------
580 ! CHOIX DES PARAMETRES DU PROGRAMME
590 !-----------------------------------
600 !       !------------------------------------ (Input part)------------
610 !                                 Caractéristiques de la commande :
620       Retard_red=0
630       Tci=180
640       Dpi(1)=0
650       Dpi(2)=180
660       Udi=0
670       Disp_etati=0                          ! DISP de l'état des composants
680       Disp_condi=0                          ! <<       <<   de la cond.
690       Etati=0
700          !------------------------------- (Filter part)-----
710       Filtre$="ON"
720       Rf=.75
730       Lf=8.E-3
740       Cf=3.E-3
750       !
760       Lf1(1,1)=0
770       Lf1(1,2)=1/Cf
780       Lf1(2,1)=-1/Lf
790       Lf1(2,2)=-Rf/Lf
800       !
810       Lf2(1,1)=0
820       Lf2(1,2)=-1/Cf
830       Lf2(2,1)=1/Lf
840       Lf2(2,2)=0
850          !------------------------------- (Output part)------------
860          !                     Caractéristiques de la commande :
870       Fond=25                           !  Fréquence onduleur
880       Kf=50/Fond                        !  Rapport des fréquences
890       Tco=180*Kf                        !  Temps de conduction
900       Retard_ond=0                      !  Retard de la commande
910                                         !      ( MOD 360°)
920       !                     Caractéristiques électriques :
930       Em=220*SQR(2)                     !  Max de la Fem de sortie
940       Dpo(1)=0
950       Dpo(2)=180
960       !                     Caractéristiques de la charge :
970       R=10                              ! Résistance de la charge
980       L=.05                             ! Inductance   <<    <<
990       W=18000                           ! Pulsation en degrés/S
1000      Disp_etato=0
```

```
1010        Disp_condo=0
1020        Etato=0
1030        !
1040        Uen=220*SQR(2)                    ! Tension maximale d'entrée
1050        Op(1)=0
1060        Op(2)=180
1070        Enr=0
1080        Ind=0
1090 !
1100 !----------------
1110 Initialisation:!-------------------------------------------------
1120 !----------------
1130 !
1140       GOSUB Initgraphique
1150       GOSUB Def_keys
1160       !
1170       P=.2                               ! Pas de calcul
1180       A=-P
1190       Ac=-P
1200       Aond=-P
1210       !
1220          !------------------------------------------ Input part -----
1230       MAT Tabli= (0)
1240       MAT Ii= (0)                        ! Courants d'entrée
1250       MAT Ui= (0)                        ! Tensions    <<
1260       Udi=0                              ! Tension de sortie
1270       Edi=0                              ! Entrée déconnectée
1280       Idi=0                              ! Courant   <<
1290       GOSUB Initcommande1
1300       Pci0=1                             ! Pointeurs de classe
1310       Pci2=1                             !   de commande
1320          !------------------------------------------ Filter part ------
1330       MAT Ef= (0)
1340       MAT Sf= (0)
1350       MAT Mef= (0)                       ! Matrice d'état du filtre
1360       MAT Medf= (0)
1370       MAT Mf1= (0)
1380       MAT Mf2= (0)
1390          !------------------------------------------ Output part ------
1400       MAT Tablo= (0)
1410       Ido=0
1420       MAT Uo= (0)                        ! Tensions de sortie
1430       MAT Eo= (0)                        ! Fcem de la charge
1440       MAT Io= (.01)                      ! Courants de sortie
1450       MAT Io0= (.01)                     !     <<   précédents
1460       Udo=0
1470       GOSUB Initcommande2
1480       Pco0=1                             ! Pointeurs de classes
1490       Pco1=1                             !   de commande
1500       Pco2=1
1510          !----------------------------------------- Common part ------
1520     MAT U= (0)
1530 !
1540 !   Correspondance  notations simulation / notations description fonct. :
1550 !
1560 !     Eiclasse0  Eiclasse2              --> Eiclasse0  Eiclasse2
1570 !     Eic00 Eic0dd                      --> Eic0.1 Eic0.2
1580 !     Tic00 Tic0dd                      --> Tc0_1.2 Tc0_2.1
1590 !     Eic20 Eic2dd Eic2tt               --> Eic2.1 Eic2.2 Eic2.3
1600 !     Tic20 Tic2dd Tic2tt               --> Tc2_1.a Tc2_2.a Tc2_3.a
1610 !     Eoclasse0 Eoclasse1 Eoclasse2     --> Eoclasse0 Eoclasse1 Eoclasse2
1620 !     Eoc00 Eoc0dd                      --> Eoc0.1 Eoc0.2
1630 !     Toc00 Toc0dd                      --> Tc0_1.2 Tc0_2.1
1640 !     Eoc10 Eoc1dd Eoc1td               --> Eoc1.1 Eoc1.2 Eoc1.3
1650 !     Toc10 Toc1dd Toc1td               --> Tc1_1.a Tc1_2.a Tc1_3.a
1660 !     Eoc20 Eoc2dd Eoc2td Eoc2tt        --> Eoc2.1 Eoc2.2 Eoc2.3 Eoc2.4
1670 !     Toc20 Toc2dd Toc2td Toc2tt     --> Tc2_1.a Tc2_2.a Tc2_3.a Tc2_4.a
1680 !
1690 !                                         (a= N° de la place d'arrivée)
1700 !
1710 !--------
1720 Temps! ---------------------------------- Incrémentation du temps --1-
1730 !--------
1740 !
1750      A=A+P
1760      Ac=Ac+P
1770      IF Ac>=360 THEN Ac=0
1780      Aond=Aond+P
1790      IF Aond>=Kf*360 THEN Aond=0
1800      U(1)=Uen*SIN(A+Op(1))
1810      U(2)=Uen*SIN(A+Op(2))
1820        MAT Ui= U
1830        Sf(1)=Udi
1840        Sf(2)=Ido
1850        Mef(1)=Udo
1860        Mef(2)=Idi
1870 !
1880 !""""""""""""""""""""""" ETUDE DU REDRESSEUR SYNCHRONE """"""""""""2""
1890 !
1900 !
1910 !------------------------ 2.1----------- Grafcet de commande ---
1920 !
1930      MAT Bi1k0= Bi1                      ! Mémorisation de la
1940      MAT Bi0k0= Bi0                      ! commande précédente
1950      FOR Br=1 TO 2
1960        Br1=Br MOD 2+1
1970 Commande_red:                     ! Détermination des commandes de base (Bsk)
1980                                   ! pour chaque bras Br
1990   ON Pgti(Br) GOSUB Tigtp0,Tigt1k,Tigt0k,Tigtk
2000        IF NOT Condi THEN Pgti(Br)=1
```

```
2010    ON Pgti(Br) GOSUB Eigtp0,Eigt1k,Eigt0k,Eigtk
2020        IF Chang=1 AND Cp<=1 THEN
2030                                Cp=Cp+1
2040                                GOTO Commande_red
2050                                END IF
2060      NEXT Br
2070      IF Disp_condi THEN DISP "Bi11-Bi01 - Bi12-Bi02: ";Bi1(1);Bi0(1);Bi1(2
);Bi0(2)
2080   !
2090   !------------------------ 2.2 ---- Grafcet de classes de commande ------
2100   !
2110         Changcom=0
2120         Br=0
2130         LOOP !                          Recherche d'un éventuel
2140            Br=Br+1 !                    changement de commande
2150            EXIT IF Changcom=1 OR Br>2
2160            IF Bi1k0(Br)<>Bi1(Br) THEN Changcom=1
2170            IF Bi0k0(Br)<>Bi0(Br) THEN Changcom=1
2180          END LOOP
2190         IF A=0 THEN Changcom=1
2200         Somcom=1+Bi1(1)+Bi1(2)+Bi0(1)+Bi0(2)
2210         IF NOT Changcom THEN Fonctionnement1
2220         IF Somcom>3 OR Somcom=2 THEN Courtcircuit
2230         ON Somcom GOSUB Iiclasse0,Iiclasse1,Iiclasse2
2240   !
2250   !------------------------ 2.3---- Grafcet de fonctionnement ------
2260   !
2270 Fonctionnement1:!
2280         ON Somcom GOSUB Eiclasse0,Eiclasse1,Eiclasse2
2290   !
2300   !"""""""""""""""""""""""""  ETUDE DU FILTRE INTERMEDIAIRE  """""""""""3"""
2310   !
2320   SELECT Filtre$
2330        CASE "OFF"                      !  Sans filtre intermédiaire
2340          Udo=Udi
2350        CASE "ON"
2360        MAT Mf1= Lf1*Mef
2370        MAT Mf2= Lf2*Sf
2380        MAT Medf= Mf1+Mf2
2390        Pond_sec=P/U
2400        MAT Medf= (Pond_sec)*Medf
2410        MAT Mef= Mef+Medf
2420        Udo=Mef(1)
2430        Idi=Mef(2)
2440        END SELECT
2450   !"""""""""""""""""""""""""  ETUDE DE L'ONDULEUR  """""""""""""""""""""""""4"
2460   !
2470   !------------------------ 4.1 -------- Grafcet de commande -----
2480   !
2490       MAT Bo1k0= Bo1                  !        Mémorisation de la
2500       MAT Bo0k0= Bo0                  !             commande
```

```
2510       FOR Br=1 TO 2
2520         Br1=Br MOD 2+1
2530 Commande_ond:!                        ! Détermination  des commandes de
2540                                       ! base (BSK) pour chaque bras Br
2550         ON Pgto(Br) GOSUB Iogtp0,Iogt1k,Iogt0k
2560         IF NOT Condo THEN Pgto(Br)=1 !
2570         ON Pgto(Br) GOSUB Eogtp0,Eogt1k,Eogt0k
2580         IF Chang=1 AND Cp<=1 THEN
2590                                Cp=Cp+1
2600                                GOTO Commande_ond
2610                                END IF
2620       NEXT Br
2630       IF Disp_condo THEN DISP "Bo11-Bo01 - Bo12-Bo02: ";Bo1(1);Bo0(1);Bo1(2
);Bo0(2)
2640 !
2650 !------------------------ 4.2 ---- Grafcet de classes de commande --
2660 !
2670         Changcom=0
2680         Br=0
2690         LOOP !                          Recherche d'un éventuel
2700            Br=Br+1 !                    changement de commande
2710            EXIT IF Changcom=1 OR Br>2
2720            IF Bo1k0(Br)<>Bo1(Br) THEN Changcom=1
2730            IF Bo0k0(Br)<>Bo0(Br) THEN Changcom=1
2740          END LOOP
2750         IF A=0 THEN Changcom=1
2760         Somcom=1+Bo1(1)+Bo1(2)+Bo0(1)+Bo0(2)
2770         IF NOT Changcom THEN Fonctionnement2
2780         IF Somcom>3 THEN Courtcircuit
2790         ON Somcom GOSUB Ioclasse0,Ioclasse1,Ioclasse2
2800 !
2810 !------------------------  4.3---- Grafcet de fonctionnement --
2820 !
2830 Fonctionnement2:!
2840         ON Somcom GOSUB Eoclasse0,Eoclasse1,Eoclasse2
2850 !
2860 !-------------
2870 Exploitation:!-------------------------------------------------------
2880 !-------------
2890 !
2900                                                   ! Courants de sortie
2910     MAT Io0= Io                   !  Mémorisation de la valeur précédante
2920            FOR Br=1 TO 2
2930     Io(Br)=Io0(Br)+P/(L*W)*(Uo(Br)-Eo(Br)-R*Io0(Br))
2940            NEXT Br
2950         Eo(1)=Em*SIN(A-(70+Dpo(1))*Kf)
2960         Eo(2)=Em*SIN(A-(70+Dpo(2))*Kf)
2970     Ido=Signid*Io(Ko)                             ! Courants d'entrée
2980     !
2990     SELECT Filtre$
3000       CASE "OFF"
```

```
3010          Idi=Ido                                  ! Courant de sortie
3020       CASE "OK"
3030          MAT Ii= (Idi)*Signi                      ! Courants d'entrée
3040     END SELECT
3050      !
3060          IF A>=720 AND A<1440 THEN GOSUB Stockpoints
3070      !
3080      Courbes$="FILTER"
3090      SELECT Courbes$
3100         !
3110         CASE "INPUT"
3120            GOSUB Screen1
3130         CASE "OUTPUT"
3140            GOSUB Screen2
3150         CASE "IN_OUTPUT"
3160            GOSUB Screen3
3170         CASE "FILTER"
3180            GOSUB Screen4
3190      END SELECT
3200         !
3210         GOTO Temps
3220         !
3230 !*****************************************************************
3240 !-----------------------------------------------------
3250 ! Structure du graphe de fonctionnement ( input part)
3260 !-----------------------------------------------------
3270 !
3280 Eiclasse0:!                                  AUCUN TRANSISTOR COMMANDE
3290         ON Pci0 GOSUB Tic00,Tic0dd
3300         ON Pci0 GOSUB Eic00,Eic0dd
3310         IF Inib_temps THEN
3320                        Inib_temps=0
3330                        GOTO Eiclasse0
3340                        END IF
3350         RETURN
3360!
3370 Eiclasse2:!                                  2 TRANSISTORS COMMANDES
3380         ON Pci2 GOSUB Tic20,Tic2dd,Tic2tt,Tic2t
3390         ON Pci2 GOSUB Eic20,Eic2dd,Eic2tt,Eic2t
3400         IF Inib_temps THEN
3410                        Inib_temps=0
3420                        GOTO Eiclasse2
3430                        END IF
3440         RETURN
3450 !
3460 !-----------------------------------------------------
3470 ! Structure du graphe de fonctionnement ( output part)
3480 !-----------------------------------------------------
3490 !
3500 Eoclasse0:!                                  AUCUN TRANSISTOR COMMANDE
3510         ON Pco0 GOSUB Toc00,Toc0dd
3520         ON Pco0 GOSUB Eoc00,Eoc0dd
3530         IF Inib_temps THEN
3540                        Inib_temps=0
3550                        GOTO Eoclasse0
3560                        END IF
3570         RETURN
3580!
3590 Eoclasse1:!                                  1 TRANSISTOR COMMANDE
3600         ON Pco1 GOSUB Toc10,Toc1dd,Toc1td
3610         ON Pco1 GOSUB Eoc10,Eoc1dd,Eoc1td
3620         IF Inib_temps THEN
3630                        Inib_temps=0
3640                        GOTO Eoclasse1
3650                        END IF
3660         RETURN
3670!
3680 Eoclasse2:!                                  2 TRANSISTORS COMMANDES
3690         ON Pco2 GOSUB Toc20,Toc2dd,Toc2td,Toc2tt
3700         ON Pco2 GOSUB Eoc20,Eoc2dd,Eoc2td,Eoc2tt
3710         IF Inib_temps THEN
3720                        Inib_temps=0
3730                        GOTO Eoclasse2
3740                        END IF
3750         RETURN
3760 !
3770 !******************** SOUS PROGRAMMES ****************************
3780 !
3790 !--------------------
3800 ! GRAPHE DE COMMANDE
3810 !--------------------
3820 Tigtp0:!
3830    IF Ac>=Dci1(Br) AND Ac<(Dci1(Br)+60 THEN Pgti(Br)=2
3840    IF Ac>=Dci0(Br) AND Ac<(Dci0(Br)+60 THEN Pgti(Br)=3
3850    RETURN
3860 Tigtlk:!
3870    IF Aci1(Br))=Tci-P THEN
3880                        Pgti(Br)=1
3890                        Chang=1
3900                        Cp=0
3910                        END IF
3920    RETURN
3930 TigtOk:!
3940    IF Aci0(Br))=Tci-P THEN
3950                        Pgti(Br)=1
3960                        Chang=1
3970                        Cp=0
3980                        END IF
3990    RETURN
4000 Tigtk:!
```

```
4010    RETURN
4020 !
4030 Eigtp0:!                                   AUCUNE COMMANDE
4040    Aci1(Br)=-P
4050    Aci0(Br)=-P
4060    Bi1(Br)=0
4070    Bi0(Br)=0
4080    RETURN
4090 Eigt1k:!                                   Bi1K -
4100    Aci1(Br)=Aci1(Br)+P
4110    Bi1(Br)=1
4120    Bi0(Br)=0
4130    IF Supbi1k=1 THEN Bi1(Br)=0 !           ANNULATION DES
4140    IF Supbi11=1 THEN Bi1(1)=0 !            COMMANDES DE BASE
4150    IF Supbi12=1 THEN Bi1(2)=0
4160    Chang=0
4170    RETURN
4180 Eigt0k:!                                   Bi0K -
4190    Aci0(Br)=Aci0(Br)+P
4200    Bi1(Br)=0
4210    Bi0(Br)=1
4220    IF Supbi0k=1 THEN Bi0(Br)=0 !           ANNULATION DES
4230    IF Supbi01=1 THEN Bi0(1)=0 !            COMMANDES DE BASE
4240    IF Supbi02=1 THEN Bi0(2)=0
4250    Chang=0
4260    RETURN
4270 Eigtk:!                                    Bi1K - Bi0K
4280    Bi1(Br)=1
4290    Bi0(Br)=1
4300    IF Supbi11=1 THEN Bi1(1)=0              ! ANNULATION DES
4310    IF Supbi01=1 THEN Bi0(1)=0              ! COMMANDES DE BASE
4320    IF Supbi12=1 THEN Bi1(2)=0
4330    IF Supbi02=1 THEN Bi0(2)=0
4340    RETURN
4350 !-----------------------------
4360 ! GRAPHE DE CLASSES DE COMMANDE
4370 !-----------------------------
4380 Ticlasse0:!                                IDENTIFICATION DE LA PAIRE
4390      !                                      DE DIODES CONDUCTRICES
4400       Si=1
4410       Si1=NOT Si
4420       Signe=(2*Si-1)
4430       IF Idi=0 THEN
4440              Pci0=1
4450              RETURN
4460              END IF
4470       IF Idi>0 THEN Pci0=2
4480       RETURN
4490 Ticlasse1:!
4500       GOSUB Courtcircuit
4510       RETURN
4520 Ticlasse2:!                                IDENTIFICATION DE LA PAIRE
4530       !                                     DE TRANSISTORS COMMANDES
4540       Si=1
4550       Si1=NOT Si
4560       Signe=(2*Si-1)
4570       IF Idi=0 THEN
4580              Pci2=1
4590              RETURN
4600              END IF
4610       IF Idi>0 THEN
4620              Pci2=2
4630              RETURN
4640              END IF
4650       FOR Br=1 TO 2
4660       Br1=Br MOD 2+1
4670       IF Idi<0 AND Bi1(Br) AND Bi0(Br1) THEN
4680                                  Pci2=3
4690                                  Ki=Br
4700                                  END IF
4710       IF Idi<0 AND Bi1(Br) AND Bi0(Br) THEN
4720                                  Pci2=4
4730                                  Ki=Br
4740                                  END IF
4750       NEXT Br
4760       RETURN
4770 !-------------------------
4780 ! GRAPHE DE FONCTIONNEMENT
4790 !-------------------------
4800 !---------------------------------------- ETUDE CLASSE 0 -------------
4810 Tic00:                                                  ! [ 0-0 ]
4820    Si=1
4830    FOR Br=1 TO 2
4840      IF (2*Si-1)*Ui(Br)-Udi)=0 THEN                     ! -->Ti1k - Ti0k1
4850                              Pci0=2
4860                              Ki=Br
4870                              END IF
4880    NEXT Br
4890    Ki1=Ki MOD 2+1
4900    Si1=NOT Si
4910    RETURN
4920 TicUdd:!                                                ! [Di1k - Di0k1]
4930    IF Idi<=0 THEN                                       ! --> 0-0
4940              Pci0=1                              ! (Conduction discontinue)
4950              Inib_temps=1
4960              RETURN
4970              END IF
4980    IF (2*Si-1)*Ui(Ki1))=0 AND Idi>0 THEN                ! --> Di1k1-Di0k
4990                              Pci0=2              ! (Conduction continue)
5000                              Ki=Ki1
```

```
5010                            Ki1=Ki MOD 2+1
5020                            END IF
5030     RETURN
5040 !
5050 Eic00: !                                   Aucun élément conducteur [ 0-0]
5060         Udi=Edi
5070         Idi=0
5080     MAT Signi= (0)
5090     IF NOT Etati THEN RETURN
5100     MAT Ti1= (0)
5110     MAT Ti0= (0)
5120     MAT Di1= (0)
5130     MAT Di0= (0)
5140     IF Disp_etati THEN DISP "-00-"
5150     RETURN
5160 Eic0dd:!                                           [ Di1k - Di0k1 ]
5170    Udi=(2*Si-1)*Ui(Ki)
5180    Signi(Ki)=1
5190    Signi(Ki1)=-1
5200     IF NOT Etati THEN RETURN
5210    MAT Ti1= (0)
5220    MAT Ti0= (0)
5230    MAT Di1= (0)
5240    MAT Di0= (0)
5250    IF Si=1 THEN
5260            Di1(Ki)=1
5270            Di0(Ki1)=1
5280            Vdi1(Ki)=0
5290            Vdi0(Ki1)=0
5300            IF Disp_etati THEN DISP "Di1";Ki;"- Di0";Ki1
5310            END IF
5320    IF Si=0 THEN
5330            Di1(Ki1)=1
5340            Di0(Ki)=1
5350            Vdi1(Ki1)=0
5360            Vdi0(Ki)=0
5370            IF Disp_etati THEN DISP "Di1";Ki1;"- Di0";Ki
5380            END IF
5390    RETURN
5400 !
5410 !------------------------------------- ETUDE CLASSE 2 -----[ Bi1k-Bi0k1]
5420 Tic20:!
5430    Si=1
5440    Si1=NOT Si
5450    Signe=(2*Si-1)
5460    FOR Br=1 TO 2
5470      Br1=Br MOD 2+1
5480      IF Signe*Ui(Br)-Udi>=0 THEN                   ! --> Di1k1 - Di0k
5490                            Pci2=2
5500                            Ki=Br
5510                            IF A=0 THEN Ki=1
5520                            END IF
5530      IF Bi1(Br) AND Bi0(Br1) AND Signe*Ui(Br)-Udi<0 THEN   !--> Ti1k-Ti0k1
5540                                                  Pci2=3
5550                                                  Ki=Br
5560                                                  END IF
5570      IF Bi1(Br) AND Bi0(Br) AND Signe*Ui(Br)-Udi<0 AND Signe*Ui(Br1)-Udi<0
THEN
5580                                                  Pci2=4
5590                                                  Ki=Br
5600                                                  END IF
5610   NEXT Br
5620   Ki1=Ki MOD 2+1
5630   RETURN
5640 Tic2dd:!                                                   [ Di1K - Di0K1 ]
5650    Signe=(2*Si-1)
5660    IF Idi>0 AND Signe*Ui(Ki1)>=0 THEN                  ! -> Di1K1 - Di0K
5670                            Pci2=2
5680                            Ki=Ki1
5690                            Ki1=Ki MOD 2+1
5700                            RETURN
5710                            END IF
5720    IF Idi<=0 THEN
5730            IF Bi1(Ki) AND Bi0(Ki1) THEN                ! -> Ti1K - Ti0K1
5740                            Pci2=3
5750                            RETURN
5760                            END IF
5770            IF Ui(Ki1)<0 THEN
5780            IF Bi1(Ki1) AND Bi0(Ki) THEN                ! -> Ti1K1 - Ti0K
5790                            Pci2=3
5800                            Ki=Ki1
5810                            Ki1=Ki MOD 2+1
5820                            RETURN
5830                            END IF
5840            IF Bi1(Ki) AND Bi0(Ki) THEN Pci2=4          ! -> Ti1K  - Ti0K
5850            IF Bi1(Ki1) AND Bi0(Ki1) THEN               ! -> Ti1K1 - Ti0K1
5860                            Ki=Ki1
5870                            Pci2=4
5880                            Ki1=Ki MOD 2+1
5890                            END IF
5900            END IF
5910    END IF
5920    RETURN
5930 Tic2tt:!                                           ! [ Ti1k-Ti0k1 ]
5940    Signe=(2*Si-1)
5950    Ki1=Ki MOD 2+1
5960    IF Idi>=0 THEN                                  ! --> 0-0
5970            Pci2=1                                  ! (Conduction discontinue)
5980            Inib_temps=1
5990            RETURN
6000            END IF
```

```
6010    IF Idi<0 AND Bi1(Ki1) AND Bi0(Ki) AND Signe*Ui(Ki1)<0 THEN
6020                            Pci2=3                  ! --> Ti1k1-Ti0k
6030                            Ki=Ki1              ! (Conduction continue)
6040                            Ki1=Ki MOD 2+1
6050                            END IF
6060    IF Bi1(Ki) AND Bi0(Ki) AND Signe*Ui(Ki1)<0 THEN Pci2=4
6070    IF Bi1(Ki1) AND Bi0(Ki1) AND Signe*Ui(Ki1)<0 THEN
6080                                        Pci2=4
6090                                        Ki=Ki1
6100                                        Ki1=Ki MOD 2+1
6110                                        END IF
6120    RETURN
6130 Tic2t:!
6140    Signe=(2*Si-1)
6150    Ki1=Ki MOD 2+1
6160    IF Idi>=0 THEN
6170            Pci2=1
6180            Inib_temps=1
6190            RETURN
6200            END IF
6210    IF Bi1(Ki) AND Bi0(Ki1) AND Signe*Ui(Ki)<0 THEN Pci2=3
6220    IF Bi1(Ki1) AND Bi0(Ki) AND Signe*Ui(Ki1)<0 THEN
6230                                        Pci2=3
6240                                        Ki=Ki1
6250                                        Ki1=Ki MOD 2+1
6260                                        END IF
6270    RETURN
6280 Eic20:!                                Aucun élément conducteur [ 0-0 ]
6290    Udi=Edi
6300    Idi=0
6310    MAT Signi= (0)
6320     IF NOT Etati THEN RETURN
6330    MAT Ti1= (0)
6340    MAT Ti0= (0)
6350    MAT Di1= (0)
6360    MAT Di0= (0)
6370    IF Disp_etati THEN DISP "-00-"
6380    RETURN
6390 Eic2dd:!                                       [ Di1K - Di0K1 ]
6400    Udi=(2*Si-1)*Ui(Ki)
6410    Signi(Ki)=1
6420    Signi(Ki1)=-1
6430     IF NOT Etati THEN RETURN
6440    MAT Ti1= (0)
6450    MAT Ti0= (0)
6460    MAT Di1= (0)
6470    MAT Di0= (0)
6480    IF Si=1 THEN
6490            Di1(Ki)=1
6500            Di0(Ki1)=1
6510            Vdi1(Ki)=0
6520            Vdi0(Ki1)=0
6530            IF Disp_etati THEN DISP "Di1";Ki;"- Di0";Ki1
6540            RETURN
6550            END IF
6560    IF Si=0 THEN
6570            Di1(Ki1)=1
6580            Di0(Ki)=1
6590            Vdi1(Ki1)=0
6600            Vdi0(Ki)=0
6610            IF Disp_etati THEN DISP "Di1";Ki1;"- Di0";Ki
6620            END IF
6630            RETURN
6640 Eic2tt:!                                       [ Ti1K - Ti0K1 ]
6650    Udi=(2*Si-1)*Ui(Ki)
6660    Signi(Ki)=1
6670    Signi(Ki1)=-1
6680     IF NOT Etati THEN RETURN
6690    MAT Ti1= (0)
6700    MAT Ti0= (0)
6710    MAT Di1= (0)
6720    MAT Di0= (0)
6730    IF Si=1 THEN
6740            Ti1(Ki)=1
6750            Ti0(Ki1)=1
6760            Vdi1(Ki)=0
6770            Vdi0(Ki1)=0
6780            IF Disp_etati THEN DISP "Ti1";Ki;"- Ti0";Ki1
6790            END IF
6800    IF Si=0 THEN
6810            Ti0(Ki)=1
6820            Ti1(Ki1)=1
6830            Vdi0(Ki)=0
6840            Vdi1(Ki1)=0
6850            IF Disp_etati THEN DISP "Ti0";Ki;"- Ti1";Ki1
6860            END IF
6870            RETURN
6880 Eic2t:!                                        ! [ Ti1k-Ti0k ]
6890    Udi=0
6900    MAT Signi= (0)
6910     IF NOT Etati THEN RETURN
6920    MAT Ti1= (0)
6930    MAT Ti0= (0)
6940    MAT Di1= (0)
6950    MAT Di0= (0)
6960    Ti1(Ki)=1
6970    Ti0(Ki)=1
6980    Vdi1(Ki)=0
6990    Vdi0(Ki)=0
7000    IF Disp_etati THEN DISP "Ti1";Ki;" - Ti0";Ki
```

```
7010    RETURN
7020  !--------------------
7030  ! GRAPHE DE COMMANDE-------------------------- OUTPUT PART -------------
7040  !--------------------
7050 Togtp0:!
7060    IF Aond)=Dco1(Br) AND Aond<Dco1(Br)+(60*Kf) THEN Pgto(Br)=2
7070    IF Aond)=Dco0(Br) AND Aond<Dco0(Br)+(60*Kf) THEN Pgto(Br)=3
7080    RETURN
7090 Togt1k:!
7100    IF Aco1(Br))=Tco-P THEN
7110                    Pgto(Br)=1
7120                    Chang=1
7130                    Cp=0
7140                    END IF
7150    RETURN
7160 Togt0k:!
7170    IF Aco0(Br))=Tco-P THEN
7180                    Pgto(Br)=1
7190                    Chang=1
7200                    Cp=0
7210                    END IF
7220    RETURN
7230 !
7240 Eogtp0:!                                          AUCUNE COMMANDE
7250    Aco1(Br)=-P
7260    Aco0(Br)=-P
7270    Bo1(Br)=0
7280    Bo0(Br)=0
7290    RETURN
7300 Eogt1k:!                                          Bo1K -
7310    Aco1(Br)=Aco1(Br)+P
7320    Bo1(Br)=1
7330    Bo0(Br)=0
7340    IF Supbo1k=1 THEN Bo1(Br)=0 !                  ANNULATION DES
7350    IF Supbo11=1 THEN Bo1(1)=0 !                  COMMANDES DE BASE
7360    IF Supbo12=1 THEN Bo1(2)=0
7370    Chang=0
7380    RETURN
7390 Eogt0k:!                                          Bo0K -
7400    Aco0(Br)=Aco0(Br)+P
7410    Bo1(Br)=0
7420    Bo0(Br)=1
7430    IF Supbo0k=1 THEN Bo0(Br)=0 !                  ANNULATION DES
7440    IF Supbo01=1 THEN Bo0(1)=0 !                  COMMANDES DE BASE
7450    IF Supbo02=1 THEN Bo0(2)=0
7460    Chang=0
7470    RETURN
7480  !-----------------------------
7490  ! GRAPHE DE CLASSES DE COMMANDE
7500  !-----------------------------
7510 Toclasse0:!                                       IDENTIFICATION DE LA PAIRE
7520      !                                            DE DIODES CONDUCTRICES
7530       So=1
7540       So1=NOT So
7550       Signe=(2*So-1)
7560       FOR Br=1 TO 2
7570         Br1=Br MOD 2+1
7580         If Signe*Io(Br)=0 AND Signe*Io(Br1)=0 THEN Ko=1
7590         If Signe*Io(Br)<0 AND Signe*Io(Br1)>0 THEN Ko=Br
7600       NEXT Br
7610       So1=NOT So
7620       Ko1=Ko MOD 2+1
7630       IF Io(Ko)=0 AND Io(Ko1)=0 THEN
7640                          Pco0=1
7650                          RETURN
7660                          END IF
7670       IF Signe*Io(Ko)<0 AND Signe*Io(Ko1)>0 THEN Pco0=2
7680       RETURN
7690 Toclasse1:!                                       IDENTIFICATION DU TRANSISTOR
7700      !                                                  COMMANDE
7710      FOR Br=1 TO 2
7720         IF Bo1(Br)=1 THEN
7730                    So=1
7740                    Ko=Br
7750                    END IF
7760         IF Bo0(Br)=1 THEN
7770                    So=0
7780                    Ko=Br
7790                    END IF
7800      NEXT Br
7810         So1=NOT So
7820         Signe=(2*So-1)
7830         Ko1=Ko MOD 2+1
7840         IF Io(Ko)=0 AND Io(Ko1)=0 THEN
7850                          Pco1=1
7860                          RETURN
7870                          END IF
7880         IF Signe*Io(Ko)<0 AND Signe*Io(Ko1)>0 THEN Pco1=2
7890         IF Signe*Io(Ko)>0 AND Signe*Io(Ko1)<0 THEN Pco1=3
7900         RETURN
7910 Toclasse2:!                                       IDENTIFICATION DE LA PAIRE
7920      !                                            DE TRANSISTORS COMMANDES
7930      FOR Br=1 TO 2 !
7940         Br1=Br MOD 2+1
7950         If Bo1(Br) AND Bo0(Br) THEN GOSUB Courtcircuit
7960         If Bo1(Br) AND Bo0(Br1) THEN
7970                          So=1
7980                          Ko=Br
7990                          END IF
8000         If Bo1(Br) AND Bo1(Br1) THEN
```

```
8010                                So=1
8020                                Ko=1
8030                                END IF
8040          IF Bo0(Br) AND Bo0(Br1) THEN
8050                                So=0
8060                                Ko=1
8070                                END IF
8080       NEXT Br
8090          Sol=NOT So
8100          Signe=(2*So-1)
8110          Kol=Ko MOD 2+1
8120          IF Io(Ko)=0 AND Io(Kol)=0 THEN
8130                                 Pco2=1
8140                                 RETURN
8150                                 END IF
8160       IF Bol(Ko) AND Bo0(Kol) THEN
8170          IF Signe*Io(Ko)<0 AND Signe*Io(Kol)>0 THEN Pco2=2
8180          IF Signe*Io(Ko)>0 AND Signe*Io(Kol)<0 THEN Pco2=4
8190          RETURN
8200          END IF
8210       IF (Bol(Ko) AND Bol(Kol)) OR (Bo0(Ko) AND Bo0(Kol)) THEN
8220          IF Signe*Io(Ko)>0 AND Signe*Io(Kol)<0 THEN Ko=Ko
8230          IF Signe*Io(Ko)<0 AND Signe*Io(Kol)>0 THEN Ko=Kol
8240          Kol=Ko MOD 2+1
8250          Pco2=3
8260          END IF
8270          RETURN
8280 !-------------------------
8290 ! GRAPHE DE FONCTIONNEMENT
8300 !-------------------------
8310 !---------------------------------------- ETUDE CLASSE 0 -------------
8320 Toc00:                                          ! [ 0-0 ]
8330    So=1
8340    FOR Br=1 TO 2
8350      IF (2*So-1)*Eo(Br)-Udo)=0 THEN             ! --> Dolk-Do0k1
8360                              Pco0=2
8370                              Ko=Br
8380                              END IF
8390    NEXT Br
8400    Kol=Ko MOD 2+1
8410    Sol=NOT So
8420    RETURN
8430 Toc0dd:!                                        ! [ Dolk-Do0K1 ]
8440    Signe=(2*So-1)
8450    IF Signe*Io(Ko))=0 OR Signe*Io(Kol)<=0 THEN       ! --> 0-0
8460                                 Pco0=1
8470                                 Inib_temps=1
8480                                 END IF
8490    RETURN
8500 !
```

```
8510 Eoc00: !                          Aucun élément conducteur [ 0-0 ]
8520    MAT Uo= Eo
8530    MAT Io= (0)
8540    Signid=0
8550    IF NOT Etato THEN RETURN
8560    MAT Iol= (0)
8570    MAT Io0= (0)
8580    MAT Dol= (0)
8590    MAT Do0= (0)
8600    IF Disp_etato THEN DISP "-00-"
8610    RETURN
8620 Eoc0dd:!                                        [ Dolk - Do0K1 ]
8630   Signe=(2*So-1)
8640   Uo(Ko)=Signe*Udo
8650   Uo(Kol)=-Signe*Udo
8660   Signid=Signe
8670    IF NOT Etato THEN RETURN
8680   MAT Iol= (0)
8690   MAT Io0= (0)
8700   MAT Dol= (0)
8710   MAT Do0= (0)
8720   IF So=1 THEN                                  ! Dolk-Do0k1
8730           Dol(Ko)=1
8740           Do0(Kol)=1
8750           Udol(Ko)=0
8760           Udo0(Kol)=0
8770           IF Disp_etato THEN DISP "Dol";Ko;"- Do0";Kol
8780           END IF
8790   IF So=0 THEN                                  ! Dolk1-Do0k
8800           Dol(Kol)=1
8810           Do0(Ko)=1
8820           Udol(Kol)=0
8830           Udo0(Ko)=0
8840           IF Disp_etato THEN DISP "Dol";Kol;"- Do0";Ko
8850           END IF
8860   RETURN
8870 !
8880 !---------------------------------------- ETUDE CLASSE 1 -------------
8890 Toc10:                                          ! [ 0-0 ]
8900   So=1
8910   Sol=NOT So
8920   Signe=(2*So-1)
8930   Signe1=(2*Sol-1)
8940   FOR Br=1 TO 2
8950     Br1=Br MOD 2+1
8960     IF Signe*Eo(Br)-Udo)=0 THEN                 ! --> Dolk-Do0k1
8970                     Pco1=2
8980                     Ko=Br
8990                     END IF
9000     IF Bol(Br) AND Signe*Eo(Br)-Udo<0 AND Signe*Eo(Br1)-Udo)=0 THEN
```

```
9010                        Pco1=3                      ! --> Tolk-Dolk1
9020                        Ko=Br
9030                        END IF
9040      IF Bo0(Br) AND Signe1*Eo(Br)-Udo(0 AND Signe1*Eo(Br1)-Udo)=0 THEN
9050                        Pco1=3                      ! --> To0k-Do0k1
9060                        Ko=Br
9070                        So=0
9080                        END IF
9090    NEXT Br
9100    Ko1=Ko MOD 2+1
9110    So1=NOT So
9120    RETURN
9130 Tocldd:!                                           ! [ Dolk - Do0k1 ]
9140    Signe=(2*So-1)
9150    IF Signe*Io(Ko))=0 OR Signe*Io(Ko1)(=0 THEN     ! --> 0-0
9160                                Pco1=1
9170                                Inib_temps=1
9180                                END IF
9190    RETURN
9200 Tocltd:!                                           ! [ Tolk - To0k1 ]
9210    Signe=(2*So-1)
9220    IF Signe*Io(Ko)(=0 OR Signe*Io(Ko1))=0 THEN     !  --> 0-0
9230                                Pco1=1
9240                                Inib_temps=1
9250                                END IF
9260    RETURN
9270 Eoc10:!                                Aucun élément conducteur [ 0-0 ]
9280    MAT Uo= Eo
9290    MAT Io= (0)
9300    Signid=0
9310     IF NOT Etato THEN RETURN
9320    MAT Io1= (0)
9330    MAT Io0= (0)
9340    MAT Do1= (0)
9350    MAT Do0= (0)
9360    IF Disp_etato THEN DISP "-00-"
9370    RETURN
9380 Eoc1dd:!                                           [ Do1K - Do0K1 ]
9390    Signe=(2*So-1)
9400    Uo(Ko)=Signe*Udo
9410    Uo(Ko1)=-Signe*Udo
9420    Signid=Signe
9430     IF NOT Etato THEN RETURN
9440    MAT Io1= (0)
9450    MAT Io0= (0)
9460    MAT Do1= (0)
9470    MAT Do0= (0)
9480    IF So=1 THEN                                    ! Do1k - Do0k1
9490            Do1(Ko)=1
9500            Do0(Ko1)=1
9510            Udo1(Ko)=0
9520            Udo0(Ko1)=0
9530            IF Disp_etato THEN DISP "Do1";Ko;"- Do0";Ko1
9540            RETURN
9550            END IF
9560    IF So=0 THEN                                    ! Do0k - Do1k1
9570            Do1(Ko1)=1
9580            Do0(Ko)=1
9590            Udo1(Ko1)=0
9600            Udo0(Ko)=0
9610            IF Disp_etato THEN DISP "Do1";Ko1;"- Do0";Ko
9620            END IF
9630            RETURN
9640 Eoc1td: !                                          [ To1K - Do1K1 ]
9650    MAT Uo= (0)
9660    Signid=0
9670     IF NOT Etato THEN RETURN
9680    MAT Io1= (0)
9690    MAT Io0= (0)
9700    MAT Do1= (0)
9710    MAT Do0= (0)
9720    IF So=1 THEN                                    ! Tolk - Do1k1
9730            Io1(Ko)=1
9740            Do1(Ko1)=1
9750            Udo1(Ko)=0
9760            Udo1(Ko1)=0
9770            IF Disp_etato THEN DISP "To1";Ko;"- Do1";Ko1
9780            END IF
9790    IF So=0 THEN                                    ! To0k - To0k1
9800            Io0(Ko)=1
9810            Do0(Ko1)=1
9820            Udo0(Ko)=0
9830            Udo0(Ko1)=0
9840            IF Disp_etato THEN DISP "To0";Ko;"- Do0";Ko1
9850            END IF
9860    RETURN
9870 !------------------------------------------ ETUDE CLASSE 2 ------------
9880 Toc20:                                             ! [ 0-0 ]
9890    So=1
9900    So1=NOT So
9910    Signe=(2*So-1)
9920    Signe1=(2*So1-1)
9930    FOR Br=1 TO 2
9940      Br1=Br MOD 2+1
9950      IF Bo1(Br) AND Bo0(Br1) AND Signe*Eo(Br)-Udo)=0 THEN
9960                                        Pco2=2   ! --> Do1k-Do0k1
9970                                        Ko=Br
9980                                        END IF
9990      IF Bo1(Br) AND Bo1(Br1) AND Signe*Eo(Br)-Udo(0 AND Signe*Eo(Br1)-Udo)=
0 THEN
10000                                       Pco2=3   ! --> Tolk-Do1k1
```

```
10010                                   Ko=Br
10020                                   END IF
10030     IF Bo0(Br) AND Bo0(Br1) AND Signe1*Eo(Br)-Udo<0 AND Signe1*Eo(Br1)-Udo
>=0 THEN
10040                                   Pco2=3     ! --> To0k-Do0k1
10050                                   Ko=Br
10060                                   So=0
10070                                   END IF
10080     IF Bo1(Br) AND Bo0(Br1) AND Signe*Eo(Br)-Udo<0 THEN
10090                                   Pco2=4     ! --> To1k-To0k1
10100                                   Ko=Br
10110                                   END IF
10120  NEXT Br
10130  Ko1=Ko MOD 2+1
10140  So1=NOT So
10150  Signe=(2*So-1)
10160  RETURN
10170 Toc2dd:!
10180   Signe=(2*So-1)
10190   IF Signe*Io(Ko)>=0 OR Signe*Io(Ko1)<=0 THEN
10200                              Pco2=1            ! --> 0-0
10210                              Inib_temps=1
10220                              END IF
10230   RETURN
10240 Toc2td:!
10250   Signe=(2*So-1)
10260   IF Signe*Io(Ko)<=0 OR Signe*Io(Ko1)>=0 THEN
10270                              Pco2=1            ! --> 0-0
10280                              Inib_temps=1
10290                              END IF
10300   RETURN
10310 Toc2tt:!
10320   Signe=(2*So-1)
10330   IF Signe*Io(Ko)<=0 OR Signe*Io(Ko1)>=0 THEN
10340                              Pco2=1            ! --> 0-0
10350                              Inib_temps=1
10360                              END IF
10370   RETURN
10380 Eoc20:!                       Aucun élément conducteur  [ 0-0 ]
10390   MAT Uo= Eo
10400   MAT Io= (0)
10410   Signid=0
10420    IF NOT Etato THEN RETURN
10430   MAT To1= (0)
10440   MAT To0= (0)
10450   MAT Do1= (0)
10460   MAT Do0= (0)
10470   IF Disp_etato THEN DISP "-00-"
10480   RETURN
10490 Eoc2dd:!                                      [ Do1K - Do0K1 ]
10500   Signe=(2*So-1)
10510   Uo(Ko)=Signe*Udo
10520   Uo(Ko1)=-Signe*Udo
10530   Signid=Signe
10540    IF NOT Etato THEN RETURN
10550   MAT To1= (0)
10560   MAT To0= (0)
10570   MAT Do1= (0)
10580   MAT Do0= (0)
10590   IF So=1 THEN                                    ! Do1k-Do0k1
10600           Do1(Ko)=1
10610           Do0(Ko1)=1
10620           Vdo1(Ko)=0
10630           Vdo0(Ko1)=0
10640           IF Disp_etato THEN DISP "Do1";Ko;"- Do0";Ko1
10650           RETURN
10660           END IF
10670   IF So=0 THEN                                    ! Do1k1-Do0k
10680           Do1(Ko1)=1
10690           Do0(Ko)=1
10700           Vdo1(Ko1)=0
10710           Vdo0(Ko)=0
10720           IF Disp_etato THEN DISP "Do1";Ko1;"- Do0";Ko
10730           END IF
10740           RETURN
10750 Eoc2td:!                                      [ To1K - Do1K1 ]
10760   MAT Uo= (0)
10770   Signid=0
10780    IF NOT Etato THEN RETURN
10790   MAT To1= (0)
10800   MAT To0= (0)
10810   MAT Do1= (0)
10820   MAT Do0= (0)
10830   IF So=1 THEN                                    ! To1k-Do1k1
10840          To1(Ko)=1
10850          Do1(Ko1)=1
10860          Vdo1(Ko)=0
10870          Vdo1(Ko1)=0
10880          IF Disp_etato THEN DISP "To1";Ko;" - Do1";Ko1
10890          RETURN
10900          END IF
10910   IF So=0 THEN                                    ! To0k-Do0k1
10920          To0(Ko)=1
10930          Do0(Ko1)=1
10940          Vdo0(Ko)=0
10950          Vdo0(Ko1)=0
10960          IF Disp_etato THEN DISP "To0";Ko;" - Do0";Ko1
10970          END IF
10980          RETURN
10990 Eoc2tt:!                                      [ To1K - To0K1 ]
11000   Signe=(2*So-1)
```

```
11010   Uo(Ko)=Signe*Udo
11020   Uo(Ko1)=-Signe*Udo
11030   Signid=Signe
11040    IF NOT Etato THEN RETURN
11050   MAT To1= (0)
11060   MAT To0= (0)
11070   MAT Do1= (0)
11080   MAT Do0= (0)
11090   IF So=1 THEN                                  ! To1k-To0k1
11100           To1(Ko)=1
11110           To0(Ko1)=1
11120           Udo1(Ko)=0
11130           Udo0(Ko1)=0
11140           IF Disp_etato THEN DISP "To1";Ko;"- To0";Ko1
11150           END IF
11160   IF So=0 THEN                                  ! To0k-To1k1
11170           To0(Ko)=1
11180           To1(Ko1)=1
11190           Udo0(Ko)=0
11200           Udo1(Ko1)=0
11210           IF Disp_etato THEN DISP "To0";Ko;"- To1";Ko1
11220           END IF
11230           RETURN
11240 !----------------
11250 ! INITIALISATION-----------------------------------------------------
11260 !----------------
11270 Initcommande1:!
11280     MAT Ti1= (0)
11290     MAT Ti0= (0)
11300     MAT Di1= (0)
11310     MAT Di0= (0)
11320     MAT Bi1= (0)
11330     MAT Bi0= (0)
11340     !
11350     Dci1(1)=0
11360     Dci0(1)=180
11370     Dci1(2)=(Dci1(1)+180+Retard_red) MOD 360
11380     Dci0(2)=(Dci0(1)+180+Retard_red) MOD 360
11390     !                                   INITIALISATION DES TEMPS
11400     Aci1(1)=-P !                              DE CONDUCTION
11410     Aci0(1)=180-P
11420     Aci1(2)=180-Retard_red-P
11430     Aci0(2)=-P
11440     !                                   INITIALISATION DES
11450     Pgti(1)=3 !                               POINTEURS
11460     Pgti(2)=2
11470     RETURN
11480 !----------------
11490 ! INITIALISATION-----------------------------------------------------
11500 !----------------
11510 Initcommande2:!
11520     MAT To1= (0)
11530     MAT To0= (0)
11540     MAT Do1= (0)
11550     MAT Do0= (0)
11560     MAT Bo1= (0)
11570     MAT Bo0= (0)
11580     !
11590     !                                   ANGLES DE DEBUT DE CONDUCTION
11600     Dco1(1)=0
11610     Dco0(1)=180*Kf
11620     Dco1(2)=(Dco1(1)+(180+Retard_ond)*Kf) MOD (360*Kf)
11630     Dco0(2)=(Dco0(1)+(180+Retard_ond)*Kf) MOD (360*Kf)
11640     !                                   INITIALISATION DES TEMPS
11650     Aco1(1)=-P !                              DE CONDUCTION
11660     Aco0(1)=(180*Kf)-P
11670     Aco1(2)=(180-Retard_ond)*Kf-P
11680     Aco0(2)=-P
11690     !                                   INITIALISATION DES
11700     Pgto(1)=3 !                               POINTEURS
11710     Pgto(2)=2
11720     RETURN
11730 Courtcircuit:!
11740             BEEP
11750             BEEP
11760             BEEP
11770             DISP "COURT CIRCUIT SUR LE RESEAU"
11780             PAUSE
11790             RETURN
11800 !
11810 !)
11820 !  ) !**************** SOUS PROGRAMMES GRAPHIQUES ********************
11830 !)
11840 !
11850 Initgraphique: !
11860     GINIT
11870     GRAPHICS ON
11880      Pi1=0
11890      DIM Pi2(2),Pi3(2),Pi4(2),Pi5(2)
11900      DIM Pi6(2),Pi7(2),Pi8(2)
11910      MAT Pi2= (0)
11920      MAT Pi3= (0)
11930      MAT Pi4= (0)
11940      MAT Pi5= (0)
11950      MAT Pi6= (0)
11960      MAT Pi7= (0)
11970      MAT Pi8= (0)
11980      Coeffi1=5                        !  Coefficient mult. courant
11990      Ptrace1=720                      !  Période de tracé à l'écran
12000      Echmin1=-500                     !  Echelles mini et maxi
```

```
12010     Echmax1=500
12020     Bigraph=1                          !  Sélection du tracé dans la
12030     Iigraph=0                          !  2nd fenêtre
12040     Digraph=0                          !  Comm. de base,état du trans.
12050     !                                  !  ou des diodes
12060     Po1=0
12070     DIM Po2(2),Po3(2),Po4(2),Po5(2)
12080     DIM Po6(2),Po7(2),Po8(2)
12090     MAT Po2= (0)
12100     MAT Po3= (0)
12110     MAT Po4= (0)
12120     MAT Po5= (0)
12130     MAT Po6= (0)
12140     MAT Po7= (0)
12150     MAT Po8= (0)
12160     Ptrace2=720
12170     Coeffi2=10
12180     Echmin2=-400
12190     Echmax2=400
12200     Bograph=1
12210     Iograph=0
12220     Dograph=0
12230     RETURN
12240        !
12250        !---------------- SCREEN 1 :  Coeffi1.Idi,Udi ------------------
12260        !                            Bisk(Br),Disk(Br),Iisk(Br)
12270           !
12280 Screen_axes1:!
12290           !
12300        GCLEAR
12310        PEN 1
12320        Ai1=A
12330    VIEWPORT 0,190,35,100
12340        WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,Echmin1,Echmax1
12350        AXES 30,Echmax1/20,Ai1,0,6,4
12360    VIEWPORT 0,190,10,30
12370        WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,0,8
12380        AXES 60,2,Ai1,0,6,1
12390        RETURN
12400        !
12410 Screen1:  IF INT(A/Ptrace1)=A/Ptrace1 THEN GOSUB Screen_axes1
12420    VIEWPORT 0,190,35,100
12430        WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,Echmin1,Echmax1
12440        Br=1
12450    PEN 5
12460       MOVE Pi1,Pi6(Br)
12470       Pi6(Br)=Idi*Coeffi1
12480       DRAW A,Pi6(Br)
12490    PEN 2
12500       MOVE Pi1,Pi7(Br)
12510       Pi7(Br)=Udi
12520       DRAW A,Pi7(Br)
12530    VIEWPORT 0,190,10,30
12540       WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,0,8
12550 Conducdiodes_p1: IF Digraph()1 THEN Conductrans_p1
12560       PEN 7
12570       FOR Br=1 TO 2
12580            MOVE Pi1,Pi2(Br)
12590            Pi2(Br)=(10-4*Br)+Di1(Br)/2
12600            DRAW A,Pi2(Br)
12610            MOVE Pi1,Pi3(Br)
12620            Pi3(Br)=(8-4*Br)+Di0(Br)/2
12630            DRAW A,Pi3(Br)
12640       NEXT Br
12650 Conductrans_p1: IF Iigraph()1 THEN Commandbases_p1
12660       PEN 5
12670       FOR Br=1 TO 2
12680            MOVE Pi1,Pi4(Br)
12690            Pi4(Br)=(10-4*Br)+Ii1(Br)
12700            DRAW A,Pi4(Br)
12710            MOVE Pi1,Pi5(Br)
12720            Pi5(Br)=(8-4*Br)+Ii0(Br)
12730            DRAW A,Pi5(Br)
12740       NEXT Br
12750 Commandbases_p1:  IF Bigraph()1 THEN Fingraf_p1
12760       PEN 4
12770       FOR Br=1 TO 2
12780            MOVE Pi1,Pi2(Br)
12790            Pi2(Br)=(10-4*Br)+Bi1(Br)
12800            DRAW A,Pi2(Br)
12810            MOVE Pi1,Pi3(Br)
12820            Pi3(Br)=(8-4*Br)+Bi0(Br)
12830            DRAW A,Pi3(Br)
12840       NEXT Br
12850 Fingraf_p1:     !
12860      Pi1=A
12870      RETURN
12880 !
12890 !------------------------ SCREEN 2 :  Coeffi1.Io(Br),Uo(Br),Eo(Br)------
12900 !                                    Bosk(Br),Dosk(Br),Iosk(br)
12910 Screen_axes2:!
12920       GCLEAR
12930       PEN 1
12940       Ao1=A
12950    VIEWPORT 0,190,35,100
12960       WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,Echmin2,Echmax2
12970       AXES 14.4,Echmax2/20,Ai+Ptrace2/2,0,5,1
12980       GRID 60,125,Ao1+Ptrace2/2,0
12990    VIEWPORT 0,190,10,30
13000       WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,0,8
```

```
13010          AXES 60,2,Ao1,0,6,1
13020          RETURN
13030 Screen2:    IF INT(A/Ptrace2)=A/Ptrace2 THEN GOSUB Screen_axes2
13040     VIEWPORT 0,190,35,100
13050          WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,Echmin2,Echmax2
13060          Br=1
13070     PEN 5
13080        MOVE Po1,Po6(Br)
13090        DRAW A,Io(Br)*Coeffi2
13100        Po6(Br)=Io(Br)*Coeffi2
13110     PEN 2
13120        MOVE Po1,Po7(Br)
13130        DRAW A,Uo(Br)
13140        Po7(Br)=Uo(Br)
13150     PEN 7
13160        MOVE Po1,Po8(Br)
13170        DRAW A,Eo(Br)
13180        Po8(Br)=Eo(Br)
13190   VIEWPORT 0,190,10,30
13200         WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,0,8
13210 Conducdiode_p2:  IF Dograph()1 THEN Conductrans_p2
13220      PEN 7
13230      FOR Br=1 TO 2
13240                MOVE Po1,Po2(Br)
13250                Po2(Br)=(10-4*Br)+Do1(Br)/2
13260                DRAW A,Po2(Br)
13270                MOVE Po1,Po3(Br)
13280                Po3(Br)=(8-4*Br)+Do0(Br)/2
13290                DRAW A,Po3(Br)
13300        NEXT Br
13310 Conductrans_p2:  IF Tograph()1 THEN Commandbases_p2
13320      PEN 5
13330      FOR Br=1 TO 2
13340                MOVE Po1,Po4(Br)
13350                Po4(Br)=(10-4*Br)+To1(Br)
13360                DRAW A,Po4(Br)
13370                MOVE Po1,Po5(Br)
13380                Po5(Br)=(8-4*Br)+To0(Br)
13390                DRAW A,Po5(Br)
13400        NEXT Br
13410 Commandbases_p2: IF Bograph()1 THEN Fingraf_p2
13420      PEN 4
13430      FOR Br=1 TO 2
13440                MOVE Po1,Po2(Br)
13450                Po2(Br)=(10-4*Br)+Bo1(Br)
13460                DRAW A,Po2(Br)
13470                MOVE Po1,Po3(Br)
13480                Po3(Br)=(8-4*Br)+Bo0(Br)
13490                DRAW A,Po3(Br)
13500        NEXT Br
13510 Fingraf_p2:      !
13520       Po1=A
13530       RETURN
13540 !
13550 !------------------------ SCREEN 3 :  Coeffi1.Ii(Br),Udi,Udo -----------
13560 !                                    Coeffi2.Io(Br),Uo(Br),Eo(Br)------
13570 Screen_axes3:!
13580          GCLEAR
13590          PEN 1
13600          Ai1=A
13610     VIEWPORT 0,190,56,100
13620          WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,Echmin1,Echmax1
13630          AXES 30,Echmax1/20,Ai1,0,6,4
13640          GRID 180,Echmax1,Ai1,0
13650            MOVE Ai1,Echmax1-Echmax1/8
13660                 CSIZE 2
13670                 LABEL " REDRESSEUR"
13680            MOVE Ai1+3*Ptrace1/4,Echmax1-Echmax1/5
13690                 CSIZE 3
13700                 PEN 2
13710                 LABEL "  Udi";
13720                 PEN 5
13730                 LABEL Coeffi1;"Ii";
13740                 PEN 7
13750                 LABEL " Udo"
13760                 PEN 1
13770          Ao1=A
13780     VIEWPORT 0,190,10,54
13790          WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,Echmin2,Echmax2
13800          AXES 30,Echmax2/20,Ao1,0,6,4
13810          GRID 180,Echmax2,Ao1,0
13820            MOVE Ao1,Echmax2-Echmax2/8
13830                 CSIZE 2
13840                 LABEL " ONDULEUR  "
13850            MOVE Ao1+3*Ptrace2/4,Echmax2-Echmax2/5
13860                 CSIZE 3
13870                 PEN 2
13880                 LABEL "  Uo";
13890                 PEN 5
13900                 LABEL Coeffi2;"Io";
13910                 PEN 7
13920                 LABEL " Eo"
13930                 PEN 1
13940          RETURN
13950 Screen3:  IF INT(A/Ptrace1)=A/Ptrace1 THEN GOSUB Screen_axes3
13960     VIEWPORT 0,190,56,100
13970          WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,Echmin1,Echmax1
13980     Br=1
13990     PEN 5
14000        MOVE Pi1,Pi6(Br)
```

```
14010         Pi6(Br)=Ii(1)*Coeffi1
14020         DRAW A,Pi6(Br)
14030     PEN 2
14040         MOVE Pi1,Pi7(Br)
14050         Pi7(Br)=Udi
14060         DRAW A,Pi7(Br)
14070     PEN 7
14080         MOVE Pi1,Pi8(Br)
14090         Pi8(Br)=Udo
14100         DRAW A,Pi8(Br)
14110     Pi1=A
14120     VIEWPORT 0,190,10,54
14130          WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,Echmin2,Echmax2
14140     Br=1
14150     PEN 5
14160         MOVE Po1,Po6(Br)
14170         Po6(Br)=Io(Br)*Coeffi2
14180         DRAW A,Po6(Br)
14190     PEN 2
14200         MOVE Po1,Po7(Br)
14210         Po7(Br)=Uo(Br)
14220         DRAW A,Po7(Br)
14230     PEN 7
14240         MOVE Po1,Po8(Br)
14250         Po8(Br)=Eo(Br)
14260         DRAW A,Po8(Br)
14270     Po1=A
14280     RETURN
14290 !
14300 !------------------------- SCREEN 4 :  Coeffi1.Idi,Udi ------------------
14310 !                                     Coeffi2.Ido,Udo ------------------
14320 Screen_axes4:!
14330          GCLEAR
14340          PEN 1
14350          Ai1=A
14360     VIEWPORT 0,190,56,100
14370          WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,Echmin1,Echmax1
14380          AXES 30,Echmax1/20,Ai1,0,6,4
14390          GRID 180,Echmax1,Ai1,0
14400            MOVE Ai1,Echmax1-Echmax1/8
14410                 CSIZE 2
14420                 LABEL " FILTRE - ENTREE"
14430            MOVE Ai1+3*Ptrace1/4,Echmax1-Echmax1/5
14440                 CSIZE 3
14450                 PEN 2
14460                 LABEL "  Udi ";
14470                 PEN 5
14480                 LABEL Coeffi1;"Idi"
14490                 PEN 1
14500          Ao1=A
14510     VIEWPORT 0,190,10,54
14520          WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,Echmin2,Echmax2
14530          AXES 30,Echmax2/20,Ao1,0,6,4
14540          GRID 180,Echmax2,Ao1,0
14550            MOVE Ao1,Echmax2-Echmax2/8
14560                 CSIZE 2
14570                 LABEL " FILTRE - SORTIE"
14580            MOVE Ao1+3*Ptrace2/4,Echmax2-Echmax2/5
14590                 CSIZE 3
14600                 PEN 2
14610                 LABEL "  Udo ";
14620                 PEN 5
14630                 LABEL Coeffi2;"Ido"
14640                 PEN 1
14650          RETURN
14660 Screen4:  IF INT(A/Ptrace1)=A/Ptrace1 THEN GOSUB Screen_axes4
14670     VIEWPORT 0,190,56,100
14680          WINDOW Ai1,Ai1+Ptrace1,Echmin1,Echmax1
14690     Br=1
14700     PEN 5
14710         MOVE Pi1,Pi6(Br)
14720         Pi6(Br)=Idi*Coeffi1
14730         DRAW A,Pi6(Br)
14740     PEN 2
14750         MOVE Pi1,Pi7(Br)
14760         Pi7(Br)=Udi
14770         DRAW A,Pi7(Br)
14780     Pi1=A
14790   VIEWPORT 0,190,10,54
14800          WINDOW Ao1,Ao1+Ptrace2,Echmin2,Echmax2
14810     Br=1
14820     PEN 5
14830         MOVE Po1,Po6(Br)
14840         Po6(Br)=Ido*Coeffi2
14850         DRAW A,Ido*Coeffi2
14860     PEN 2
14870         MOVE Po1,Po7(Br)
14880         Po7(Br)=Udo
14890         DRAW A,Udo
14900     Po1=A
14910     RETURN
14920 !
14930 !****************** SOUS PROGRAMME DE STOCKAGE *********************
14940 !
14950 Stockpoints:!
14960   ! Ind=1+(A-720)/P                        !  Indice de tableau
14970     Ind=Ind+1
14980     !
14990     Motconduci=2*Ii1(1)+4*Ii0(1)+8*Ii1(2)+16*Ii0(2)
15000     Motconduci=32*Di1(1)+64*Di0(1)+128*Di1(2)+256*Di0(2)+Motconduci
```

```
15010     Tabli(Ind,1)=Motconduci
15020     Tabli(Ind,2)=Udi
15030     Tabli(Ind,3)=Idi
15040     !
15050     Motconduco=2*Io1(1)+4*Io0(1)+8*Io1(2)+16*Io0(2)
15060     Motconduco=32*Do1(1)+64*Do0(1)+128*Do1(2)+256*Do0(2)+Motconduco
15070     Tablo(Ind,1)=Motconduco
15080     Tablo(Ind,2)=Uo(1)
15090     Tablo(Ind,3)=Io(1)
15100     IF Ind=1440 THEN
15110        IF Enr+2>10 THEN RETURN
15120        Enr=Enr+1
15130        ASSIGN @Fichier TO "FICHONDU"
15140        OUTPUT @Fichier,Enr;Tabli(*)
15150        PRINT "STOCKAGE DES POINTS :Motconduci,Udi,Idi ";
15160        PRINT "DANS LE FICHIER";Enr
15170        Enr=Enr+1
15180        OUTPUT @Fichier,Enr;Tablo(*)
15190        PRINT "STOCKAGE DES POINTS :Motconduci,Uo(1),Io(1) ";
15200        PRINT "DANS LE FICHIER";Enr
15210        Finprog=TIMEDATE
15220        PRINT "TEMPS DE CALCUL : ";Finprog-Debutprog;" SEC"
15230        PRINT
15240        Debutprog=Finprog
15250        END IF
15260     RETURN
15270 !
15280 !********************** AUTRES SOUS PROGRAMMES ************************
15290 !
15300 Def_keys: !
15310  ! ------- INPUT PART DEF KEYS -------------
15320       Comdi=1                          !     Suppression des commandes
15330       Supbi11=0                        !     de base pour le pont entrée
15340       Supbi01=0
15350       Supbi12=0
15360       Supbi02=0
15370      ON KEY 0 LABEL "SUPTi11" GOSUB Supti11
15380      ON KEY 1 LABEL "SUPTi12" GOSUB Supti12
15390      ON KEY 5 LABEL "SUPTi01" GOSUB Supti01
15400      ON KEY 6 LABEL "SUPTi02" GOSUB Supti02
15410  !
15420  ! ------- OUTPUT PART DEF KEYS -------------
15430       Comdo=1                          !     Suppression des commandes
15440       Supbo11=0                        !     de base pour le pont sortie
15450       Supbo01=0
15460       Supbo12=0
15470       Supbo02=0
15480       !
15490      ON KEY 3 LABEL "SUPTo11" GOSUB Supto11
15500      ON KEY 4 LABEL "SUPTo12" GOSUB Supto12
15510      ON KEY 8 LABEL "SUPTo01" GOSUB Supto01
15520      ON KEY 9 LABEL "SUPTo02" GOSUB Supto02
15530 RETURN
15540 Supti11:!
15550        Supbi11=NOT Supbi11
15560        RETURN
15570 Supti12:!
15580        Supbi12=NOT Supbi12
15590        RETURN
15600 Supti01:!
15610        Supbi01=NOT Supbi01
15620        RETURN
15630 Supti02:!
15640        Supbi02=NOT Supbi02
15650        RETURN
15660 Supto11:!
15670        Supbo11=NOT Supbo11
15680        RETURN
15690 Supto12:!
15700        Supbo12=NOT Supbo12
15710        RETURN
15720 Supto01:!
15730        Supbo01=NOT Supbo01
15740        RETURN
15750 Supto02:!
15760        Supbo02=NOT Supbo02
15770        RETURN
15780 END
```

ANNEXE 3 :

Programmes de

TRAITEMENT DE POINTS (TDP)

et de

TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE (TFR)

1 - POSITION DU PROBLEME

Le choix du pas de calcul dans les simulations numériques de montage d'électronique de puissance s'avère être une étape parfois délicate de la programmation /69/. Ce pas est bien souvent imposé et étroitement lié aux périodes de fonctionnement des montages : redresseur, hacheur, onduleur (au signal porteur par exemple pour un onduleur MLI).

Une représentation correcte de l'association de tel ensemble de conversion voudrait que le pas de calcul soit suffisamment petit, pour assurer une bonne précision dans l'évaluation des intégrales (notamment lorsque l'on emploie la méthode d'Euler) et qu'il soit sous multiple entier de différentes grandeurs (période de hachage, d'échantillonnage...).

Des études antérieures ont, par exemple, montré sur une simulation numérique d'un convertisseur direct /34/, assurant la conversion du réseau triphasé (50Hz) en tension continue, par l'association d'un redresseur (300Hz) et d'un hacheur (2400Hz) fictifs, qu'une définition correcte de la période de découpage ($\frac{360° \times 50Hz}{2400Hz} = 7,5°$) imposait un pas égal à 0,0625° (soit 7,5°/120 points).

L'analyse harmonique des différentes grandeurs, lorsqu'aucune équation analytique n'est connue, fait appel au programme de FFT* qui impose une contrainte supplémentaire sur le pas de calcul. En effet, l'algorithme de FFT ne peut traiter que des fichiers de points en puissance de 2 (... 512, 1024, 2048 points...). Si l'on désigne par Te la période d'étude du signal on a :

$$\boxed{\frac{Te}{Pas} = 2^n} \quad \text{(avec n entier)}$$

Le programmeur se trouve donc confronté à un compromis s'il veut, à la fois, analyser les signaux et assurer une parfaite synchronisation entre ceux-ci. La solution réside dans l'adoption d'un pas très petit qui augmente fortement les temps de simulation.

(*FFT : Fast Fourier Transform ou TFR : Transformée de Fourier rapide)

Toutes ces raisons nous ont conduit à améliorer le programme de FFT développé par B. Seure /70/ en lui adjoignant un programme de traitement de points. Les possibilités du programme sont ainsi étendues à l'analyse harmonique de n'importe quel fichier de points.

2 - PROGRAMME DE TRAITEMENT DE POINTS (T.D.P)

Ce programme transforme le fichier signal de départ contenant Ns points en un fichier compatible avec l'algorithme de FFT c'est à dire contenant 2^M points (M entier).

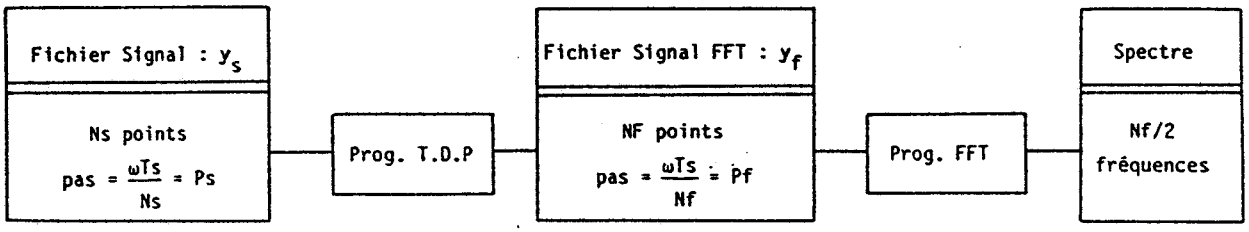


Figure A3.1

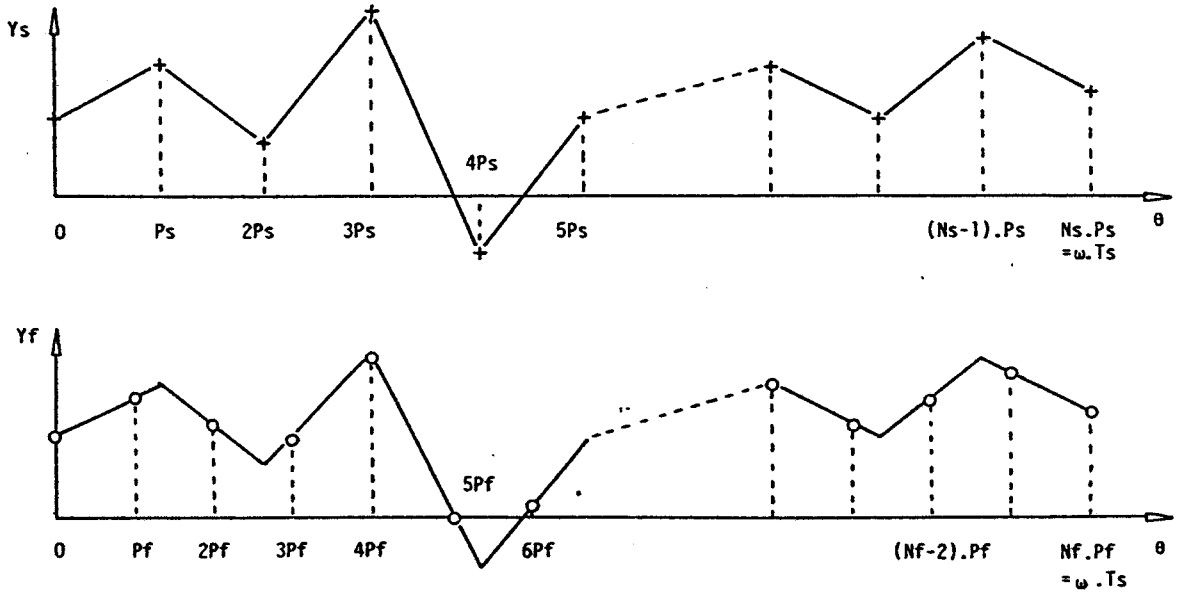


Figure A3.2 : Echantillonnage du signal

Pour cela, on encadre le nombre de points Ns de la façon suivante :

$$2^{M1} < Ns < 2^{M2}$$

$$\swarrow \qquad \downarrow \qquad \searrow$$

$$Pf > Ps \qquad Ps \qquad Pf < Ps$$

d'où $\quad M1 = INT\left(\frac{\log Ns}{\log 2}\right)$ avec INT, la partie entière

$$M2 = M1 + 1$$

Afin de conserver une bonne précision pour définir le signal (au moins égale à celle définie par le pas de calcul Ps) on choisira un pas Pf inférieur à Ps

$$\boxed{Pf <= Ps}$$

soit en posant $M = M_2$ $\quad \boxed{Pf = \frac{\omega Ts}{2^M} = \frac{\omega Ts}{NF}}$

Dans ces conditions, chaque intervalle discrétisé contiendra au minimum un point pour la FFT. Chacun de ces points, d'abscisse Af = k.Pf, est calculé en effectuant une interpolation linéaire entre les points du signal encadrant ce dernier (figure A3.3).

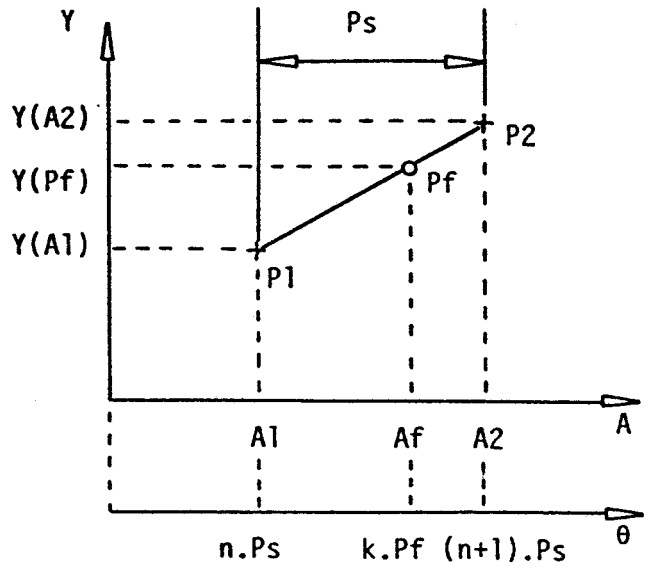


Figure A3.3

Les abscisses respectives de ces points sont :

$A1 = n.Ps$

$A2 = A1 + Ps$

avec $n = INT\ [Af/Ps]$, l'indice du point dans le tableau signal.

La détermination de l'équation du segment de droite étudié [P1, P2] se décompose comme suit :

- pente : $\text{pente } (n + 1) = \dfrac{y(A2) - y(A1)}{Ps} = \dfrac{y(n+1) - y(n)}{Ps}$

- ordonnée, si l'on prend l'origine en A1 : ordonnée $(n+1) = y(A1)$

  ordonnée $(n+1) = y(n)$

L'équation finale s'écrit :

$$y(A) = \text{pente } (n+1).(A-A1) + \text{ordonnée } (n+1) \quad \text{pour } A \in [A1,A2[$$

donc pour le point d'abscisse $A = Af$:

$$\boxed{y(Af) = \frac{y_s(n+1) - y_s(n)}{Ps} \cdot (k.Pf - n.Ps) + y_s(n) = y_f(k)}$$

avec $y_s(n)$: La valeur du signal lue à la ligne n dans le fichier de départ

$y_f(k)$: La valeur du signal reconstitué, stockée à la ligne k du fichier FFT

n : entier $\in \{0,..Ns\}$

k : entier $\in \{0,..Nf\}$

Ps : le pas séparant deux échantillons du fichier de départ

Pf : le pas séparant deux échantilons du fichier FFT.

3 - PROGRAMME DE TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE (T.F.R) /71/ /72/

L'analyse fréquentielle utilise un outil très puissant qui est la transformée de Fourier (T.F) , cette transformation peut être directe, auquel cas elle fournit le spectre d'un signal défini dans le domaine temporel, ou inverse. Elle permet alors de passer du domaine fréquentiel au domaine temporel.

Lorsque le temps est une grandeur continue, ces transformations sont définies par :

- T.F. directe : $X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\, e^{-2\pi jft}\, dt$

- T.F. inverse : $x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)\, e^{+2\pi jft}\, df$

Lorsque le temps est une grandeur continue, ces transformations sont définies par :

$$\begin{array}{lcl} t \rightarrow n.\Delta t & & \\ f \rightarrow k.\Delta f & \int_{-\infty}^{+\infty} & \rightarrow \sum_{0}^{N} \\ x(t) \rightarrow x(n) & & \\ X(f) \rightarrow X(k) & dt \rightarrow \Delta t & \end{array}$$

N représente le nombre d'échantillons et Δt la période d'échantillonnage, T est la durée d'observation encore appelée période spectrale :

$$\boxed{\Delta t = \frac{T}{N} = \frac{1}{N.f}}$$

La transformée de Fourier discréte (T.F.D) s'écrit donc :

- T.F.D directe : $X(k) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\, e^{-j2\pi\frac{nk}{N}}\, \Delta t = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n).W_N^{nk}$ (A3.1)

- T.F.D inverse : $x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)\, e^{j2\pi\frac{nk}{N}}$ (A3.2)

Compte tenu du caractère discret des équations (A3.1) et (A3.2), le traitement des données numériques peut être envoyé directement à partir de celles-ci. Cependant, le calcul complet de la T.F.D requiert environ N^2 opérations /73/. Les algorithmes développés par COOLEY et TURKEY (1965) réduisent ce nombre à $N \log_2(N)$, ce qui diminue considérablement le temps d'exécution; c'est donc ce procédé de calcul qui est retenu.

L'algorithme de la T.F.R sépare la séquence initiale de N points (si N est pair) en deux séquences de N/2 points et réalise deux T.F.R de N/2 points sur ces sous-séquences :

$$X(k) = \frac{1}{N}\left(\sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)\, W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)\, W_N^{(2n+1)k} \right)$$

Les deux transformations discrètes sont alors combinées pour reconstituer la transformée de la séquence originale sur N points. Le nombre d'opérations est égal à $(N/2)^2 + (N/2)^2 = N^2/2$ au lieu de N^2.

On comprend tout de suite que si N/2 est encore pair, on peut réitérer le procédé et réduire le calcul de transformée de N/2 points en deux calculs de transformée de N/4 points. Finalement, si N est une puissance de 2, le processus peut être répété jusqu'à obtenir des calculs de transformée ne portant que sur deux points.

Les détails de calcul de l'algorithme font appel à des notations méthodiques assez complexes que nous n'exposerons pas ici ; le lecteur, s'il le souhaite, pourra se reporter aux références bibliographiques et notamment au livre de LIFERMANN /71/ qui constitue la base de l'élaboration de notre programme.

Le programme est écrit en langage BASIC, le déroulement et l'écriture des lignes de calcul ont été mûrement réfléchis afin d'accroître la rapidité d'éxécution (au détriment de l'accessibilité) sur les calculateurs HP des séries 200/300 /74/ et d'utiliser au mieux les possibilités du compilateur BASIC (Infotek) /75/.

```
10    !*****************************************************************
20    !******** Traitement de points et Transformée de Fourier ***************
30    !                    ++++++ EVOLUTION THESE ++++++
40    !*********** Laboratoire de  Systèmes Electromécaniques ****************
50    !*********************************************************  P-L ****
60    ! FFT_EVOL4_1
70          OPTION BASE 0
80          DEG
90          GRAPHICS OFF
100         PRINTER IS 1
110         PRINT CHR$(12)
120         ALPHA ON
130   !
140   ! ------------------------------------------ ENTREE des DONNEES ----
150   !
160                          !
170                          ! Choix des périphériques
180                          !
190       Imprimante=1
200       DIM Msi$[13],Fichiersi$[10],Fichiertdp$[10],fichierfft$[10]
210       Msi$=":,702,0"
220       Fichiersi$="FICHIERSI"
230       Fichiertdp$="FICHIERTDP"
240       Fichierfft$="FICHIERFFT"
250       RESTORE Couleurs
260 Couleurs:READ Blanc,Rouge,Bleu,Magenta
270          DATA 1,2,5,7
280                          !
290                          ! ( CLAVIER - PROGRAM - TEKTRO - PGCHAIN - DEMO )
300                          !
310                          Entree$="CLAVIER"
320       SELECT Entree$
330           !
340       CASE "CLAVIER"
350    INPUT "Nombre de lignes de la matrice signal (en opt. base 0) ?",Ns
360    INPUT "Nombre de périodes à analyser ?   ",Nt
370    INPUT "Fréquence du signal  (0 pour recherche automatique) ?",Fs
380    INPUT "Pas de calcul (en degrés) ?",Ps
390           !
400       CASE "PROGRAM"
410           RESTORE Read1
420 Read1:    READ Ns,Nt,Fs,Ps
430           DATA
440           !
450       CASE "PGCHAIN"
460           COM Ns,Nt,Fs,Ps
470           !
480       CASE "TEKTRO"
490           RESTORE Read2
500 Read2:    READ Ns,Nt,Fs,Ps
510           DATA 1024,1,50,.36
520       CASE "DEMO"
530           GOSUB Demo
540       CASE ELSE
550           DISP "ERREUR CHOIX ENTREES"
560           PAUSE
570       END SELECT
580                          !
590                          !----- Choix des Sous-Programmes --------
600                          !            Menu=1,2,3,4
610                          !
620 !       Sous-Programmes      ! Menu1 ! Menu2 ! Menu3 ! Menu4 !
630 !  ____________________________________________________________
640 !  - Rappel du signal        !*******!*******!       !       !
650 !  - Tracé du signal         !*******!       !       !       !
660 !  - Traitement de point     !*******!*******!       !       !
670 !  - Stockage du TDP         !*******!       !       !       !
680 !  - Tracé après traitement  !*******!       !       !       !
690 !  - Rappel des pt. du TDP   !       !       !*******!       !
700 !  - calcul de la FFT        !*******!*******!*******!       !
710 !  - Rappel des pt. de FFT   !       !       !       !*******!
720 !  -    Exploitation         !*******!*******!*******!*******!
730 !  - Stockage de la FFT      !*******!       !*******!*******!
740 !
750         Menu=4
760 !
770 !------------------------------------------- DECLARATIONS ------
780 !
790         COM X0(8192),X1(8192)
800         INTEGER Boucle,Colonne,K,J,J1,Puis_de_2
810         INTEGER Nb_pt,Nb_pt_2,Im,Jm,E,Treilli
820      Ts=360      ! ....................... Périodicité du signal (en °)
830      Te=Nt*Ts    ! ........................ Intervalle d'étude (en °)
840  !
850  !------------------------------------ CALCULS PRELIMINAIRES  ------
860  !
870       Ns=DROUND(Ns,5)
880       Nstest=Te/Ps
890       Nstest=DROUND(Nstest,5)
900       IF Ns<>Nstest THEN
910          DISP "Erreur dans les conditions d'accès au programme  "
920          PAUSE
930       END IF
940                          ! ............ Puissance de 2 pour TDP et FFT
950          Puis_de_2=INT(LOG(Ns)/LOG(2))+1
960          Nf=2^Puis_de_2    ! .................. Nb de points pour le TDP
970          Nf2=Nf/2
980          Pas_tdp=Te/Nf     ! ....................... Pas de calcul du TDP
990           IF Puis_de_2>14 THEN
1000             DISP "Dépassement de capacité mémoire"
```

```
1010            PAUSE          ! ...... Attention aux déclarations en INTEGER
1020          END IF
1030         F1=Fs/Nt          ! ........... Fréquence du 1 harmonique calculé
1040          IF Fs=0 THEN
1050                INPUT "Durée du signal à traiter ?",Ds
1060                F1=1/(Ds*Nt)
1070                END IF
1080 !
1090 !------------------------------------ GRANDEURS CARACTERISTIQUES ------
1100 !
1110        PRINTER IS 1
1120        PRINT
1130        PRINT
1140        PRINT " - Pas de calcul du signal   (Degrés)     : ";Ps
1150        PRINT " - Nombre de points constituant le signal : ";Ns
1160        PRINT " - Intervalle d'étude du signal           : ";Te
1170        PRINT
1180        PRINT " - Pas de calcul du TDP      (Degrés)     : ";Pas_tdp
1190        PRINT " - Nombre de points du TDP                : ";Nf
1200        PRINT " - Puissance de 2 pour la FFT             : ";Puis_de_2
1210        PRINT
1220        PRINT " - Incrément fréquentiel                  : ";f1;" Hz"
1230      IF Fs<>0 THEN
1240        PRINT " - Fréquence du signal                    : ";Fs;" Hz"
1250      END IF
1260        PRINT
1270 !
1280 !-------------------------------------------------------------------
1290 !
1300                Debutprog=TIMEDATE
1310                Debuttempo=Debutprog                 ! Top chrono ...
1320                                   ! Attention X0, X1 Déclarées COM
1330                REDIM X0(Nf-1)
1340                MAT X0= (0)
1350                REDIM X1(Nf-1)
1360                MAT X1= (0)
1370        SELECT Menu
1380              CASE 3
1390                  GOSUB Rappeltdp
1400                  GOTO Fft
1410              CASE 4
1420                  REDIM X0(Nf2-1)
1430                  GOSUB Rappelfft
1440                  GOTO Exploitation
1450              CASE ELSE
1460                   ALLOCATE Ap(Ns)
1470                   MAT Ap= (0)
1480                                   ! Transfert du signal dans AP(*)
1490                   GOSUB Rappelsi
1500                   GOSUB Tracesi
1510                                   ! Nb de pt. signal=Nb de pt TDP
1520                     Nf=DROUND(Nf,5)
1530                     Ns=DROUND(Ns,5)
1540                 IF Nf=Ns THEN
1550                 FOR Boucle=0 TO (Ns-1)
1560                     X0(Boucle)=Ap(Boucle)   ! Transfert X0(*)(- AP(*)
1570                 NEXT Boucle
1580                      DEALLOCATE Ap(*)
1590                      GOTO Fft             ! Calcul direct FFT sans TDP
1600                 END IF
1610        END SELECT
1620       !
1630 Tdp:DISP "********** TRAITEMENT DE POINT EN COURS ****************  "
1640       !
1650       !---------- Reconstitution  de la courbe ----------
1660           Ap(Ns)=Ap(0)                 ! Condition de périodicité
1670           Af=-Pas_tdp
1680       FOR Boucle=0 TO Nf-1 STEP 1
1690           Af=Af+Pas_tdp
1700           !---------- Détermination de l'intervalle étudié-----
1710           It=INT(Af/Ps)                !  Indice de tableau
1720           Ai1=It*Ps                    !  Borne inf de l'intervalle
1730           Ai2=Ai1+Ps                   !    <<  sup      <<
1740           !---- Détermination de l'équation du segment étudié----
1750           Pente=(Ap(It+1)-Ap(It))/Ps   !  Pente(It+1) du signal
1760           Ordonnee=Ap(It)              !  Ordonnée au point It*Ps
1770           Y=Pente*(Af-Ai1)+Ordonnee    !  Nouvelle ordonnée après
1780                                        !    conversion du pas
1790           X0(Boucle)=Y                 !  Stockage des résultats du
1800                                        !        TDP dans X0(*)
1810        NEXT Boucle
1820        GOSUB Stockagetdp
1830        GOSUB Tracesitdp
1840        IF Nf<>Ns THEN DEALLOCATE Ap(*)
1850       !
1860 Fft:  ! "**************** CALCUL DE LA FFT **************** "
1870       !
1880         GRAPHICS OFF
1890         ALLOCATE INTEGER Ficha(Nf)
1900         MAT Ficha= (0)
1910                                        ! Etude de la première colonne
1920         Colonne=1
1930         DISP "CALCUL DE FFT : COLONNE";" 1/";Puis_de_2
1940         Nb_pt=1
1950         Nb_pt_2=0
1960         Ficha(0)=0
1970         J1=0
1980         Mult=Nf2
1990         Im=Mult
2000       FOR Boucle=0 TO Im-1
```

```
2010        J=J1+Boucle
2020        Jm=J+Im
2030        !
2040     X0jm=X0(Jm)
2050     X1jm=X1(Jm)
2060     X0j=X0(J)
2070     X1j=X1(J)
2080        !
2090     X0(J)=X0j+X0jm
2100     X0(Jm)=X0j-X0jm
2110     X1(J)=X1j+X1jm
2120     X1(Jm)=X1j-X1jm
2130        !
2140     NEXT Boucle
2150        J1=0
2160        !
2170                                  ! Boucle sur les colonnes
2180     FOR Colonne=2 TO Puis_de_2
2190        DISP "CALCUL DE FFT : COLONNE";Colonne;"/";Puis_de_2
2200                                  ! Calcul des adresses pilotes
2210        Nb_pt_2=Nb_pt
2220        Nb_pt=2*Nb_pt          ! Nb de termes dans l'adresse pilote
2230                               !    = Nb de treillis/colonne
2240        Ficha(Nb_pt_2)=1
2250        Ficha(0)=0
2260     FOR Boucle=1 TO Nb_pt_2-1                        ! Valeur de i
2270                               ! Récurrence pour l'adresse pilote
2280        Ficha(Boucle)=Ficha(Boucle)+Ficha(Boucle)   !  Termes pairs
2290        Ficha(Boucle+Nb_pt_2)=Ficha(Boucle)+1       ! Termes impairs
2300     NEXT Boucle
2310                               !      Calcul de Y aux noeuds puits
2320        J1=0
2330        Mult=.5*Mult           !         Multiplicité des treillis
2340        Im=Mult                !      Conversion de Mult en INTEGER
2350        !
2360        I=0                    !         Etude du premier treillis
2370     FOR Boucle=0 TO Im-1
2380        J=J1+Boucle
2390        Jm=J+Im
2400        !
2410     X0jm=X0(Jm)
2420     X1jm=X1(Jm)
2430     X0j=X0(J)
2440     X1j=X1(J)
2450        !
2460     X0(J)=X0j+X0jm
2470     X0(Jm)=X0j-X0jm
2480     X1(J)=X1j+X1jm
2490     X1(Jm)=X1j-X1jm
2500        !
2510  NEXT Boucle
2520        J1=J1+2*Im
2530        !
2540        Coefwi=360.0*Im/Nf          !    Conversion en nombre réel
2550     FOR Treilli=1 TO Nb_pt-1       !   boucle sur le nb de treillis
2560                                    !     E=A(I)*M Valeur de i et j
2570                                    !        pour le treillis
2580        Wi=Coefwi*ficha(Treilli)
2590        Wec=COS(Wi)                 !         Valeur complexe de WI
2600        Wes=-SIN(Wi)
2610     FOR Boucle=0 TO Im-1           !  Boucle sur les multiplicités
2620                                    ! (à l'intérieur d'un treillis)
2630        J=J1+Boucle            ! Valeur de l'indice dans le treillis
2640        Jm=J+Im
2650        !
2660     X0jm=X0(Jm)
2670     X1jm=X1(Jm)
2680     X0j=X0(J)
2690     X1j=X1(J)
2700        !
2710     Xs=X1jm*Wec+X0jm*Wes
2720     Xd=X0jm*Wec-X1jm*Wes
2730        !
2740     Yec=X0j+Xd
2750     Ydc=X0j-Xd
2760     Yes=X1j+Xs
2770     Yds=X1j-Xs
2780        !
2790     X0(J)=Yec                      !          Parties réelles
2800     X0(Jm)=Ydc
2810     X1(J)=Yes                      !      Parties imaginaires
2820     X1(Jm)=Yds
2830        !
2840     NEXT Boucle
2850        J1=J1+Im+Im
2860     NEXT Treilli
2870        J1=0
2880     NEXT Colonne
2890     !
2900     !------------------------------ DETERMINATION DU SPECTRE ------
2910     !
2920        DISP "  CALCUL DU SPECTRE"
2930     FOR Boucle=0 TO Nf-1
2940        X0i=X0(Boucle)
2950        X1i=X1(Boucle)
2960        Xm=SQR(X0i*X0i+X1i*X1i)     !              Calcul du module
2970        Ym=0 !ATN(X1I /X0I )        !           Calcul de l'argument
2980        X1(Boucle)=Xm
2990        X0(Boucle)=Ym
3000     NEXT Boucle
```

```
3010     FOR K=0 TO Nf2-1                  !      Boucle de désembrouillage
3020          Boucle=Ficha(K)
3030          J=Boucle+Nf2
3040          K2=K+K
3050          X0(Boucle)=X1(K2)
3060          X0(J)=X1(K2+1)
3070      NEXT K
3080          !
3090 Exploitation:! ------------------------------------ EXPLOITATION ------
3100          !
3110          REDIM X1(Nf2-1)
3120          X1(0)=X0(0)/(Nf)
3130          Pre=X1(0)                     !Initialisation du prépondérant
3140          Fpre=0                        !     à la valeur moyenne
3150          Kampmax=2/(Nf)
3160        FOR Boucle=1 TO (Nf2-1)
3170                                        ! Amplitude max des harmoniques
3180          X1(Boucle)=Kampmax*X0(Boucle)
3190              IF X1(Boucle))Pre THEN
3200                          Pre=X1(Boucle)
3210                          Fpre=Boucle*f1
3220                        END IF
3230        NEXT Boucle
3240            IF Fs=0 THEN
3250                      Ffond=Fpre
3260                      Fond=Pre
3270                    ELSE
3280                      Ffond=Fs
3290                      Fond=X1(Ffond/F1)
3300                    END IF
3310          Valmoy=X1(0)
3320      PRINTER IS Imprimante
3330      PRINT " VALEUR MOYENNE        : ";PROUND(Valmoy,-3)
3340      PRINT " FONDAMENTAL    ";Ffond;"Hz : ";PROUND(Fond,-3)
3350      PRINT " PREPONDERANT   ";Fpre;"Hz : ";PROUND(Pre,-3)
3360      PRINT
3370      PRINTER IS 1
3380        Test_ent=0
3390        FOR Boucle=1 TO (Nf2-1)
3400          IF X1(Boucle)).01*Pre THEN GOSUB Impression
3410        NEXT Boucle
3420          !
3430        ! GOSUB Stockagefft
3440          GOSUB Tracefft
3450          Finprog=TIMEDATE
3460          GOSUB Horloge
3470          DISP "FIN"
3480          PAUSE
3490 !
3500 !------------------------------------------ SOUS-PROGRAMMES ------
3510 !
3520 Demo:   !
3530          RESTORE Read3
3540 Read3:   READ Ns,Nt,Fs,Ps
3550          DATA 1000,1,50,.36
3560          DIM Signal(1000)
3570          FOR Int=0 TO 1000
3580              Signal(Int)=10+SIN(Int*Ps)+.5*SIN(3*Int*Ps)
3590          NEXT Int
3600        ! CREATE BDAT Fichiersi$&Msi$,1,1000*8+16
3610          ASSIGN @Fichier TO Fichiersi$&Msi$
3620          OUTPUT @Fichier;Signal(*)
3630 Rappelsi: !                        Rappel du signal à traiter
3640          DISP "RAPPELSI"
3650          ASSIGN @Fichier TO Fichiersi$&Msi$
3660          ENTER @Fichier;Ap(*)
3670          RETURN
3680 Rappeltdp: !                       Rappel du signal traité
3690           DISP "RAPPELTDP"
3700           ASSIGN @Fichier TO Fichiertdp$&Msi$
3710           ENTER @Fichier;X0(*)
3720           RETURN
3730 Rappelfft: !                        Rappel des harmoniques
3740           DISP "RAPPELFFT"
3750           ASSIGN @Fichier TO Fichierfft$&Msi$
3760           ENTER @Fichier;X0(*)
3770           RETURN
3780 Tracesi:   !                       Tracé du signal à traiter
3790          IF Menu<>1 THEN RETURN
3800          DISP "TRACESI"
3810          Simax=MAX(Ap(*))
3820          Simin=MIN(Ap(*))
3830          DISP Simax,Simin
3840          IF Simax*Simin>0 THEN Simin=-Sib
3850          Sib=INT((ABS(Simax)+ABS(Simin))/10)
3860          Ymax=MAX(ABS(Simax),ABS(Simin))
3870          Boucle=-1
3880        REPEAT
3890          Boucle=Boucle+1
3900        UNTIL INT(Ymax/10^Boucle)=0 OR Boucle>3
3910          Yu=10^(Boucle-2)
3920          !
3930          GINIT
3940          GCLEAR
3950          PEN Bleu
3960          VIEWPORT 0,130,10,100
3970          WINDOW 0,Te,Simin-Sib,Simax+Sib
3980          AXES 30,Yu,0,0,6,10
3990          GRAPHICS ON
4000          !
```

```
4010          PEN Blanc
4020        FOR Boucle=0 TO (Ns-1) STEP 3
4030          Xg=Boucle*Ps
4040          Yg=Ap(Boucle)
4050          DRAW Xg,Yg
4060        NEXT Boucle
4070          RETURN
4080 Tracesitdp:   !                    Tracé du signal après le TDP
4090          IF Menu()1 THEN RETURN
4100          DISP "TRACESITDP"
4110          GRAPHICS ON
4120          VIEWPORT 0,130,10,100
4130          WINDOW 0,Te,Simin-Sib,Simax+Sib
4140          MOVE 0,0
4150          PEN Magenta
4160        FOR Boucle=0 TO (Nf-1) STEP 3
4170          Xg=Boucle*Pas_tdp
4180          Yg=X0(Boucle)
4190          DRAW Xg,Yg
4200        NEXT Boucle
4210          RETURN
4220 Stockagetdp: !                     Stockage du signal après le TDP
4230          IF Menu()1 THEN RETURN
4240          DISP "STOCKAGETDP"
4250          PURGE fichiertdp$&Msi$
4260          Dimtdp=8*(Nf-1)+16
4270          CREATE BDAT fichiertdp$&Msi$,1,Dimtdp
4280          ASSIGN @fichier TO fichiertdp$&Msi$
4290          OUTPUT @fichier,1;X0(*)
4300          RETURN
4310 Stockagefft: !
4320          IF Menu=2 THEN RETURN
4330          DISP "STOCKAGEFFT"
4340          ASSIGN @fichier TO fichierfft$&Msi$
4350          OUTPUT @fichier,1;X1(*)
4360          RETURN
4370 Impression: !
4380          DISP "IMPRESSION"
4390          !  Image :  Rang de l'harmonique
4400          !           Fréquence (Hz)
4410          !           Amplitude (Unité signal)
4420          !           Amplitude relative / Fondamental (%)
4430          !           Amplitude relative / Prépondérant(%)
4440     !    ON ERROR GOTO fin_image1
4450          X1_100=100*X1(Boucle)
4460    IF Test_ent=0 THEN
4470    PRINT " Rang    Fréquence    Amplitude    /Fondament.    /Prépond."
4480    END IF
4490    Test_ent=1
4500    PRINT USING Image1;Boucle,Boucle*F1," HZ",X1(Boucle),X1_100/Fond,"%",X1_
100/Pre,"%"
4510 Image1:   IMAGE 4D,4X,5D,2X,3A,5X,DDDD.DDD,6X,DDDD.DD,X,A,4X,DDDD.DD,X,A
4520 Fin_image1:OFF ERROR
4530          RETURN
4540 Tracefft: !
4550          DISP "TRACEFFT"
4560          Cte=100/Pre
4570          MAT X1= (Cte)*X1
4580          GCLEAR
4590          VIEWPORT 0,190,10,100
4600          Nb=30                          ! Nombre d'harmoniques tracés
4610          Nb=MIN(Nb,Nf2-1)
4620          PEN Bleu
4630          WINDOW -4*F1,Nb*F1,0,110
4640          AXES F1,10,0,0
4650          GRAPHICS ON
4660          PEN Magenta
4670        FOR Boucle=1 TO Nb
4680          Yg=X1(Boucle)
4690          IF Yg<Pre/1000 THEN Point_suivant
4700          Xg=Boucle*F1
4710          MOVE Xg,0
4720          DRAW Xg,Yg
4730 Point_suivant: NEXT Boucle
4740          MOVE -2*F1,0
4750          DRAW -2*F1,X1(0)
4760          RETURN
4770 Horloge: !
4780        Prisetempo=TIMEDATE
4790        Tcalcul=Prisetempo-Debuttempo
4800        Minutes=INT(Tcalcul/60)
4810        Secondes=INT((Tcalcul-Minutes*60))
4820        PRINTER IS 1
4830        PRINT
4840        PRINT TAB(10);CHR$(129);
4850        PRINT "- Temps de calcul : ";Minutes;"MN.";Secondes;"S  - ";
4860        PRINT Nf;" Points traités - ";CHR$(128)
4870        PRINT
4880        Debuttempo=Prisetempo
4890        RETURN
4900  END
```

ANNEXE 4 :

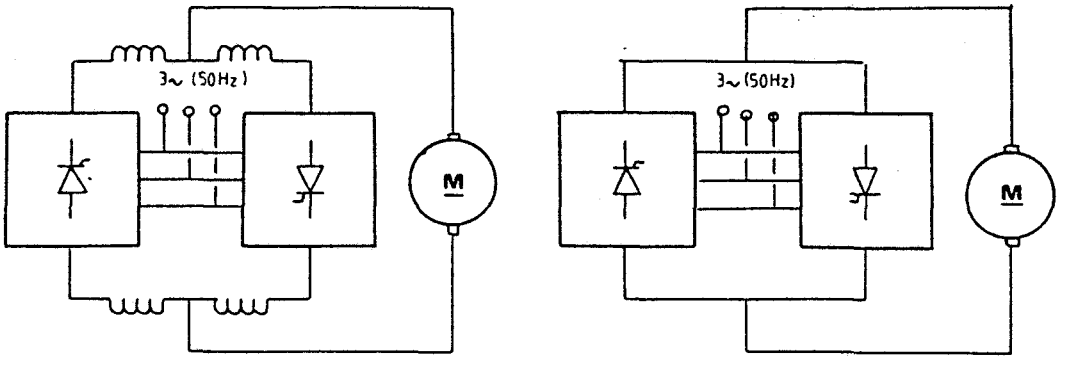
ALIMENTATION REVERSIBLE POUR MOTEUR A COURANT CONTINU.

1 - INTRODUCTION - POSITION DU PROBLEME

La commande par l'induit des moteurs à courant continu, lorsque des inversions de marches rapides ou des freinages contrôlés sont souhaités, est souvent problématique du fait de la non-réversibilité en courant des sources de tension continue utilisées.

Le convertisseur Alternatif-Continu est dans la plupart des cas réalisé par deux groupes redresseurs unidirectionnels à deux quadrants montés tête-bêche. Ces convertisseurs fonctionnent suivant trois principes différents, selon la séquence de contrôle adoptée /76/.
On distingue :

- les montages réversibles à circulation de courant (figure A4.1a),
- les montages réversibles à "bande morte" (figure A4.1b),
- les montages réversibles à logique d'inversion (figure A4.1b).



a- Montage avec courant de circulation b- Montage sans courant de circulation

Figure A4.1 : Schéma synoptique de convertisseurs réversibles quatre quadrants

Dans le premier cas, les deux groupes redresseurs sont commandés en permanence, de sorte que les tensions redressées, issues des deux ponts, soient égales. Les angles de retard à l'amorçage pour chaque pont sont donc "déphasés" symétriquement par rapport à 90° (la somme des deux retards est en permanence égale à 180°).
L'inconvénient de cette structure réside dans la taille des inductances chargées de limiter le courant de circulation entre les deux ponts.

Les montages à "bande morte" fonctionnent sans courant de circulation. La commande des ponts est telle que la tension instantannée

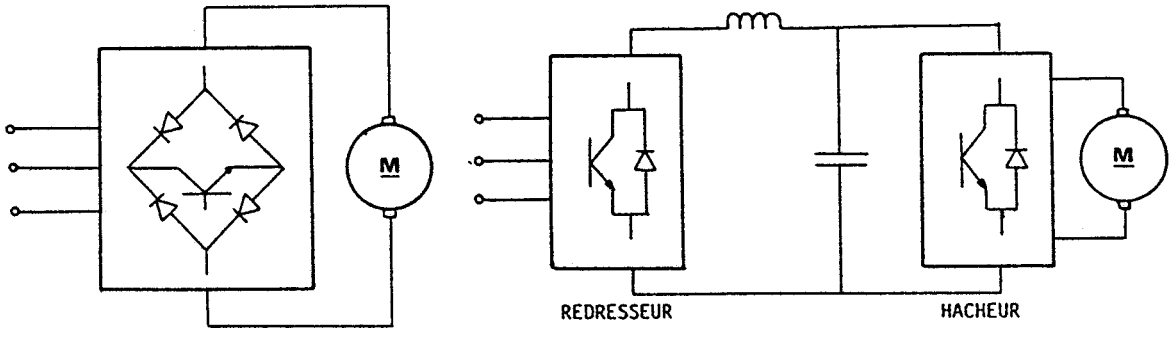
délivrée par le groupe fonctionnant en onduleur soit toujours supérieure à celle du groupe redresseur. La suppression du courant de circulation s'effectue malheureusement au détriment des possibilités dynamiques du système, du fait de la présence d'une bande morte de 10 à 15mS lors de l'inversion du courant.

La dernière solution, consiste à ne commander qu'un seul pont à la fois. De ce fait, à tout instant, un seul groupe est conducteur ; le passage d'un groupe à l'autre s'effectue lors du passage par zéro du courant traversant l'induit du moteur, après une attente de sécurité d'environ 4mS (20mS/6) /10/.

L'obtention de la réversibilité par commutation de montage réduit donc les performances dynamiques de la chaîne de conversion. Lorsque ces performances sont exigées, la conception même de ces systèmes réversibles est à remettre en cause et la recherche de nouvelles structures de conversion s'impose.

2 - SOLUTION PROPOSEE

La solution que nous proposons consiste à remplacer l'association de deux montages unidirectionnels par un seul montage réalisé au moyen d'interrupteurs bidirectionnels. Ces interrupteurs peuvent être totalement contrôlés (figure A4.2a) /77/ /34/, ou partiellement contrôlés (figure A4.2b) auquel cas les fonctions REDRESSEUR et HACHEUR sont disjointes.



a - Interrupteur bidirectionnel totalement contrôlé

b - Interrupteur bidirectionnel partiellement contrôlé

Figure A4.2 : Schéma synoptique de convertisseurs réversibles quatre quadrants à grande dynamique

Pour ces deux montages, la réversibilité en courant est instantannée. Le convertisseur indirect (figure A4.2b) résulte de la mise en cascade du montage redresseur étudié au chapitre 2 et d'un hacheur quatre quadrants qui n'est autre que le montage en pont étudié au chapitre 1. Il présente l'avantage, par rapport au convertisseur direct, d'utiliser des interrupteurs bidirectionnels dont la structure est "minimale" (transistor en antiparallèle sur une diode) ; les commandes des deux convertisseurs sont simples et parfaitement maîtrisées /78/. D'autre part, des composants réactifs intermédiaires de faibles valeurs suffisent pour filtrer efficacement les courants de fréquence élevée générés à l'entrée du hacheur.

3 - CONCLUSION

La structure indirecte, très bièvement présentée ci-dessus, constitue sans aucun doute une alimentation réversible très performante. L'emploi de ce convertisseur dans une chaîne d'asservissement de vitesse ou de position, pour un moteur à courant continu, mériterait une étude plus appronfondie ; soulignons que cette structure a déjà donné lieu à quelques réalisations récentes /79/ /80/.

ANNEXE 5 :

CARACTERISTIQUES GENERALES DU MODULATEUR HEF 4752.

contrôle de moteur

HEF 4752V

Novembre 1981

Le circuit intégré HEF 4752V est un circuit de contrôle de vitesse de moteur asynchrone réalisé en technologie LOCMOS. Le circuit synthétise trois signaux déphasés de 120° dont la tension moyenne varie sinusoïdalement avec le temps dans la bande de fréquence de 0 à 200 Hz. La méthode employée est basée sur le principe de la modulation de la largeur d'impulsion, ce qui permet d'obtenir une précision suffisante sur les tensions de sortie dans toute la bande de fréquence. La génération des signaux est strictement numérique.

Toutes les sorties sont du type push-pull. Les entrées et les sorties sont protégées contre les effets électrostatiques dans toutes sortes de cas d'utilisation des dispositifs. Cependant, pour plus de sécurité, il est recommandé de prendre des précautions d'emploi.

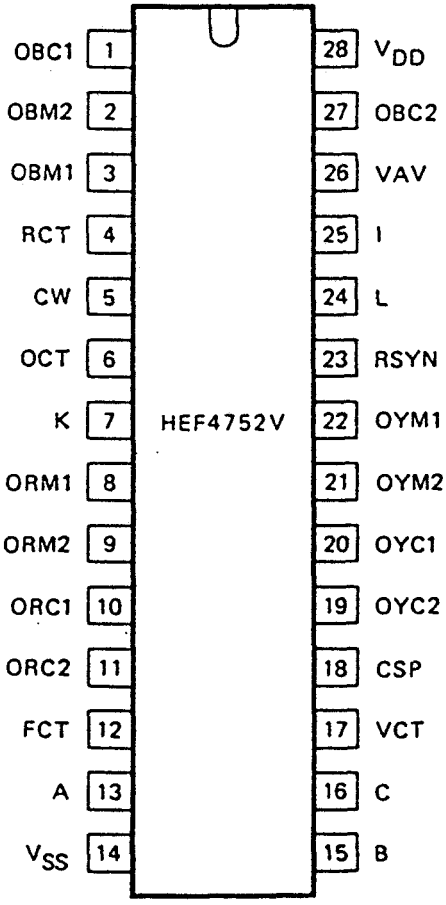


Fig. 1 Brochage.

BROCHAGE

Entrées ; groupe I

24 = L	données	
25 = I	données	
7 = K	données	
5 = CW	données	
13 = A	données	
15 = B	données	
16 = C	données	

Entrées ; groupe II

12 = FCT	horloge de fréquence
17 = VCT	horloge de tension
4 = RCT	horloge de référence
6 = OCT	horloge de retard de sortie

Sorties ; groupe I

23 = RSYN	synchronisation de phase R
26 = VAV	tension moyenne
18 = CSP	impulsions d'échantillonnage de courant

Sorties ; groupe II

8 = ORM1	principal supérieur phase R
9 = ORM2	principal inférieur phase R
10 = ORC1	commutation supérieur phase R
11 = ORC2	commutation inférieur phase R
22 = OYM1	principal supérieur phase Y
21 = OYM2	principal inférieur phase Y
20 = OYC1	commutation supérieur phase Y
19 = OYC2	commutation inférieur phase Y
3 = OBM1	principal supérieur phase B
2 = OBM2	principal inférieur phase B
1 = OBC1	commutation supérieur phase B
27 = OBC2	commutation inférieur phase B

TENSION D'ALIMENTATION

	valeurs limites	gamme de fonctionnement recommandée
HEF 4752V	−0,5 à 18	4,5 à 12,5 V

HEF 4752VP: plastique, DIL 28 broches (SOT-117)
HEF 4752VD: céramique, DIL 28 broches (SOT-135)

CARACTERISTIQUES GENERALES
voir Spécifications générales

CARACTERISTIQUES STATIQUES $V_{SS} = 0$ V

paramètres	V_{DD} (V)	symbole	T_{amb} (°C) −40 min.	−40 max.	+25 min.	+25 max.	+85 min.	+85 max.	unité	conditons
Courant de repos du circuit	5	I_{DD}	–	50	–	50	–	375	μA	toutes les combinaisons d'entrée valides $V_I = V_{SS}$ ou V_{DD}
	10		–	100	–	100	–	750	μA	
Courant de fuite d'entrée	10	$\pm I_{IN}$	–	–	–	0,3	–	1	μA	$V_I = 0$ ou 10 V
Tension d'entrée état HAUT	5	V_{IH}	3,5	–	3,5	–	3,5	–	V	entrées : groupe I
	10		7,0	–	7,0	–	7,0	–	V	
Tension d'entrée état BAS	5	V_{IL}	–	1,5	–	1,5	–	1,5	V	entrées : groupe I
	10		–	3,0	–	3,0	–	3,0	V	
Tension de sortie état HAUT	5	V_{OH}	4,95	–	4,95	–	4,95	–	V	$V_I = V_{SS}$ ou V_{DD}; $\lvert I_O \rvert < 1$ μA
	10		9,95	–	9,95	–	9,95	–	V	
Tension de sortie état BAS	5	V_{OL}	–	0,05	–	0,05	–	0,05	V	$V_I = V_{SS}$ ou V_{DD}; $\lvert I_O \rvert < 1$ μA
	10		–	0,05	–	0,05	–	0,05	V	
Niveau de déclenchement de l'entrée tension d'entrée croissante	5	V_{ti}	1,5	4,0	1,5	4,0	1,5	4,0	V	entrées : groupe II
	10		3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0	V	
Niveau de déclenchement de l'entrée tension d'entrée décroissante	5	V_{td}	1,0	3,5	1,0	3,5	1,0	3,5	V	entrées : groupe II
	10		2,0	7,0	2,0	7,0	2,0	7,0	V	
Courant de sortie état BAS	5	I_{OL}	0,45	–	0,38	–	0,3	–	mA	$V_{OL} = 0,4$ V sorties : groupes I et II
	10		1,4	–	1,17	–	0,9	–	mA	$V_{OL} = 0,5$ V
Courant de sortie état HAUT	5	$-I_{OH}$	0,3	–	0,25	–	0,2	–	mA	$V_{OH} = 4,6$ V sorties : groupe I
	10		0,9	–	0,75	–	0,6	–	mA	$V_{OH} = 9,5$ V
Courant de sortie état HAUT	5	$-I_{OH}$	0,9	–	0,75	–	0,6	–	mA	$V_{OH} = 2,5$ V; sorties : groupe I
Courant de sortie état HAUT	5	$-I_{OH}$	0,6	–	0,5	–	0,4	–	mA	$V_{OH} = 4,6$ V sorties : groupe II
	10		1,8	–	1,5	–	1,2	–	mA	$V_{OH} = 9,5$ V
Courant de sortie état HAUT	5	$-I_{OH}$	1,8	–	1,5	–	1,2	–	mA	$V_{OH} = 2,5$ V; sorties : groupe II
Courant total d'alimentation	10	I_{tot}	–	–	typ. 2		–	–	mA	$I_{OL} = I_{OH} = 0$; fréquence appliquée aux entrées; FCT = 700 kHz; VCT = 400 kHz; RCT = 400 kHz

EXEMPLES D'APPLICATION

La Figure 2 est un schéma fonctionnel d'un système de contrôle de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé utilisant un convertisseur à thyristor avec une sortie de fréquence variable. Les signaux de commande de l'inverseur sont produits par le HEF 4752V (CI PWM). Une des particularités du CI PWM (modulation de largeur d'impulsion) dans ce cas d'application est que le moteur est alimenté par des impulsions modulées de façon sinusoïdale et que, par conséquent, le courant du moteur se rapproche d'une onde sinusoïdale qui présente un minimum sur les harmoniques supérieures. Ceci permet d'obtenir un contrôle de la vitesse.

En outre, le HEF 4752V contient tous les circuits logiques nécessaires à la génération des signaux propres à cette application, ce qui permet de réduire considérablement le nombre de composants du circuit de contrôle. Le système de commande de la vitesse, représenté à la Fig. 2, est contrôlé par la partie contrôle analogique.

Les oscillateurs générateurs d'impulsions d'horloge FCT et VCT permettent de contrôler la vitesse du moteur en fonction des valeurs de référence de la vitesse, de la tension du moteur, du courant du moteur (limité par la masse de ce courant au moyen du transformateur de courant TI) et de la valeur croissante de V_{cb} pendant le freinage.

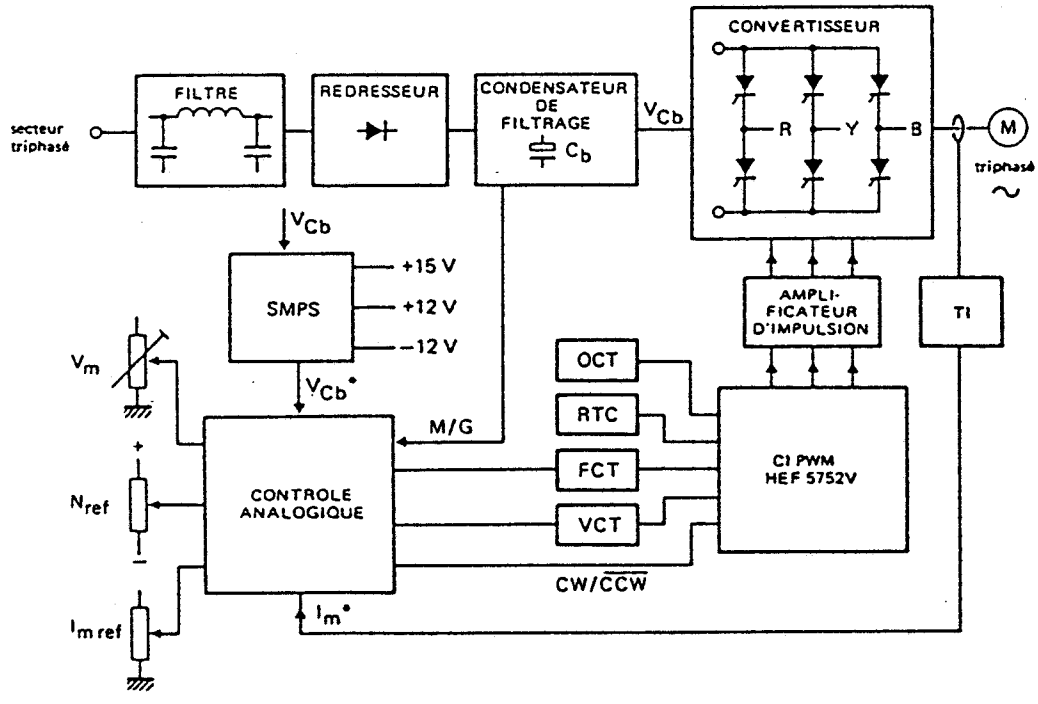


Fig. 2 Système de contrôle de la vitesse du moteur comprenant un dispositif HEF 4752V.

ANNEXE 6 :

PROGRAMME EN LANGAGE ASSEMBLEUR et LOGICIEL DU 8085 (INTEL)

Le programme ci-dessous est le programme source directement écrit au moyen d'un outil de développement SIEMENS (PMS-85D), le programme exécutable par le microprocesseur n'est obtenu qu'aprés assemblage.

```
                ***********************************************************
                *****      PROGRAMME DE COMMANDE DE L'ASSOCIATION      *******
                *****       REDRESSEUR SYNCHRONE - ONDULEUR MLI        *******
                ***********************************************************

                        ASEG
0100                    ORG     100H
0100 F3         RESET:  DI
0101 31FF47             LXI     SP,47FFH        ;  INITIALISATION DU
                                                ;  POINTEUR DE PILE
                                                ;  MASQUER LES INTERRUP RST
0104 3E1F               MVI     A,1FH           ;  000 R7.5 - MSE M7.5 M6.5 M5.5
0106 00                 NOP             ;SIM    ;  000  1     1    1    1    1

                ;***********************************************************
                ;  ADRESSAGE DES DIFFERENTS BOITIERS
                ;***********************************************************

                ;-----------------------------------------
                ;  8255 (PORTS E/S) ADRESSE 3H
                ;-----------------------------------------
                                                ;  8255 NO 0   A3 A2 = 00
0030 =                  PORT0A  EQU     30H     ;  PORT A
0031 =                  PORT0B  EQU     31H     ;  PORT B
0032 =                  PORT0C  EQU     32H     ;  PORT C
0033 =                  PWR0    EQU     33H     ;  CONTROL WORD

                                                ;  8255 NO 1    A3 A2 = 01
0034 =                  PORT1A  EQU     34H     ;  PORT A
0035 =                  PORT1B  EQU     35H     ;  PORT B
0036 =                  PORT1C  EQU     36H     ;  PORT C
0037 =                  PWR1    EQU     37H     ;  CONTROL WORD
                ;-----------------------------------------
                ;  8253-5 (TIMER PROG.) ADRESSE 8H
                ;-----------------------------------------
                                                ;  8253 NO 0
0084 =                  TIM00   EQU     84H     ;  COMPTEUR 00
0085 =                  TIM01   EQU     85H     ;  COMPTEUR 01
0086 =                  TIM02   EQU     86H     ;  COMPTEUR 02
0087 =                  MWR0    EQU     87H     ;  MODE WORD UNIT 0

                                                ;  8253 NO 1
0088 =                  TIM10   EQU     88H     ;  COMPTEUR 10
0089 =                  TIM11   EQU     89H     ;  COMPTEUR 11
008A =                  TIM12   EQU     8AH     ;  COMPTEUR 12
008B =                  MWR1    EQU     8BH     ;  MODE WORD UNIT 1
                ;-----------------------------------------
                ;  8254 (TIMER PROG.)   ADRESSE 01H
                ;-----------------------------------------
                                                ;  CARTE ONDULEUR
0014 =                  TIM20   EQU     14H     ;  COMPTEUR 20
0015 =                  TIM21   EQU     15H     ;  COMPTEUR 21
0016 =                  TIM22   EQU     16H     ;  COMPTEUR 22
0017 =                  MWR2    EQU     17H     ;  MODE WORD UNIT 2
                ;-----------------------------------------
                ;  8259 (UNITE D'INTERRUPTION ADRESSE 8H
                ;-----------------------------------------
                                                ;  BASCULES JK
008E =                  IER0    EQU     8EH     ;  RESET  - ACTIVES
008C =                  IER1    EQU     8CH     ;  REMISE A 1 - INACTIVES

0080 =                  CWRD1   EQU     80H     ;  ICW1, OCW2, OCW3
0081 =                  CWRD2   EQU     81H     ;  ICW2, ICW3, OCW1

0107 C32001             JMP     INIT
```

```
                ;*************************************************
                ;          PROGRAMMATION DES BOITIERS
                ;*************************************************
0120                    ORG     120H
                ;-----------------------------------
                ; PROGRAMMATION DES 8255 (PORTS)
                ;-----------------------------------
0120 3E88       INIT:   MVI     A,88H           ;  PORTS A,B,CL EN SORTIE
0122 D333               OUT     PWR0            ;  PORT CH EN ENTREE
                                                ;  100 D4 - D3 0 D1 D0
                                                ;  100 A  - CH 0 B  CL
                                                ;  INPUT=1 , OUTPUT=0
0124 3E00               MVI     A,00H
0126 D331               OUT     PORT0B          ;  COMD. BASE RED. = 0
0128 00                 NOP
0129 3E07       TESTJK: MVI     A,07H           ;  POSITION. SORTIE JK
012B D330               OUT     PORT0A          ;      CLK/=1
012D 3E05               MVI     A,05H
012F D330               OUT     PORT0A          ;      CLK/=0
0131 3E07               MVI     A,07H
0133 D330               OUT     PORT0A          ;      CLK/=1
0135 00                 NOP
0136 DB32               IN      PORT0C          ;  TEST SORTIE Q/ J-K
0138 E610               ANI     10H             ;     MASQUER LA LECTURE
013A D610               SUI     10H             ;     PORT0C4 = 1 ?
013C CA2901             JZ      TESTJK          ;     SAUT SI Q/=1

013F DB32               IN      PORT0C          ;  LECTURE SENS ROT.
0141 E620               ANI     20H             ;  MASQUAGE
0143 C24B01             JNZ     ROT1            ;  PORT0C5 = ?
0146 3E00       ROT0:   MVI     A,00H           ;  CW=0, SENS HORAIRE
0148 C34D01             JMP     ROTAT
014B 3E08       ROT1:   MVI     A,08H           ;  CW=1, SENS ANTIHORAIRE
014D D332       ROTAT:  OUT     PORT0C

014F 3E89               MVI     A,89H           ;  PORTS A,B EN SORTIE
0151 D337               OUT     PWR1            ;  PORT C EN ENTREE
```

```
                ;-----------------------------
                ;  PROGRAMMATION DES TIMERS
                ;-----------------------------

                                                ;  CPT 00  (DIV. CLK)
0153 3E37               MVI     A,37H           ;      MODE 3
0155 D387               OUT     MWR0
0157 3E20               MVI     A,20H           ;      DIV = 20
0159 D384               OUT     TIM00
015B 3E00               MVI     A,00H
015D D384               OUT     TIM00
015F 00                 NOP                     ;  CPT 01  (DEPH.)
0160 3E7B               MVI     A,7BH           ;      MODE 5
0162 D387               OUT     MWR0
0164 3E15               MVI     A,15H           ;      DIV = 15
0166 D385               OUT     TIM01
0168 3E00               MVI     A,00H
016A D385               OUT     TIM01
016C 00                 NOP                     ;  CPT 02  (SERU.)
016D 3EB5               MVI     A,0B5H          ;      MODE 2
016F D387               OUT     MWR0
0171 00                 NOP                     ;  CPT 10  (DEF. SYNCHRO)
0172 3E3B               MVI     A,3BH           ;      MODE 5
0174 D38B               OUT     MWR1
0176 00                 NOP                     ;  CPT 11  (ECHANT. ACC-DEC)
0177 3E77               MVI     A,77H           ;      MODE 3
0179 D38B               OUT     MWR1
017B 3E00               MVI     A,00H           ;      DIV 3200
017D D389               OUT     TIM11
017F 3E32               MVI     A,32H
0181 D389               OUT     TIM11
0183 00                 NOP                     ;  CPT 12  (FREQ. OND.)
0184 3EB7               MVI     A,0B7H          ;      MODE 3
0186 D38B               OUT     MWR1
0188 3E60               MVI     A,60H           ;      DIV 3360
018A D38A               OUT     TIM12
018C 3E33               MVI     A,33H
018E D38A               OUT     TIM12
0190 00                 NOP                     ;  CPT 20  (VCT)
0191 3E37               MVI     A,37H           ;      MODE 3
0193 D317               OUT     MWR2
0195 3E20               MVI     A,20H           ;      DIV=20
0197 D314               OUT     TIM20           ;      VCT=300KHZ
0199 3E00               MVI     A,00H
019B D314               OUT     TIM20
019D 00                 NOP                     ;  CPT 21  (FCT)
019E 3E77               MVI     A,77H           ;      MODE 3
01A0 D317               OUT     MWR2
01A2 3E09               MVI     A,09H           ;      DIV=609
01A4 D315               OUT     TIM21           ;      FCT=3360*3HZ
01A6 3E06               MVI     A,06H
01A8 D315               OUT     TIM21
01AA 00                 NOP                     ;  CPT 22  (RCT)
01AB 3EB7               MVI     A,0B7H          ;      MODE 3
01AD D317               OUT     MWR2
01AF 3E20               MVI     A,20H           ;      DIV=20
01B1 D316               OUT     TIM22
01B3 3E00               MVI     A,00H
01B5 D316               OUT     TIM22
```

```
                ;-----------------------------------------
                ;  PROGRAMMATION DE L'UNITE D'INTERRUPTION)
                ;-----------------------------------------

                                                ; INIT DES BASCULES J-K
01B7 3E00               MVI     A,00H           ;  RESET => Q/=1
01B9 D38C               OUT     IER1            ;  INTERRUPT. IRL0 IRL1 IRL2 IRL
01BB 3E00               MVI     A,00H           ;  ACTIVES
01BD D38E               OUT     IER0            ;  SET => Q/=0
01BF 00                 NOP
                                                ;  INITALISATION DE L'UNITE
                                                ;  ADRESSE DE IR0 = 240,
01C0 3E52               MVI     A,52H           ;  8 OCT/INTERRUPTION
01C2 D380               OUT     CWRD1           ;  ICW1= A7 A6 0  1 - 0010
                                                ;      = 0  1  0  1 - 0010
01C4 3E02               MVI     A,02H           ;  ICW2= A15 ...     A8
01C6 D381               OUT     CWRD2           ;      = 0000 0010
01C8 00                 NOP
                                                ;  DEMASQUER LES INTERRUPT.
01C9 3EFA               MVI     A,0FAH          ;   IR0 ET IR2
01CB D381               OUT     CWRD2           ;  OCW1= M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1 M0
01CD 00                 NOP                     ;         1  1  1  1  1  0  1  0
                                                ; M=0 : ENABLED ; M=1 : MASKED

01CE C3E001             JMP     PART1
```

```
                ;************************
                ; PROGRAMME PRINCIPAL
                ;************************
01E0                    ORG     1E0H
01E0 0E00       PART1:  MVI     C,00H
01E2 3E0A               MVI     A,0AH           ;  RESET JK IRL0 ET IRL2
01E4 D38C               OUT     IER1            ;
01E6 00                 NOP
01E7 FB                 EI                      ;  AUTORISATION DES INTERRUPT.
01E8 76                 HLT                     ;  ATTENTE 1ER INTERRUP SYNCHRO

01E9 FB                 EI
01EA 3E05       TESTC:  MVI     A,05H
01EC 91                 SUB     C               ;  A <-- (A) - (C)
01ED CAF301             JZ      PART2           ;  SAUT SI 1ER INTERRUP (C=5)
01F0 C3EA01             JMP     TESTC           ;  SINON TESTC

01F3 3E05       PART2:  MVI     A,05H           ;  RESET JK IRL1 ET IRL3
01F5 D38C               OUT     IER1
01F7 3EF0               MVI     A,0F0H          ;  DEMASQUER IRL1 IRL3
01F9 D381               OUT     CWRD2           ;   M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1 M0
                                                ;   1  1  1  1  0  0  0  0
01FB 3E23               MVI     A,23H           ;  LIBERER HEF
01FD D330               OUT     PORT0A

01FF 21FF0F             LXI     H,0FFFH         ;  TEMPO 40 MS
0202 2D         TEMPO1: DCR     L
0203 C20202             JNZ     TEMPO1
0206 25                 DCR     H
0207 C20202             JNZ     TEMPO1
020A 21FF0F             LXI     H,0FFFH
020D 2D         TEMPO2  DCR     L
020E C20D02             JNZ     TEMPO2
0211 25                 DCR     H
0212 C20D02             JNZ     TEMPO2

0215 210012     FINTEM  LXI     H,1200H         ;  INIT REGISTRE HL (3HZ)
0218 3EE0               MVI     A,0E0H          ;  DEMASQUER  IR4
021A D381               OUT     CWRD2           ;     M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1 M0
                                                ;     1  1  1  0  0  0  0  0

021C 3E28               MVI     A,28H           ; LIBERER LATCH BASC.D
021E D330               OUT     PORT0A
0220 00                 NOP
0221 00                 NOP
0222 00                 NOP
0223 00                 NOP

0224 FB         PRGPRI  EI
0225 76                 HLT
0226 C32402             JMP     PRGPRI
```

```
                ;*****************************
                ;  PROGRAMME D'INTERRUPTIONS
                ;*****************************

                                                        ;  ADRESSE DE DEPART DE IR0
0240                    ORG     240H                    ;  8 OCTECTS PAR INTERRUPTIONS
0240 F3         IR0:    DI              ; ARRET D'URGENCE
0241 3E00               MVI     A,00H
0243 D331               OUT     PORT0B                  ; BLOCAGE DES COMD. RED.
0245 C38002             JMP     INTR0

0248                    ORG     248H
0248 F3         IR1:    DI              ; DEFAUT SYNCHRO
0249 3E00               MVI     A,00H
024B D331               OUT     PORT0B
024D C39002             JMP     INTR1

0250                    ORG     250H
0250 F3         IR2:    DI              ; REF. SYNCHRO
0251 F5                 PUSH    PSW             ; SP=SP-1  (SP) <-- (A)
0252 C3A002             JMP     INTR2           ; SP=SP-1  (SP) <-- (INDICATEURS)
0255 00                 NOP
0256 00                 NOP
0257 00                 NOP

0258                    ORG     258H
0258 F3         IR3:    DI              ; IMPULSION SEQUENCEUR
0259 F5                 PUSH    PSW
025A C3E002             JMP     INTR3
025D 00                 NOP
025E 00                 NOP
025F 00                 NOP

0260                    ORG     260H
0260 F5         IR4:    PUSH    PSW     ; ECHANTILLONNAGE ACC-DEC
0261 FB                 EI
0262 C32003             JMP     INTR4
0265 00                 NOP
0266 00                 NOP
0267 00                 NOP
```

```
                ;*****************************************************
                ;  SOUS PROGRAMMES DE TRAITEMENT DES INTERRUPTIONS
                ;*****************************************************
0280                    ORG     280H
0280 3E02       INTR0:  MVI     A,02H           ;  BLOQUER LATCH BASC.D
0282 D330               OUT     PORT0A          ;  ET INHIB HEF
0284 76         FINIR0: HLT                     ;  ATTENTE D'UNE RAZ

0290                    ORG     290H
0290 3E06       INTR1:  MVI     A,06H           ;       <<      <<
0292 D330               OUT     PORT0A
0294 76         FINIR1: HLT

02A0                    ORG     2A0H
02A0 3A0004     INTR2:  LDA     SEQU    ;  LECTURE DU IER MOT DE COMD
02A3 D331               OUT     PORT0B          ;  A <-- (SEQU)

02A5 3E40               MVI     A,40H           ;  DIV TIM10 = 540
02A7 D388               OUT     TIM10           ;  ( 3.43 MS)
02A9 3E05               MVI     A,05H
02AB D388               OUT     TIM10
02AD 3E12               MVI     A,12H           ;  DIV TIM02 = 512
02AF D386               OUT     TIM02           ;   (3.33 MS)
02B1 3E05               MVI     A,05H
02B3 D386               OUT     TIM02

02B5 DB32               IN      PORT0C          ;  LIBERER GATE TIM02
02B7 F602               ORI     02H
02B9 D332               OUT     PORT0C

02BB 110004             LXI     D,0400H         ; DE <-- 0400
02BE 0E05               MVI     C,05H           ; C <-- 05

02C0 3E08       FINIR2: MVI     A,08H           ; RESET JK IRL2
02C2 D38C               OUT     IER1
02C4 3E20               MVI     A,20H           ; FIN D'INTERRUPTION
02C6 D380               OUT     CWRD1
02C8 F1                 POP     PSW
02C9 FB                 EI
02CA C9                 RET

02E0                    ORG     2E0H
02E0 13         INTR3:  INX     D               ;  DE <-- (DE)+1
02E1 1A                 LDAX    D               ;  A <-- ((DE))
02E2 D331               OUT     PORT0B
02E4 0D                 DCR     C               ;  C <-- (C)-1
02E5 C2F602             JNZ     FINIR3
02E8 DB32               IN      PORT0C          ; BLOCAGE GATE TIM02
02EA E6FD               ANI     0FDH
02EC D332               OUT     PORT0C

02EE 3E40               MVI     A,40H           ;  DIV TIM10
02F0 D388               OUT     TIM10
02F2 3E05               MVI     A,05H
02F4 D388               OUT     TIM10

02F6 3E07       FINIR3: MVI     A,07H           ;  RESET JK IRL3
02F8 D38C               OUT     IER1
02FA 3E20               MVI     A,20H
02FC D380               OUT     CWRD1
02FE F1                 POP     PSW
02FF FB                 EI
0300 C9                 RET
```

```
0320                    ORG     320H
0320 DB32       INTR4:  IN      PORT2C
0322 E6C0               ANI     0C0H            ;  A7 A6 00  0000
0324 320047             STA     4700H           ;  SAUVEGARDE EN 4700H
0327 E640       ET1:    ANI     40H             ;  0 A6 00 0000
0329 C24603             JNZ     ET3             ;  SAUT EN ET3 SI A6=1
032C 3A0047     ET2:    LDA     4700H           ;  RAPPEL [4700]
032F E680               ANI     80H             ;  A7 000  0000
0331 CA7503             JZ      FINIR4          ;  SAUT A FINIR4 SI A7=0

0334 7D         ET5:    MOV     A,L             ;------- ACCELERATION --------
0335 FEEC               CPI     0ECH            ;   TEST SI VITESSE MAX,L=ECH
0337 CA4103             JZ      ET8             ;   L=EC
033A D24103             JNC     ET8             ;   L>EC
033D 2C         ET7:    INR     L               ;   L<EC , L <-- (L)+1
033E C36003             JMP     ET11
0341 2EEC       ET8:    MVI     L,0ECH          ;   L>= EC
0343 C36003             JMP     ET11

0346 3A0047     ET3:    LDA     4700H           ;   RAPPEL [4700]
0349 E680               ANI     80H             ;   A7 000  0000
034B C27503             JNZ     FINIR4          ;   SAUT A FINIR4 SI A7=1

034E 7D         ET6:    MOV     A,L             ;---------- DECELERATION ------
034F FE00               CPI     00H             ;   TEST SI VITESSE MINI,L=00H
0351 CA5B03             JZ      ET10            ;   L = 00
0354 DA5B03             JC      ET10            ;   L < 00
0357 2D         ET9:    DCR     L               ;   L > 00, L <-- (L)-1
0358 C36003             JMP     ET11
035B 2E00       ET10:   MVI     L,00H           ;   L <= 00
035D C36003             JMP     ET11

0360 F3         ET11:   DI
0361 2612               MVI     H,12H           ;------ ENVOI DIV. VCT -----
0363 7E                 MOV     A,M             ;  A <-- [ADRESSE HL]
0364 D314               OUT     TIM20
0366 2613               MVI     H,13H
0368 7E                 MOV     A,M             ;  LECTURE TABLE POIDS FORTS
0369 D314               OUT     TIM20

036B 2610               MVI     H,10H           ;----- ENVOI DIV. FCT -------
036D 7E                 MOV     A,M             ; LECTURE TABLE POIDS FAIBLES
036E D315               OUT     TIM21
0370 2611               MVI     H,11H
0372 7E                 MOV     A,M             ; LECTURE TABLE POIDS FORTS
0373 D315               OUT     TIM21

0375 3E20       FINIR4: MVI     A,20H
0377 D380               OUT     CWRD1
0379 F1                 POP     PSW
037A FB                 EI
037B C9                 RET
```

```
                ;-----------------------------------------------------------------
0400                    ORG     400H    ; MOTS DE CMD DU SEQUENCEUR
                ;-----------------------------------------------------------------

0400 84         SEQU:   DB      84H             ;   B13 B02
0401 24                 DB      24H             ;   B11 B02
0402 28                 DB      28H             ;   B11 B03
0403 48                 DB      48H             ;   B12 B03
0404 42                 DB      42H             ;   B12 B01
0405 82                 DB      82H             ;   B13 B01
0406 00                 DB      00H             ;   00
0407 00                 DB      00H
0408 00                 DB      00H
0409 00                 DB      00H
040A 00                 DB      00H
040B 00                 DB      00H
040C 00                 DB      00H
040D 00                 DB      00H
040E 00                 DB      00H
040F 00                 DB      00H

0410                    END
```

Programme de traitement en code exécutable (page 1, 2, 3)

Ligne

0100	F3	31	FF	47	3E	1F	00	C3	20	01	00	00	00	00	00
0110	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0120	3E	88	D3	33	3E	00	D3	31	00	3F	07	D3	30	3E	05
0130	30	3E	07	D3	30	00	D8	32	E6	10	D6	10	CA	29	01
0140	32	E6	20	C2	4B	01	3E	00	C3	4D	01	3E	08	D3	32
0150	89	D3	37	3E	37	D3	87	3E	20	D3	84	3E	00	D3	84
0160	3E	7B	D3	87	3E	15	D3	85	3E	00	D3	85	00	3E	85
0170	87	00	3E	3B	D3	8B	00	3E	77	D3	88	3E	00	D3	89
0180	32	D3	89	00	3E	B7	D3	8B	3E	60	D3	8A	3E	33	D3
0190	00	3E	37	D3	17	3E	20	D3	14	3E	00	D3	14	00	3E
01A0	D3	17	3E	09	D3	15	3E	06	D3	15	00	3E	B7	D3	17
01B0	20	D3	16	3E	00	D3	16	3E	00	D3	8C	3E	00	D3	8E
01C0	3E	52	D3	80	3E	02	D3	81	00	3E	FA	D3	81	00	C3
01D0	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
01E0	0E	06	3E	0A	D3	8C	00	FB	76	FB	3E	05	91	CA	F3
01F0	C3	EA	01	3E	05	D3	8C	3E	F0	D3	81	3E	23	D3	39
0200	FF	0F	2D	C2	02	02	25	C2	02	02	21	FF	0F	2D	C2
0210	02	25	C2	0D	02	21	00	12	3E	E0	D3	81	3E	28	D3
0220	00	00	00	00	FB	76	C3	24	02	00	00	00	00	00	00
0230	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0240	F3	3E	00	D3	31	C3	80	02	F3	3E	00	D3	31	C3	90
0250	F3	F5	C3	A0	02	00	00	00	F3	F5	C3	E0	02	00	00
0260	F5	FB	C3	20	03	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0270	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0280	3E	02	D3	30	76	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0290	3E	06	D3	30	76	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
02A0	3A	00	04	D3	31	3E	40	D3	88	3E	05	D3	88	3E	12
02B0	86	3E	05	D3	86	DB	32	F6	02	D3	32	11	00	04	0E
02C0	3E	08	D3	8C	3E	20	D3	80	F1	FB	C9	00	00	00	00
02D0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
02E0	13	1A	D3	31	00	C2	F6	02	DB	32	E6	F0	D3	32	3E
02F0	D3	88	3E	05	D3	88	3E	07	D3	8C	3E	20	D3	80	F1
0300	C9	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0310	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0320	DB	32	E6	C0	32	00	47	E6	40	C2	46	03	3A	00	47
0330	80	CA	75	03	7D	FE	EC	CA	41	03	D2	41	03	2C	C3
0340	03	2E	EC	C3	60	03	3A	00	47	E6	80	C2	75	03	70
0350	00	CA	5B	03	DA	5B	03	2D	C3	60	03	2E	00	C3	60
0360	F3	26	12	7E	D3	14	26	13	7E	D3	14	26	10	7E	D3
0370	26	11	7E	D3	15	3E	20	D3	80	F1	FB	C9	00	00	00
0380	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
0390	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
03A0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
03B0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
03C0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
03D0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
03E0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
03F0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

Table de séquencement pour le redresseur (6 mots en page 4)

0400	84	24	28	48	42	82	00	00	00	00	00	00	00	00	00

LOGICIEL DU 8080 A OU DU 8085 A DE INTEL

LOGICIEL DU 8080 A OU 8085 A INTEL

INST.	HEXA.	INST.	HEXA.	INST.	HEXA.	INST.	HEXA.
ACI	CE	DCR L	2D	MOV C,M	4E	POP D	D1
ADC A	8F	DCR M	35	MOV D,A	57	POP H	E1
ADC B	88	DCX B	0B	MOV D,B	50	POP PSW	F1
ADC C	89	DCX D	1B	MOV D,C	51	PUSH B	C5
ADC D	8A	DCX H	2B	MOV D,D	52	PUSH D	D5
ADC E	8B	DCX SP	3B	MOV D,E	53	PUSH H	E5
ADC H	8C	DI	F3	MOV D,H	54	PUSH PSW	F5
ADC L	8D	EI	FB	MOV D,M	56	RAL	17
ADC M	8E	HLT	76	MOV E,A	5F	RAR	1F
ADD A	87	IN	DB	MOV E,B	58	RC	D8
ADD B	80	INR A	3C	MOV E,C	59	RET	C9
ADD C	81	INR B	04	MOV E,D	5A	RLC	07
ADD D	82	INR C	0C	MOV E,E	5B	RM	F8
ADD E	83	INR D	14	MOV E,H	5C	RNC	D0
ADD H	84	INR E	1C	MOV E,L	5D	RNZ	C0
ADD L	85	INR H	24	MOV E,M	5E	RP	F0
ADD M	86	INR L	2C	MOV H,A	67	RPE	E8
ADI	C6	INR M	34	MOV H,B	60	RPO	E0
ANA A	A7	INX B	03	MOV H,C	61	RRC	0F
ANA B	A0	INX D	13	MOV H,D	62	RST 0	C7
ANA C	A1	INX H	23	MOV H,E	63	RST 1	CF
ANA D	A2	INX SP	33	MOV H,H	64	RST 2	D7
ANA E	A3	JC	DA	MOV H,L	65	RST 3	DF
ANA H	A4	JM	FA	MOV H,M	66	RST 4	E7
ANA L	A5	JMP	C3	MOV L,A	6F	RST 5	EF
ANA M	A6	JNC	D2	MOV L,B	68	RST 6	F7
ANI	E6	JNZ	C2	MOV L,C	69	RST 7	FF
CALL	CD	JP	F2	MOV L,D	6A	RZ	C8
CC	DC	JPE	EA	MOV L,E	6B	SBB A	9F
CM	FC	JPO	E2	MOV L,H	6C	SBB B	98
CMA	2F	JZ	CA	MOV L,L	6D	SBB C	99
CMC	3F	LDA	3A	MOV L,M	6E	SBB D	9A
CMP A	BF	LDAX B	0A	MOV M,A	77	SBB E	9B
CMP B	B8	LDAX D	1A	MOV M,B	70	SBB H	9C
CMP C	B9	LHLD	2A	MOV M,C	71	SBB L	9D
CMP D	BA	LXI B	01	MOV M,D	72	SBB M	9E
CMP E	BB	LXI D	11	MOV M,E	73	SBI	DE
CMP H	BC	LXI H	21	MOV M,H	74	SHLD	22
CMP L	BD	LXI SP	31	MOV M,L	75	SPHL	F9
CMP M	BE	MOV A,A	7F	MVI A	3E	STA	32
CNC	D4	MOV A,B	78	MVI B	06	STAX B	02
CNZ	C4	MOV A,C	79	MVI C	0E	STAX D	12
CP	F4	MOV A,D	7A	MVI D	16	STC	37
CPE	EC	MOV A,E	7B	MVI E	1E	SUB A	97
CPI	FE	MOV A,H	7C	MVI H	26	SUB B	90
CPO	E4	MOV A,L	7D	MVI L	2E	SUB C	91
CZ	CC	MOV A,M	7E	MVI M	36	SUB D	92
DAA	27	MOV B,A	47	NOP	00	SUB E	93
DAD B	09	MOV B,B	40	ORA A	B7	SUB H	94
DAD D	19	MOV B,C	41	ORA B	B0	SUB L	95
DAD H	29	MOV B,D	42	ORA C	B1	SUB M	96
DAD SP	39	MOV B,E	43	ORA D	B2	SUI	D6
DCR A	3D	MOV B,H	44	ORA E	B3	XCHG	EB
DCR B	05	MOV B,L	45	ORA H	B4	XRA A	AF
DCR C	0D	MOV B,M	46	ORA L	B5	XRA B	A8
DCR D	15	MOV C,A	4F	ORA M	B6	XRA C	A9
DCR E	1D	MOV C,B	48	ORI	F6	XRA D	AA
DCR H	25	MOV C,C	49	OUT	D3	XRA E	AB
		MOV C,D	4A	PCHL	E9	XRA H	AC
		MOV C,E	4B	POP B	C1	XRA L	AD
		MOV C,H	4C			XRA M	AE
		MOV C,L	4D			XRI	EE
						XTHL	E3

SIGNIFICATION DES MNEMONIQUES ET DUREE DES INSTRUCTIONS
(durée exprimée en périodes d'horloge)

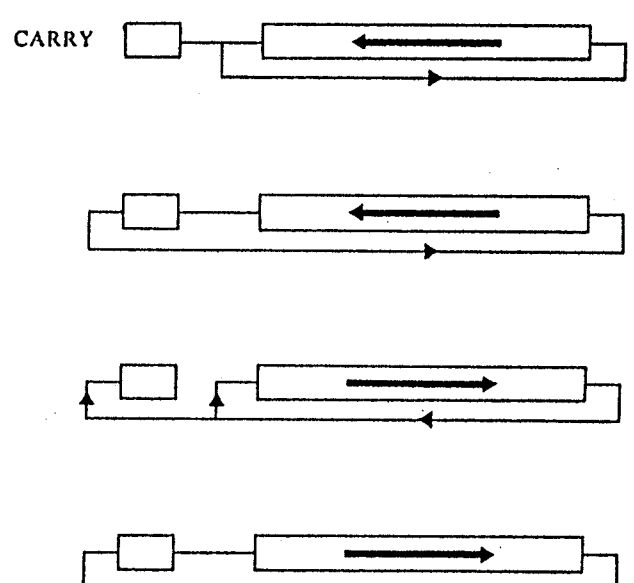
ACI	Add immediate to A with carry	7
ADC M	Add memory to A with carry	7
ADC r	Add register to A with carry	4
ADD M	Add memory to A	7
ADI	Add immediate to A	7
ANA M	And memory with A	7
ANA r	And register with A	4
ANI	And immediate with A	7
CALL	Call unconditional	17
CC	Call on carry	11/17
CM	Call on minus	11/17
CMA	Compliment A	4
CMC	Compliment curry	4
CMP M	Compare memory with A	7
CMP r	Compure register with A	4
CNC	Call on no carry	11/17
CNZ	Call on no zero	11/17
CP	Call on positive	11/17
CPE	Call on parity even	11/17
CPI	Compure immediate with A	7
CPO	Call on parity odd	11/17
CZ	Call on zero	11/17
DAA	Decimal adjust A	4
DAD B	Add B & C to H & L	10
DAD D	Add D & E to H & L	10
DAD H	Add H & L to H & L	10
DAD SP	Add stack pointer to H & L	10
DCR M	Decrement memory	10
DCR r	Decrement register	5
DCX B	Decrement B & C	5
DCX D	Decrement D & E	5
DCX H	Decrement H & L	5
DCX SP	Decrement stack pointer	5
DI	Disable Interrupt	4
EI	Enable Interrupt	4
HLT	Halt	7
IN	Input	10
INR M	Increment memory	10
INR r	Increment register	5
INX B	Increment B & C registers	5
INX D	Increment D & E registers	5
INX H	Increment H & L registers	5
INX SP	Increment stack pointer	5
JC	Jump on carry	10
JM	Jump on minus	10
JMP	Jump unconditional	10
JNC	Jump on no carry	10
JNZ	Jump on no zero	10
JP	Jump on positive	10
JPE	Jump on parity even	10
JPO	Jump on parity odd	10
JZ	Jump on zero	10
LDA	Load A direct	13
LDAX B	Load A indirect	7
LDAX D	Load A indirect	7
LHLD	Load H & L direct	16
LXI B	Load immediate register Pair B & C	10
LXI D	Load immediate register Pair D & E	10
LXI H	Load immediate register Pair H & L	10
LXI SP	Load immediate stack pointer	10
MVI M	Move immediate memory	10
MVI r	Move immediate register	7
MOVM, r	Move register to memory	7
MOVr, M	Move memory to register	7
MOV r1, r2	Move register to register	5
NOP	No-operation	4
ORA M	Or memory with A	7
ORA r	Or register with A	4
ORI	Or immediate with A	7
OUT	Output	10
PCHL	H & L to program counter	5
POP B	Pop register pair B & C off stack	10
POP D	Pop register pair D & E off stack	10
POP H	Pop register pair H & L off stack	10
POP PSW	Pop A and Flags off stack	10
PUSH B	Push register pair B & C on stack	11
PUSH D	Push register pair D & E on stack	11
PUSH H	Push register pair H & L on stack	11
PUSH PSW	Push A and Flags on stack	11
RAL	Rotate A left throug carry	4
RAR	Rotate A right throug carry	4
RC	Return on carry	5/11
RET	Return	10
RLC	Rotate A left	4
RM	Return on minus	5/11
RNC	Return on no carry	5/11
RNZ	Return on no zero	5/11
RP	Return on positive	5/11
RPE	Return on parity even	5/11
RPO	Return on parity odd	5/11
RRC	Rotate A right	4
RST	Restart	11
RZ	Return on zero	5/11
SBB M	Subtract memory from A with borrow	7
SBB r	Subtract register from A with borrow	4
SBI	Subtract immediate from A with borrow	7
SHLD	Store H & L direct	16
SPHL	H & L to stack pointer	5
STA	Store A direct	13
STAX B	Store A indirect	7
STAX D	Store A indirect	7
STC	Set carry	4
SUB M	Subtract memory from A	7
SUB r	Subtract register from A	4
SUI	Subtract immediate from A	7
XCHG	Exchange D & E, H & L, registers	4
XRA M	Exclusive Or memory with A	7
XRA r	Exclusive Or register with A	4
XRI	Exclusive Or immediate with A	7
XTHL	Exchange top of stack, H & L	18

LOGICIEL DU 8080 A OU DU 8085 A DE INTEL

Type d'instruction	Instruction	Opération accomplie	rég. concernés par r ou rp	Indicateurs affectés
lecture périphérique écriture périphérique	IN addr OUT addr	(port) → A (A) → port		AUCUN
lecture mémoire	LDA addr LHLD addr LDAX rp MOV r.M POP rp	(M) → A (M) → HL ((rp)) → A (M) → r ((SP)) → rp	BC, DE A, B, C, D, E, H, L PSW, BC, DE, HL	AUCUN sauf pour POP PSW
écriture mémoire	STA addr SHLD addr STAX rp MOV M, r MVI M data PUSH rp	(A) → M (HL) → M (A) → (rp) (r) → M data → M (rp) → (SP)	BC, DE A, B, C, D, E, H, L PSW, BC, DE, HL	AUCUN
transferts de données	MOV r1, r2 MVI r data LXI rp data PCHL SPHL XCHG XTHL	(r2) → r1 data → r data → rp (HL) → PC (HL) → SP (HL) ↔ (DE) (HL) ↔ ((SP))	A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L BC, DE, HL, SP	AUCUN
opérations arithmétiques	ADD M ADD r ADC M ADC r ADI data ACI data DAA SUB M SUB r SBB M SBB r SUI data SBI data DAD rp	(A) + (M) → A (A) + (r) → A (A) + (CY) + (M) → A (A) + (CY) + (r) → A (A) + data → A (A) + (CY) + data → A correction décim. (A) − (M) → A (A) − (r) → A (A) − (CY) − (M) → A (A) − (CY) − (r) → A (A) − data → A (A) − (CY) − data → A (HL) + (rp) → HL	A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L BC, DE, HL, SP	TOUS CY
fonctions logiques	ANA M ANA r ORA M ORA r XRA M XRA r ANI data ORI data XRI data CMP M CMP r CPI data CMA CMC STC	(A) . (M) → A (A) . (r) → A (A) + (M) → A (A) + (r) → A (A) ⊕ (M) → A (A) ⊕ (r) → A (A) . data → A (A) + data → A A ⊕ data → A (A) − (M) (A) − (r) (A) − data $(\bar{A}) \rightarrow A$ $(\overline{CY}) \rightarrow CY$ 1 → CY	A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L	TOUS (Indicateurs remis à zéro: CY, CY, AC, CY, AC, CY, AC, CY, AC) aucun CY CY

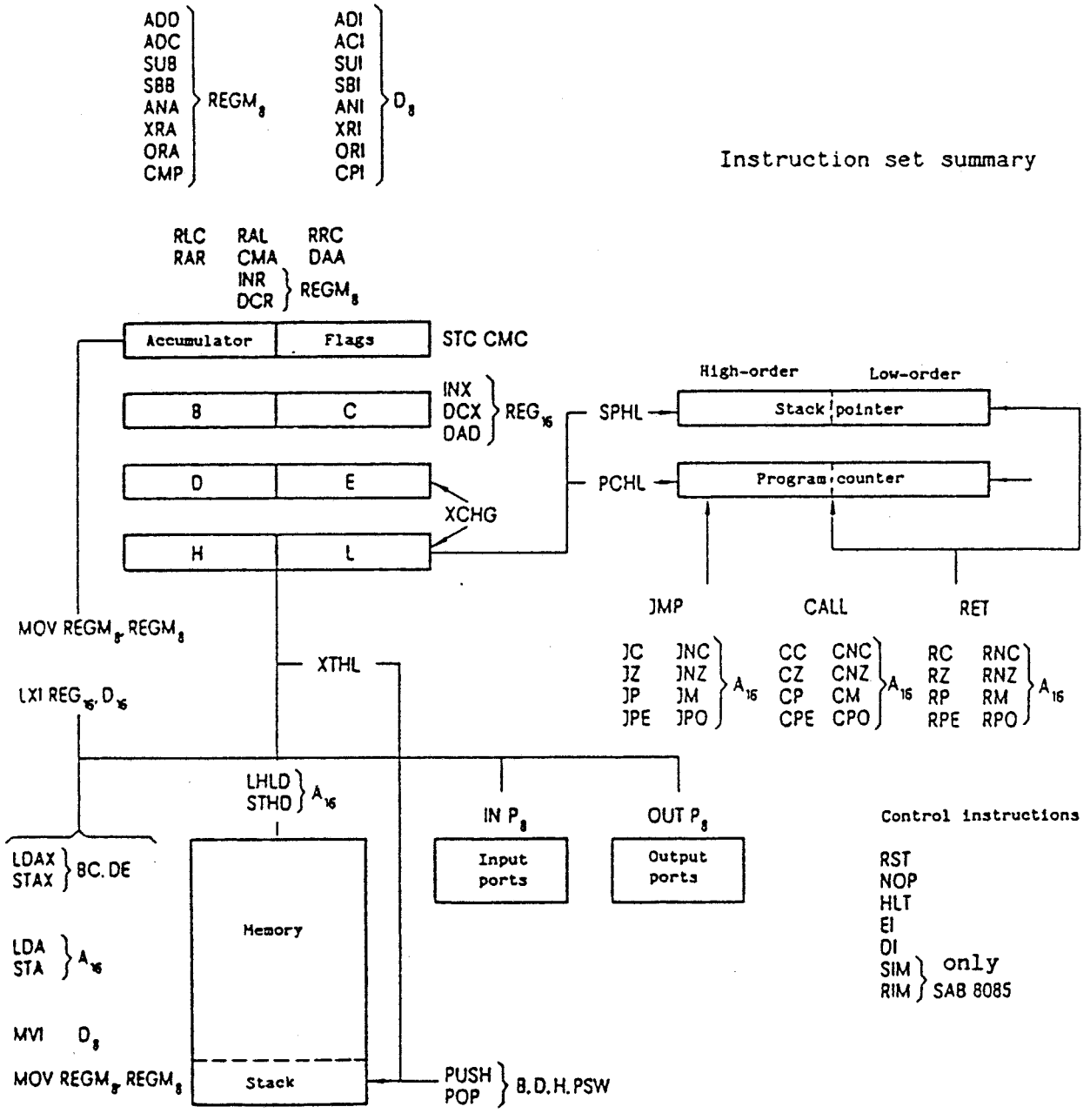
- Pour les opérandes ou les adresses de 16 bits, l'octet poids faible est traité le premier.
- La lettre M dans le code instruction symbolise l'adressage indirect par HL.

Type d'instruction	Instruction	Opération accomplie	rég. concern. par r ou rp	Indicateurs affectés
incrémentation et décrémentation	INR M INR r DCR M DCR r INX rp DCX rp	(M) + 1 → M (r) + 1 → r (M) − 1 → M (r) − 1 → r (rp) + 1 → rp (rp) − 1 → rp	A, B, C, D, E, H, L A, B, C, D, E, H, L BC, DE, HL, SP BC, DE, HL, SP	Z, S, P, AC Z, S, P, AC Z, S, P, AC Z, S, P, AC aucun aucun
branchement	JMP addr CALL addr RET JC, CC, RC addr JNC, CNC, RNC addr JZ, CZ, RZ addr JNZ, CNZ, RNZ addr JP, CP, RP addr JM, CM, RM addr JPE, CPE, RPE addr JPO, CPO, RPO addr	saut inconditionnel à l'adresse addr appel sous-programme d'adresse addr retour de sous-programme saut, appel SP, retour SP si CY = 1 saut, appel SP, retour SP si CY = 0 saut, appel SP, retour SP si Z = 1 saut, appel SP, retour SP si Z = 0 saut, appel SP, retour SP si signe = 0 saut, appel SP, retour SP si signe = 1 saut, appel SP, retour SP si pair saut, appel SP, retour SP si impair		AUCUN
instructions de décalage	RLC RAL RRC RAR	déc. gauche, CY hors boucle déc. gauche, CY dans boucle déc. droit, CY hors boucle déc. droit, CY dans boucle	VOIR BAS DE LA PAGE	CY
instructions spéciales	EI DI NOP HLT	Interruption autorisée Interruption non autorisée Rien Arrêt microprocesseur		AUCUN



Hardware and Instruction Overview

The following diagrams cover all the instructions and show how the individual instructions affect the hardware. The permissible operand type is shown by a code. If no code is given the instruction does not allow an operand.



Code	Meaning
$REGM_8$	The operand can specify one of the 8-bit registers A, B, C, D, E, H or L, or M (a memory reference via the 16-bit address in the H and L registers). The MOV instruction which requires two operands can specify M only for one of its operands.
D_8	Indicates an immediate 8-bit operand.
A_{16}	Indicates a 16-bit address.
P_8	Indicates an 8-bit port number.
REG_{16}	Indicates a 16-bit register pair (B&C, D&E, H&L, SP)
D_{16}	Indicates an immediate 16-bit operand.

LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

/1/ B. ESCAUD
P. MARTY
Introduction à l'étude des structures des convertisseurs statiques.
1ère Partie
Electronique Industrielle N° 53 (Sept 83)

/2/ J. DU PARC
Comment choisir une structure de convertisseur.
Electronique de Puissance N°12,13,14
(Nov 85 - Fev 86 - Mai 86)

/3/ B. ESCAUD
P. MARTY
Introduction à l'étude des structures de convertisseurs statiques.
3ème partie : La commutation dans les convertisseurs statiques
Electronique Industrielle N° 60 (1983)

/4/ G. MANESSE
Sur une analyse fonctionnelle des groupements d'interrupteurs statiques.
Extension à la modélisation des convertisseurs dans leur environnement de contrôle et de puissance .
Thèse de Docteur d'Etat LILLE (Avril 87)

/5/ G. MANESSE
Ch. MAIZIERES
Description fonctionnelle, par GRAFCET, des montages redresseurs.
Revue ITET (L'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique) N°244

/6/ G. MANESSE
Ch. MAIZIERES
Sur la description fonctionnelle des convertisseurs statiques.
Application aux montages redresseurs
C.R. Acad. Sc. PARIS, t295, Série II
p 963,966 (Nov 1982)

/7/ J.P. HAUTIER
G. MANESSE
Ch. MAIZIERES
Sur la description fonctionnelle, par réseau de Pétri, d'un onduleur en tension à transistors.
C.R. Acad. Sc. PARIS, t297 Série II
p 565,568 (Oct 83)

/8/ F. BORDRY
H. FOCH
M. METZ
Simulation of piecewise linear structured electric circuits Petri net representation of semi-conductors functionning in commutation.
Symposium IMACS : " Simulation in engeneering sciences "
NANTES (Mai 83)

/9/ F. BORDRY
H. FOCH
J.C. ALARCON
Programmation d'aide à la conception et à l'analyse des systèmes électriques à semi-conducteurs fonctionnant en commutation.
Rev. Gen. Elect. N° 4/85 (Avril 85)

/10/ B. SEURE
Description fonctionnelle et simulation numérique d'un variateur de vitesse, quatre quadrants pour un moteur à courant continu.
Rapport de D.E.A (Juillet 84)

/11/ P. DUMON
Sur la conduite d'un entrainement d'ascenseur par machine asynchrone et onduleur à transistors.
Thèse de Docteur Ingénieur LILLE (Nov 87)

/12/ G. MANESSE
J.P. HAUTIER
J.M. TOULOTTE
Conception simultanée des parties opératives et commande des ensembles de conversion électromécaniques.
Méthode de conception D.E.S.I.G.N .
(Description Et Simulation de systèmes d'Interrupteurs par Graphes Normalisés)
Convention Automatique Productique
PARIS (Mai 1986)

/13/ J. BLADOU
Formalisation d'extension du Grafcet :
Macro-Etape et Forçage
(D'après un document de synthèse de l'AFCET)
Electronique Industrielle N°128 (Juin 87)

/14/ J.P. HAUTIER
Sur la description fonctionnelle et simulation numérique d'un onduleur à transistors.
Thèse de Docteur Ingénieur LILLE (1984)

/15/ R. CHAUPRADE
F. MILSANT
Electronique de Puissance
2 - Commande des moteurs à courant alternatif Eyrolles (1984)

/16/ G. A. CAPOLINO
O. HASNAOUI
Survey of PWM techniques for single phase transistor inverters.
E.P.E Proceedings Power Electronics and Applications p 2.93 BRUSSELS (Oct 85)

/17/ S. R. BOWES
A. MIDOUN
Suboptimal switching strategies for microprocessor controlled PWM inverter drives.
IEE Proc. Pt B Electr. Power Applic.
Vol. 132 N°3 pp 133-148 (May 85)

/18/ J. ZUBEK
A. ABONDANTI
PWM inverter motor drives with improved modulation.
IEEE Transactions on Industry Applications
Vol. IA 11 pp 695-703 (Nov/Dec 75)

/19/ S. R. BOWES
R. R. CLEMENTS
Computed aided design of PWM inverter systems.
IEE Proc. Pt B Electr. Power Applic.
Vol. 129 pp 1-17 (1981)

/20/ P. MATHYS
Méthodes numériques de modulation pour convertisseurs statiques associés à des machines asynchrones.
Thèse de Docteur en Sciences Appliquées
Université Libre de Bruxelles (1984)

/21/ M. VARNOVITSKY
Development and comparative analysis of a PWM strategy.
IEEE Proceedings on Industrial Electronics
Vol. IE 31 N°3 pp 272-276 (1984)

/22/ H. PATEL
G. HOFT
Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters.
Part I : Harmonic elimination
IEEE Transactions on Industry Applications
Vol. IA 9 N°3 p 310-317 (May/June 73)

/23/ A. ZUCKERBERGER
A. ALEXANDROVITZ
Determination of commutation sequence with a view to eliminating harmonics in microprocessor-controlled PWM voltage inverter.
IEEE Transactions on Industrial Electronics
Vol. IE 33 N°3 pp 262-270 (August 86)

/24/ G. DERREY
A. RAZEK
Commande simple d'un variateur statique de vitesse à transistors pour alimenter un petit moteur alternatif.
Rev. Gen. Elect. Tome 89 N°5 (Mai 80)

/25/ M. BINET
Applications nouvelles des transistors de puissance.
Convertisseurs continus - 400 Hz à forte puissance massique.
Rev. Gen. Elect. Tome 87 N°4 (Avril 78)

/26/ G. ROUCHOUSE
Transparence des langages de programmation des API vis à vis du Grafcet.
Evolution actuelle et perspectives d'avenir
Rev. Gen. Elect. N°12/83 p762,765 (Dec 83)

/27/ J.P. HAUTIER
G. MANESSE
A Petri net computation structure for transistor inverter and induction motor.
Electrical machines and converters
Modelling and simulation
IMACS LIEGE (May 84)

/28/ J.P. HAUTIER
G. MANESSE
Les outils dans l'enseignement de l'électrotechnique.
Sur l'utilisation du Grafcet pour l'étude sur micro-ordinateur de convertisseurs statiques et de leur commande.
Journées d'électrotechnique du club EEA
LYON (Avril 85)

/29/ P. MARSEILLE
Sur un convertisseur direct à neuf interrupteurs alimentant un moteur asynchrone autopiloté.
Thèse de Docteur d'Université
LILLE (en cours)

/30/ G. LEDEE
Sur l'association convertisseur statitique - transformateur
Modélisation dynamique optimisation pour un fonctionnement réversible.
Thèse de Docteur d'Université LILLE (Dec 86)

/31/ Y. LIBERT
Sur un ensemble changeur de fréquence réversible pour l'alimentation d'une machine asynchrone triphasée
Mémoire d'Ingénieur CNAM
LILLE (Juillet 87)

/32/ H. FOCH
Les convertisseurs statiques à commutation forcée.
Etudes - Synthèses -Simulations
Thèse de Docteur ès Sciences Physiques
TOULOUSE (Octobre 74)

/33/ J.P. HAUTIER
G. MANESSE
B.SEURE
Sur une stratégie de commande d'un convertisseur direct tension-courant alimentant une charge monophasée.
Journées d'études de la S.E.E
" L'électronique de puissance du futur "
GRENOBLE (5-6 Juin 85)

/34/ P. LIENART
Sur un convertisseur direct Tension Courant alimentant un moteur à courant continu : Description fonctionnelle et simulation numérique.
Rapport de D.E.A (Juillet 85)

/35/ H. PATEL
G. HOFT
Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters.
Part II : Voltage Technique
IEEE Transactions on Industry Applications
Vol. IA 10 N°3 pp 666-673 (Sept/Oct 73)

/36/ D. VAFLARD
P. KERYER
A. VIRY
D. SADARNAC
Perturbations électromagnétiques :
Vers une utilisation optimale des onduleurs.
Electronique de Puissance N°24 (Dec 87)

/37/ K.S. RAJASHEKARA, Y. RAJAGOPALAN, A. SEVIGNY, J. VITHAYATHIL
DC link filter design consideration in three phase voltage source inverter-fed induction motor drive system.
I.E.E.E Trans. on Industry Applications Vol IA 23 N°4 pp 673-680 (July -August 87)

/38/ J. M. PETER, H. FOCH
Applications nouvelles des transistors de puissance :
1- Alimentation en tension d'une machine asynchrone d'induction à fréquence variable.
Rev. Gen. Elect. Tome 87 N°4 (Avril 78)

/39/ H. CORNILLEAU
Les entrainements à vitesse variable par variateurs statiques de fréquence :
2- Onduleurs autocommutés à transistors
Rev. Gen. Elect. Tome 87 N°9 (Sept 78)

/40/ P. D. ZIOGAS, Y. G. KANG, V. STEFANOVIC
Optimun system design of a three phase Rectifier-Inverter type of Frequency Changer.
I.E.E.E Trans. on Industry Applications Vol IA 21 N°5 pp 1215-1225 (Sept-Oct 85)

/41/ P. D. ZIOGAS, Y. G. KANG, V. STEFANOVIC
Rectifier-Inverter Frequency Changer with suppressed DC link components.
I.E.E.E Trans. on Industry Applications Vol IA 22 N°6 pp 1027-1036 (Nov-DEC 86)

/42/ J. LESENNE, F. NOTELET, G. SEGUIER
Introduction à l'électrotechnique approfondie.
Ed. Technique et Documentation (1980)

/43/ J. LESENNE
Contributions à l'étude des composantes relatives et à leur emploi pour l'étude analytique du moteur asynchrone alimenté par des montages à redresseurs.
Thèse de Docteur ès Sciences Physiques LILLE (Juin 78)

/44/ P. BARRET
Régimes transitoires des machines tournantes électriques.
Ed. Eyrolles

/45/ J. CHATELAIN
Machines électriques
Tomes 1 et 2 Ed Dunod

/46/ R. LE DOEUF, E. J. GUDEFIN
Modelling in view of digital simulation of the three phased machines associated to static converters.
IMACS Proceedings "Modelling and simulation of electrical machines and converters LIEGE (May 84)

/47/ P. DUMON
Sur la conduite d'un entrainement d'ascenseur par machine asynchrone et onduleur à transistors.
Thèse de Docteur Ingénieur LILLE (Nov 87)

/48/ A. BERTHON
Comportement d'un moteur asynchrone monophasé - alimenté par créneaux de tension de largeur variable
Thèse de Docteur Ingénieur
BESANCON (Mai 84)

/49/ J.P. HAUTIER
G. MANESSE
C. MAIZIERES
Description fonctionnelle et modélisation numérique d'un onduleur à transistors alimentant un moteur asynchrone.
Fourth International Symposium "Modelling and simulation"
Lugano (Juin 83)

/50/ Ph. MARSEILLE
Modéle numérique pour l'étude du comportement transitoire des onduleurs à transistors.
Rapport de D.E.A LILLE (Juillet 87)

/51/ J. GIRERD
W. KARPLUS
Traitement des équations différentielles sur calculateurs électroniques.
Ed. Gauthier - Villars

/52/ R. J.M. BELMANS
L. D'HONDT
A. VANDENPUT
W. GEYSEN
Analysis of the audible noise of three phase squirrel cage induction motors supplied by inverters.
I.E.E.E Trans. on Industry Applications
Vol IA 23 N°5 pp 842-847 (Sept-Oct 87)

/53/ R. CHAUPRADE
F. MILSANT
Commande électronique des machines à courant alternatif.
Ed. Eyrolles (1980)

/54/ A. WIART
Evaluation de la composante pulsatoire des moteurs à courant alternatif alimentés par onduleurs.
Revue Jeumont- Schneider N° 26 (Aout 78)

/55/ S. ROBERTSON
K. M. HEBBAR
Torque pulsations in induction motors with inverter drives.
I.E.E.E Trans. Ind. Gen. Appli.
Vol IGA 7 pp 318-323 (Mars-April 71)

/57/ M. SERBANESCU
E. PACURARU
Software testing for microprocessor control of a PWM transistor inverter.
First European Conference on Power Electronics and Applications
E.P.E Proceedings pp 2.81-2.85 (Oct 85)

/56/ X. MA
High performance PWM frequency changers
I.E.E.E Transactions on Industry Applic.
Vol IA 22 N°2 pp 267-279 (Mars/April 86)

/58/ J. P. HAUTIER
G. MANESSE
Sur le controle par microprocesseur d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à transistor.
A.I.M "Semiconductors for Power Applications" pp 27.01-27.06 LIEGE (Oct 83)

/59/ A. ABBANDANTI
A digital modulator circuit for PWM inverters.
I.E.E.E IAS pp 493-501 (78)

/60/ J. E. GILLIAM — Understanding and using the Philips A. C. motor speed control I. C. HEF 4752
Mullard Application Laboratory (Dec 82)

/61/ SIEMENS — Circuit SLE 4520 (SIEMENS)
Modulateur à Largeur d'Impulsions (PWM) destiné aux convertisseurs de fréquence.
SIEMENS Composants Actualités (Sept 86)

/62/ J. KOULISCHER, J. L. VAN ECK, G. BINGER, J. M. BODSON — A full numeric integrated circuit for an ultra high performance PWM modulator.
Second European Conference on Power Electronics and Applications
E.P.E Grenoble (Sept 87)

/63/ M. PIETRZAK ep DAVID — Algorithmes de commande d'un variateur électronique asynchrone
Thèse de Docteur és Sciences
INPT TOULOUSE (8 Juillet 88)

/64/ SIEMENS — Microcomputer Boad System SMP
System Handbook (1983)

/65/ M. DEBRUYNE — Méthodes modernes de mesure des courants
Journées << Electrotechnique >> 87
Club E.E.A. Lille (26-27 Mars 87)

/66/ J. C. LAPRIE, A. COSTES — Circuits intégrés et fonctions logiques
cours de l' ENSEEIHT Toulouse (81)

/67/ G. SEGUIER — L'électronique de puissance
DUNOD (79)

/68/ J. L. DALMASSO — Electronique de puissance
Commutation
BELIN - DIA Technique supérieure (86)

/69/ P. DUMON — Description fonctionnelle et simulation numérique d'un défaut de commande sur un onduleur à transistors alimentant un moteur asynchrone.
Rapport de D.E.A (Juillet 84)

/70/ B. SEURE — Sur un convertisseur direct réversible à transistors pour l'alimentation d'un moteur asynchrone diphasé.
Thèse de Docteur 3éme Cycle (Oct 86) LILLE

/71/ J. LIFERMANN — Les méthodes rapides de transformation du signal.
MASSON (1979)

/72/ D. DEMARS — Transformée de Fourier rapide .
La << FFT >> un outil mathématique trés utilisé ...
MICRO SYSTEMES (Sept-Oct 81)

/73/ J. ARMAILLE
Transformation de Fourier rapide à dédoublement temporel.
(En collaboration avec le support technique d'ANALOG DEVICES)
Electronique Industrielle N° 125 (Mai 87)

/74/ HEWLETT PACKARD
BASIC 5.0 Programming Techniques
Vol 1 : General topics
HP 9000 Series 200/300 Computers
Chapter 13 : Efficient Use Of Resources

/75/ INFOTEK SYSTEMS
Basic compiler manual for Basic on HP Series 200/300 Computers

/76/ R. CHAUPRADE
M. BOIDIN
Commandes électroniques des machines électriques à vitesse variable.
3- Commande des moteurs à courant continu
Techniques de l'Ingénieur
D541 (Machines électriques)

/77/ G. VANACK
Sur le controle d'un moteur à courant continu dans un positionnement de grande amplitude
Mémoire d'Ingénieur CNAM LILLE (86)

/78/ J. P. HAUTIER
G. MANESSE
Utilisation des réseaux de Pétri pour l'analyse des systèmes électrotechniques.
Techniques de l'Ingénieur
A paraitre (89)

/79/ BOON TECK OOI
J. C. SALMON
J. W. DIXON
A. B. KULKARNI
A three phase controlled current PWM converter with leading power factor.
IEEE Transactions on Industry Applications
Vol. IA 23 N°1 pp 78-84 (Jan-Feb 87)

/80/ M. NISHIMOTO
J. W. DIXON
A. KULKARNI
BOON TECK OOI
An integrated controlled-current PWM Rectifier Chopper link for sliding mode position control.
IEEE Transactions on Industry Applications
Vol. IA 23 N°5 pp 894-900 (Sept-Oct 87)

/81/ A. PERIN
Contribution à l'étude des convertisseurs directs de fréquence à transistors de puissance.
Thése de Docteur-Ingénieur Toulouse (1984)

/82/ B. FRANCE
Sur la modélisation globale du moteur asynchrone alimenté par gradateur.
Application à la conception de commandes pour basses vitesses.
Thése de Docteur-Ingénieur LILLE (Juin 88)