

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

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

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRE ES SCIENCES APPLIQUÉES  
EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**

**PAR  
MOHAMAD SAAD**

**SYNTHESE DES CONVERTISSEURS STATIQUES DIRECTS**

**SEPTEMBRE 1992**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude va au Professeur Venkatachari Rajagopalan, directeur du Groupe de Recherche en Électronique Industrielle (GREI) à l'UQTR, pour avoir dirigé cette recherche et entouré ce travail de toute sa compétence, de sa sollicitude et de ses précieux encouragements.

J'adresse ma respectueuse reconnaissance au Professeur Kamal Al-Haddad de l'ETS, mon co-directeur de recherche, qui m'a si généreusement fait l'honneur de ses commentaires et suggestions.

Je remercie également très vivement le Professeur Henri Foch, directeur de l'Équipe Convertisseur du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle (LEEI) de l'INP Toulouse, d'avoir accepté de m'accueillir pour un stage au sein de sa très dynamique équipe de recherche, ainsi que pour l'encadrement et les très précieuses directives, dont il m'a fait part.

Monsieur Thierry Rafesthain, chercheur Post-Doctoral au GREI-UQTR, a suivi de très près les plus importantes étapes de ce travail, je lui en suis très reconnaissant.

Je ne saurais exprimer toutes la reconnaissance et gratitude que j'ai envers tous les membres du personnel de la Direction de la coopération internationale, sans qui je n'aurais pu séjourner au Canada. J'aimerais adresser un remerciement très particulier à Madame Yveline Côté pour sa compréhension et l'encadrement pédagogique dont elle m'a fait part tout au long de mes études au Canada.

Ma profonde reconnaissance va aux membres du personnel du Ministère de l'éducation supérieure du Liban, pour la confiance qu'ils m'ont accordée pour poursuivre mes études supérieures.

Je rends hommage à Madame Sylvie Garceau, secrétaire du département de génie électrique de l'UQTR, pour son extrême gentillesse ainsi que pour les nombreux services qu'elle m'a rendus.

Je ne saurais terminer sans exprimer toute ma gratitude et mes profonds sentiments envers ma famille qui m'a supporté tout au long de mes études.

Que mes amis et collègues acceptent mes sincères remerciements pour leurs supports et tous les moments précieux qu'ils m'ont partagés. Je cite particulièrement, Abdallah Assafiri, Hamza Chériti, Faïçal Mnif, Maher Kaffel, Abdelfattah Ba-Razzouk, Mohamad Tou.

## TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ .....	i
REMERCIEMENTS .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	iv
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
CHAPITRES	
I. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DES CONVERTISSEURS STATIQUES .....	4
I.1 Introduction .....	4
I.2 Notion d'interrupteur .....	5
I.2.1 Caractéristique statique .....	5
I.2.2 Caractéristique dynamique: mode de commutation .....	8
I.3 Classification des interrupteurs .....	10
I.3.1 Interrupteurs à deux segments .....	10
I.3.2 Interrupteurs à trois segments .....	11
I.3.3 Interrupteurs à quatre segments .....	12
I.4 Caractérisation des sources .....	14
I.4.1 Notion de sources .....	14
I.4.2 Nature des sources .....	14
I.4.3 Règles d'interconnexion des sources .....	15
I.5 Structure des convertisseurs statiques .....	15
I.5.1 Structure des convertisseurs directs .....	16
I.5.2 Convertisseurs indirects .....	17
I.6 Classification des convertisseurs statiques .....	19

I.7 Conclusion .....	21
II. LA DUALITÉ DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES .....	22
II.1 Introduction .....	22
II.2 La dualité dans les graphes et les circuits .....	23
II.3 Algorithme de construction d'un graphe dual et d'un circuit dual .....	24
II.4 Interrupteurs statiques duaux .....	28
II.5 Le thyristor dual .....	31
II.6 Application des règles de la dualité dans les convertisseurs statiques .....	32
II.7 Conclusion .....	35
III. COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES .....	36
III.1. Introduction .....	36
III.2 Cellule de commutation .....	36
III.3 Aspect local de la commutation .....	39
III.4 Aspect système de la commutation .....	40
III.4.1 Loi fondamentale de la commutation .....	40
III.4.2 Modes de commutation .....	42
III.5 Conclusion .....	46
IV. SYNTHÈSE DES CONVERTISSEURS STATIQUES DIRECTS .....	47
IV.1 Introduction .....	47
IV.2 Synthèse des convertisseurs statiques directs .....	48
IV.2.1 Principes de synthèse des C.S.D.T.C .....	49
IV.2.2 Principes de synthèse des C.S.D.C.T .....	50
IV.3 Caractéristiques statiques des interrupteurs .....	50
IV.4 Caractéristiques dynamiques des interrupteurs pour un fonctionnement en mode continu .....	55

IV.5 Exemples d'applications de synthèse .....	60
IV.5.1 Exemple I .....	60
IV.5.2 Exemple II .....	64
IV.6 Conclusion .....	67
<b>V. SYNTHÈSE DES INTERRUPTEURS DE LA CELLULE DE COMMUTATION</b>	<b>69</b>
V.1 Introduction .....	69
V.2 Fonctionnement à cycle unique .....	70
V.2.1 Tension et courant ne changeant pas de signe entre deux commutations	70
V.2.2 Sens du courant changeant entre deux commutations .....	72
V.2.3 Signe de la tension changeant entre deux commutations .....	75
V.3 Règles générales de commutation des convertisseurs statiques directs .....	78
V.3.1 Règles générales .....	78
V.3.2 Extension des résultats de la cellule sur le convertisseur complet .....	82
V.4 Exemple d'application .....	85
V.5 Conclusion .....	89
<b>VI. RÉALISATION DU LOGICIEL ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS</b>	
<b>DE SYNTHÈSES</b> .....	<b>90</b>
VI.1 Introduction .....	90
VI.2 Réalisation du logiciel "CAGECT" .....	90
VI.2.1 Justification de l'existence de ce logiciel .....	90
VI.2.2 Cahier des charges .....	91
VI.2.3 Réalisation du logiciel .....	93
VI.3 Interprétation des résultats obtenus .....	95
VI.3.1 Conversion continu-continu: Hacheurs .....	97
VI.3.2 Conversion alternatif-continu: Redresseurs .....	98

	viii
VI.3.3 Conversion continu-alternatif: Onduleurs .....	100
VI.4 Conclusion .....	110
VII. CONCLUSION GÉNÉRALE .....	111
RÉFÉRENCES .....	113
ANNEXE I: Mode d'utilisation du logiciel "CAGECT".....	115
ANNEXE II: Conception assistée par ordinateur des convertisseurs statiques directs (article pour la "Revue canadienne en génie électrique et informatique").....	130



## LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Caractéristique statique d'un interrupteur .....	6
Figure I.2: Caractéristiques statiques à deux segments .....	6
Figure I.3: Caractéristiques statiques à trois segments .....	7
Figure I.4: Caractéristique statique à quatre segments .....	8
Figure I.5: Commutation commandée d'un interrupteur .....	9
Figure I.6: Commutation spontanée d'un interrupteur .....	10
Figure I.7: Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs à deux segments .....	11
Figure I.8: Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs à trois segments .....	12
Figure I.9: Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs à quatre segments .....	13
Figure I.10: Réversibilités des sources .....	14
Figure I.11: Synoptique d'un convertisseur statique direct .....	16
Figure I.12: Possibilités d'interconnexions d'une source de tension (V) et d'une source de courant (I) .....	17
Figure I.13: Configurations de base d'un convertisseur direct .....	17
Figure I.14: Utilisation d'un étage tampon .....	18
Figure I.15: Convertisseur indirect tension-tension à accumulation inductive .....	18
Figure I.16: Convertisseur indirect courant-courant à accumulation capacitive .....	19
Figure I.17: Tableau général des convertisseurs statiques .....	20
Figure II.1: Graphes planaire (a) et non planaire (b) .....	23
Figure II.2: Orientation du graphe dual .....	25
Figure II.3: Exemple de recherche d'un circuit dual .....	26

Figure II.4: Structures duales des sections d'un circuit .....	27
Figure II.5: Relation de dualité entre les interrupteurs .....	30
Figure II.6: Tableau comparatif des propriétés du thyristor et du thyristor dual .....	31
Figure II.7: Recherche du convertisseur dual d'un hacheur à thyristor à commutation forcée .....	33
Figure II.8: Recherche des structures duales de quelques convertisseurs statiques directs .....	34
Figure III.1: Dispositif de commutation réalisé par un groupement en étoile d'interrupteurs .....	37
Figure III.2: La cellule de commutation .....	38
Figure III.3: Exemples de structures classiques faisant apparaître les cellules de commutation .....	39
Figure III.4: Cellules élémentaires avant et après la commutation .....	41
Figure III.5: Caractéristiques statiques des deux interrupteurs .....	41
Figure III.6: Caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs .....	42
Figure III. 7: Détermination du mécanisme de commutation .....	43
Figure III.8: Détermination du mécanisme de commutation à partir des signes relatifs du courant et de la variation de potentiel .....	45
Figure IV.1: Structure de base d'un convertisseur statique direct tension-courant (C.S.D.T.C) .....	48
Figure IV.2: Séquences de fonctionnement d'un C.S.D.T.C .....	49
Tableau IV.1: Caractéristiques statiques des interrupteurs .....	55
Figure IV.3 Convention de signes pour les interrupteurs .....	56
Tableau IV.2: Transitions élémentaires: fonctionnement à trois séquences .....	57

<b>Tableau IV.3: Commandes au blocage</b> .....	<b>59</b>
<b>Tableau IV.4: Commandes à l'amorçage</b> .....	<b>60</b>
<b>Figure IV.4: Séquences de fonctionnement de la phase de traction</b> .....	<b>61</b>
<b>Figure IV.5: Séquences de fonctionnement de la phase de freinage</b> .....	<b>62</b>
<b>Figure IV.6: Structure du hacheur réversible en courant</b> .....	<b>63</b>
<b>Figure IV.7: Transitions élémentaires: fonctionnement à trois séquences</b> .....	<b>64</b>
<b>Figure IV.8: Transitions élémentaires: fonctionnement à quatre séquences</b> .....	<b>65</b>
<b>Tableau IV.5: Types de commutation des interrupteurs</b> .....	<b>66</b>
<b>Figure IV.9: Structure du convertisseur étudié</b> .....	<b>67</b>
<b>Figure V.1: Mécanisme de commutation sans changement de signe de la tension et du courant</b> .....	<b>71</b>
<b>Figure V.2: Mécanisme de commutation lorsque le courant change de signe entre deux commutations</b> .....	<b>73</b>
<b>Figure V.3: Cellules de commutation avec une source de tension unidirectionnelle et source de courant bidirectionnelle</b> .....	<b>74</b>
<b>Figure V.4: Mécanisme de commutation lorsque la tension change de signe entre deux commutations</b> .....	<b>76</b>
<b>Figure V.5: Cellules de commutations avec une source de tension bidirectionnelle et une source de courant unidirectionnelle</b> .....	<b>77</b>
<b>Figure V.6 Structure de base des C.S.D.T.C avec les conventions de signes</b> .....	<b>79</b>
<b>Figure V.7 Formes d'onde des sources d'entrée et de sortie</b> .....	<b>85</b>
<b>Figure V.8 Topologie du convertisseur</b> .....	<b>86</b>
<b>Figure V.9 Séquences de fonctionnement possibles</b> .....	<b>87</b>
<b>Figure V.10 Topologies du convertisseur par l'application des règles de la commutation</b> .....	<b>89</b>

Figure VI.1: Librairie des formes d'ondes .....	92
Figure VI.2: Organigramme du logiciel CAGECT .....	94
Figure VI.3: Possibilités de convertisseurs statiques directs tension-courant .....	96
Figure VI.4: Structure générale des convertisseurs tension-courant .....	102
Figure VI.5: Hacheurs dévolteurs ( $v_e = "1"$ , $i_s = "1"$ et $v_s = "3"$ ) .....	103
Figure VI.6: Hacheurs à transistors ( $v_e = "1"$ , $i_s = "1"$ et $v_s = "5"$ , "6", "7" ou "8") .....	104
Figure VI.7: Redresseur à diodes ( $v_e = "5"$ , $i_s = "1"$ et $v_s = "1"$ ) .....	104
Figure VI.8: Structures des redresseurs ( $v_e = "5"$ , $i_s = "1"$ et $v_s = "3"$ ) .....	105
Figure VI.9: Redresseurs à thyristors-diodes-duaux ( $v_e = "5"$ , $i_s = "1"$ et $v_s = "5"$ ) ...	107
Figure VI.10: Redresseurs à thyristors ( $v_e = "5"$ , $i_s = "1"$ et $v_s = "6"$ ) .....	108
Figure VI.11: Onduleurs à thyristors-diodes ( $v_e = "1"$ , $i_s = "5"$ et $v_s = "3"$ ) .....	108
Figure VI.12: Onduleurs à thyristors-duaux ( $v_e = "1"$ , $i_s = "5"$ et $v_s = "4"$ ) .....	108
Figure VI.13: Onduleurs à thyristors-diodes ( $v_e = "1"$ , $i_s = "5"$ et $v_s = "5"$ ou "6") .....	109
Figure VI.14: Onduleurs à thyristors-duaux ( $v_e = "1"$ , $i_s = "6"$ et $v_s = "5"$ ou "6") .....	109
Figure A.I.1 à Figure A.I.11: Mode d'utilisation du logiciel "CAGECT" .....	119

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie électrique se présente principalement sous deux formes, alternative ou continue et ses caractéristiques (tension, fréquence...) sont généralement figées (réseaux alternatif 60 Hz, 120v/240v en Amérique du Nord; batteries d'accumulateur...). Parfois, les caractéristiques de cette énergie peuvent varier dans une large gamme: alternateur ou génératrice entraînée à vitesse variable, générateur photovoltaïque, éolienne...

Cependant de nombreuses applications réclament des alimentations spécifiques avec des caractéristiques fixes ou variables différentes de celles des sources d'énergie: réseau 400 Hz à bord des avions, courant continu réglable pour la charge d'une batterie, alimentation moyenne fréquence 1 à 200 KHz pour le chauffage par induction, générateur de tension et/ou de fréquence variable pour le contrôle de vitesse des machines électriques.

La conversion d'énergie électrique consiste en la transformation de la forme et des caractéristiques de l'énergie électrique fournie par la source pour l'adapter à l'application. Les puissances contrôlées vont de quelques Watts à quelques MégaWatts. Ces conversions, autrefois réalisées par des convertisseurs électromécaniques (essentiellement des machines tournantes), sont aujourd'hui effectuées par des convertisseurs statiques moins lourds et plus performants.

Les deux dernières décennies ont été marquées par l'afflux de nouvelles technologies, le domaine de l'électronique de puissance en a largement bénéficié.

La recherche de structures de convertisseurs statiques adaptées aux problèmes spécifiques à résoudre a suscité de nombreuses études tant les domaines de pointes que dans les domaines industrielles.

T. Edison disait que le génie c'est 10% d'inspiration et 90% de transpiration. C'est sûrement cette célèbre citation qui inspira les premiers chercheurs à mettre en cascade deux convertisseurs, un survolteur (boost) et un dévolteur (buck), ce qui a permis de découvrir le convertisseur élévateur-abaisseur ou "Cuk converter" [17], et à appliquer la technique de la dualité aux convertisseurs statiques [8] pour découvrir de nouvelles topologies; car après ces fructueuses tentatives, tout alla très vite.

Le développement du thyristor-dual [12] a permis de définir complètement les structures duales des convertisseurs statiques [7, 12] et ceci par application des règles de la dualité qui sont exposées dans le chapitre II.

Plusieurs équipes de recherche travaillèrent sur le développement des fondements de l'électronique de puissance (chapitre I). Plusieurs techniques furent mises au point pour la réalisation et la synthèse de convertisseurs statiques dans le domaine courant continu-courant continu (CC-CC): la modulation de largeur d'impulsion (MLI) [14], la résonance ou la quasi-résonance [15, 18, 19]. Les travaux actuels sont plutôt axés sur la conversion d'énergie courant-continu, courant-alternatif par association d'un ou de plusieurs convertisseurs directs et utilisent les éléments de stockage inductif ou capacitif.

Avec l'affluence de toutes ces nouvelles structures, un besoin de synthèse des convertisseurs statiques c'est fait sentir. Pour cela des études ont été basées sur l'analyse de la nature des sources utilisées et leurs différentes réversibilités [2, 13] (chapitre IV). Mais toutes ces topologies ont au moins un élément en commun, cet élément est la cellule de commutation [10,11] (chapitre III). Une autre approche de synthèse a été développée. Elle est basée sur cette dernière notion [1, 4], la synthèse des interrupteurs de la cellule de commutation (chapitre V). Elle utilise les règles générales d'électronique de puissance, pour analyser les formes d'ondes souhaitées à l'entrée et à la sortie de la cellule.

C'est cette méthode qui est à la base du travail que nous allons présenter. Ce travail consiste en l'utilisation des résultats généraux développés auparavant [1, 2, 4, 10, 11] et à leurs applications à la conception d'un logiciel de synthèse de convertisseurs statiques directs monophasés (sans éléments de stockage) tension-courant (chapitre VI).

## CHAPITRE I

### ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DES CONVERTISSEURS STATIQUES

#### I.1 INTRODUCTION

Un convertisseur statique est constitué par un ensemble d'éléments électriques statiques formant un réseau maillé et constituant un organe de liaison, d'adaptation ou de transformation entre un générateur et un récepteur.

Le convertisseur statique idéal permet de contrôler le transfert de l'énergie électrique du générateur vers le récepteur avec un rendement unitaire. Il n'est théoriquement le siège d'aucune perte. Les éléments qui le constituent fondamentalement sont de deux types:

- des éléments non linéaires qui sont principalement des interrupteurs électroniques à semi-conducteurs,
- des éléments linéaires réactifs: condensateurs, inductances (et transformateurs).

Il faut remarquer que ces éléments réactifs assurent le stockage et le transfert de l'énergie électrique mais aussi le filtrage des ondes de tension et de courant. Ils occupent généralement une grande partie du poids, du volume et du coût des équipements.

Dans ce chapitre, on se propose de rappeler un certain nombre de concepts spécifiques au domaine des convertisseurs statiques tels que celui d'interrupteur ou bien encore celui de source. D'autres définitions concernent les caractéristiques statique ou dynamique d'un interrupteur. Les commutations commandée ou spontanée de ce dernier



sont également données. Les interrupteurs et les sources, qui sont les éléments constitutifs fondamentaux des convertisseurs statiques, sont connectés entre eux suivant des règles très simples qui sont les principes fondamentaux des convertisseurs statiques et desquelles découlent leurs structures.

Il faut noter que toutes ces notions ont déjà été introduites dans les notes de cours d'Électronique de Puissance de l'ENSEEIH Toulouse [1], les thèses de Mopty [2] et Chéron [3] et l'extrait de la collection "Les Techniques de l'Ingénieur" [4].

## I.2 NOTION D'INTERRUPTEUR

Un interrupteur présente deux états stables en régime statique: l'état passant (ON), et l'état bloqué (OFF). Le passage d'un état à l'autre (le basculement de l'interrupteur) implique un fonctionnement transitoire en régime dynamique.

### I.2.1 Caractéristique statique

Considéré comme récepteur avec des conventions récepteur (Fig. I.1), la caractéristique statique  $i_k(v_k)$ , qui représente l'ensemble des points de fonctionnement de l'interrupteur, comporte deux branches situées entièrement dans les quadrants 1 et 3 tel que  $i_k \cdot v_k > 0$ . L'une très proche de l'axe des ordonnées (état passant), l'autre très proche de l'axe des abscisses (état bloqué), chacune de ces branches pouvant être unidirectionnelle. En idéalisant cet interrupteur, on peut confondre la caractéristique statique avec les deux demi-axes dont elle est voisine. La caractéristique statique, qui est une propriété intrinsèque de l'interrupteur, se réduit à un certain nombre de segments du plan  $i_k(v_k)$ .

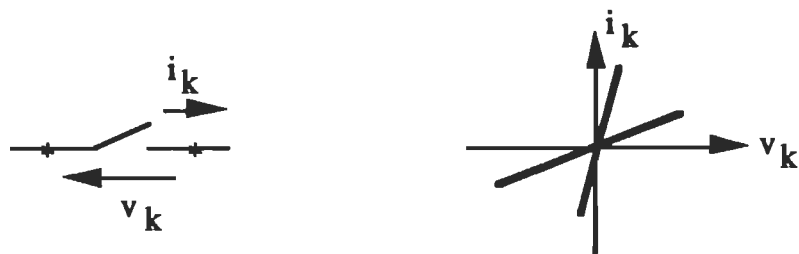


Fig. I.1 Caractéristique statique d'un interrupteur

• Caractéristique statique à deux segments: l'interrupteur est unidirectionnel en tension et en courant. On distingue deux caractéristiques statiques à deux segments: pour l'une, la tension  $v_k$  et le courant sont toujours de mêmes signes; pour l'autre, la tension  $v_k$  et le courant sont toujours de signes contraires. Les interrupteurs associés à ses caractéristiques sont respectivement appelés type **T** et **D** (Fig. I.2).

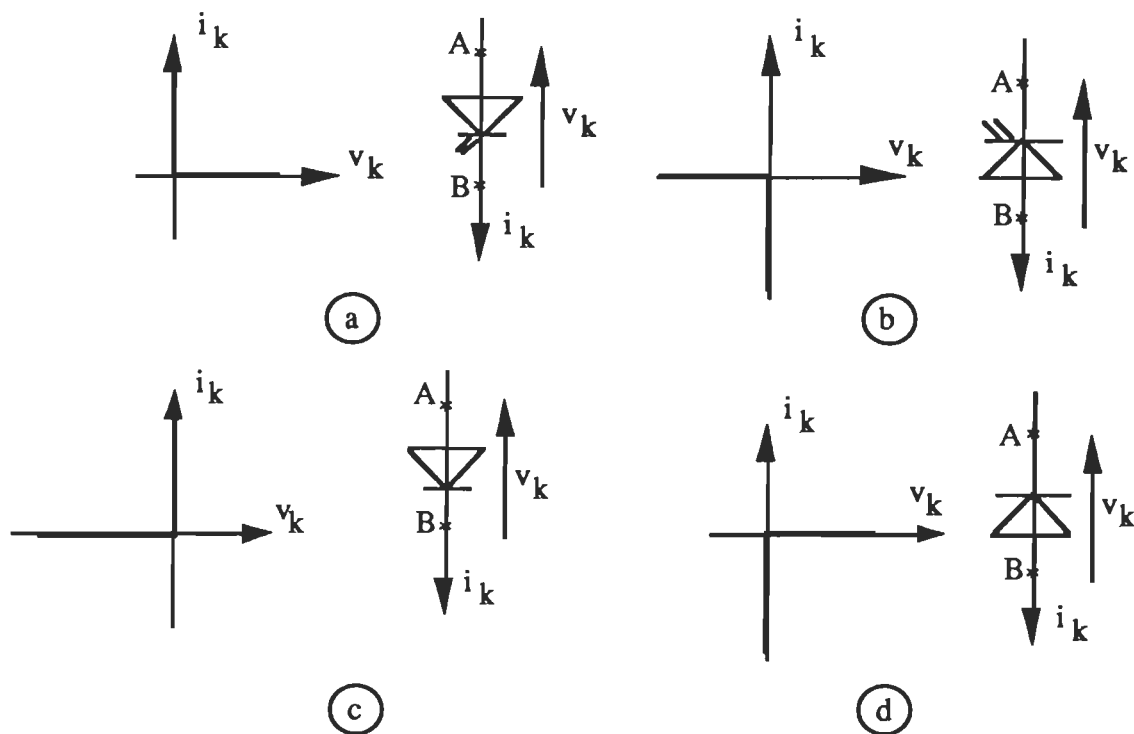


Fig. I.2 Caractéristiques statiques à deux segments

La figure I.2 représente quatre caractéristiques statiques à deux segments. Les figures I.2b et I.2d correspondent à des dispositions inversées des interrupteurs entre les points A et B par rapport aux montages des figures I.2a et I.2c.

- Caractéristiques statiques à trois segments: l'une des grandeurs, tension ou courant, est bidirectionnelle et l'autre est unidirectionnelle. Il existe deux caractéristiques statiques à trois segments (Fig. I.3).

On peut obtenir un interrupteur, dont la caractéristique statique est à trois segments, en associant des interrupteurs types T et D en série ou en parallèle.

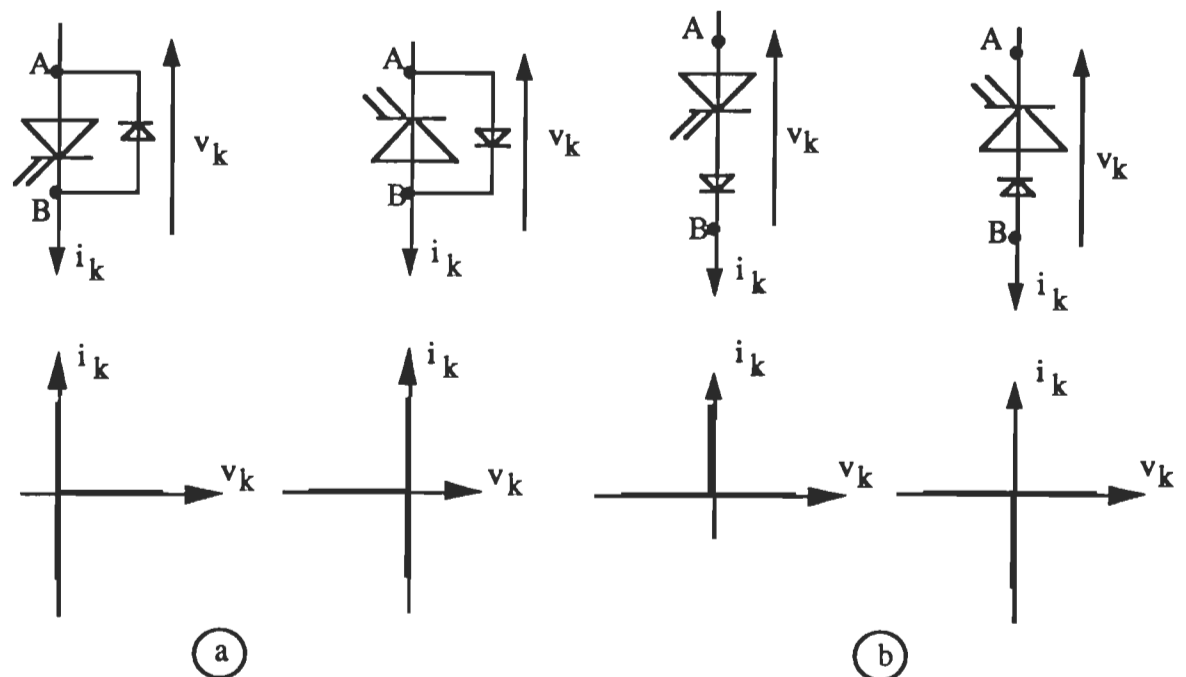


Fig. I.3 Caractéristiques statiques à trois segments  
 a) bidirectionnelle en courant  
 b) bidirectionnelle en tension

- Caractéristiques statiques à quatre segments: la tension et le courant sont bidirectionnels. Cette caractéristique statique est unique (Fig. I.4).

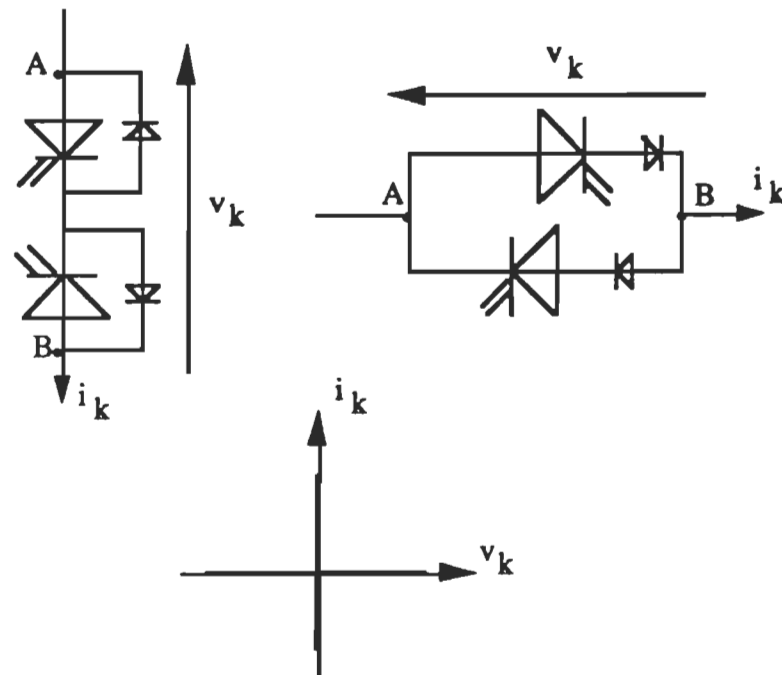


Fig. I.4 Caractéristique statique à quatre segments

Les interrupteurs possédant des caractéristiques statiques à quatre segments peuvent être synthétisés par l'association série ou parallèle d'interrupteurs possédant des caractéristiques statiques à trois segments.

### I.2.2 Caractéristique dynamique: mode de commutation

La caractéristique statique d'un interrupteur est insuffisante pour décrire ses propriétés dynamiques, c.à.d. la manière selon laquelle l'interrupteur passe de l'état bloqué à l'état passant ou inversement. La caractéristique dynamique de commutation est la trajectoire suivie par le point de fonctionnement, pendant la commutation de l'interrupteur, pour passer d'un demi-axe à un autre demi-axe perpendiculaire. Ce trajet ne peut se faire que dans les quadrants tel que  $i_k \cdot v_k > 0$  puisque l'interrupteur est considéré comme récepteur.

Tant à l'amorçage qu'au blocage, deux modes de changement d'état des interrupteurs sont à distinguer: la commutation commandée et la commutation spontanée.

- Commutation commandée: l'interrupteur possède en plus de ses deux électrodes principales (anode et cathode), une électrode de commande (gâchette) sur laquelle il est possible d'agir pour provoquer son changement d'état de façon quasi-instantanée. La caractéristique dynamique devant correspondre à une variation continue de résistance, donc à un rapport  $v_k/i_k$  positif en régime permanent, on passe d'un point de fonctionnement statique situé sur un demi-axe à un autre point de fonctionnement situé sur le demi-axe perpendiculaire de même signe que le précédent (Fig. I.5) [1].

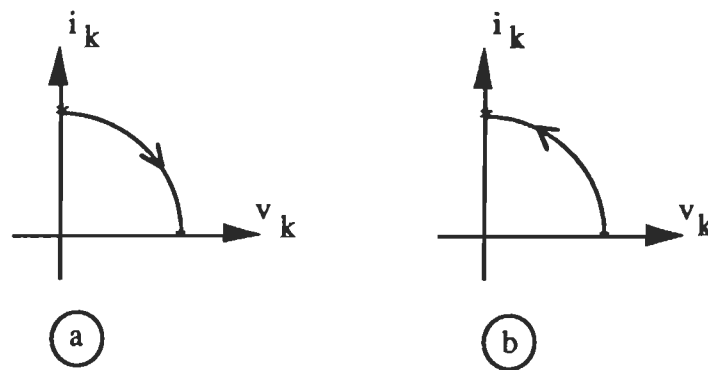


Fig. I.5 Commutation commandée d'un interrupteur  
 a) blocage commandé.  
 b) amorçage commandé.

- Commutation spontanée: La caractéristique dynamique de commutation à l'ouverture et à la fermeture de l'interrupteur est obligatoirement confondue avec sa caractéristique statique [3]. L'interrupteur commute naturellement lorsque le point de fonctionnement, se déplaçant sur la caractéristique statique, passe par zéro. La commutation de cet interrupteur, à l'ouverture au passage par zéro du courant qui le traverse et à la fermeture à l'annulation de la tension à ses bornes (Fig. I.6), est donc entièrement dépendante de l'évolution des grandeurs électriques du circuit extérieur.

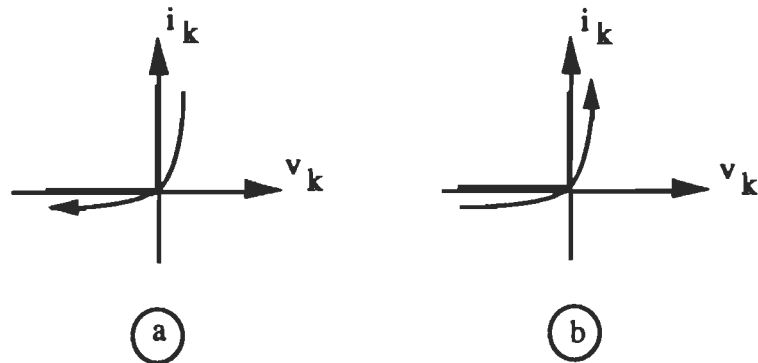


Fig. I.6 Commutation spontanée d'un interrupteur  
 a) blocage spontané.  
 b) amorçage spontané.

### I.3 CLASSIFICATION DES INTERRUPTEURS

Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs statiques peuvent être classés en fonction de leurs caractéristiques statiques à deux, trois ou quatre segments et de la nature de leurs commutations, à l'amorçage ou au blocage, commandée ou spontanée.

#### I.3.1 Interrupteurs à deux segments:

Mis à part le court-circuit et le circuit ouvert, on distingue deux interrupteurs dont les caractéristiques statiques possèdent deux segments:

- le premier de ces interrupteurs a la caractéristique statique de l'interrupteur **D** ( $v_k \cdot i_k < 0$ ) et ses commutations (amorçage et blocage) sont spontanées (Fig. I.7a), c'est la diode;

- le second a la caractéristique statique de l'interrupteur **T** ( $v_k \cdot i_k > 0$ ) et ses commutations (amorçage et blocage) sont commandées par un signal d'horloge (Fig. I.7b), c'est le transistor et ses dérivés (MOSFET, COMFET, IGBT,...) ou un thyristor blocable (GTO), etc...

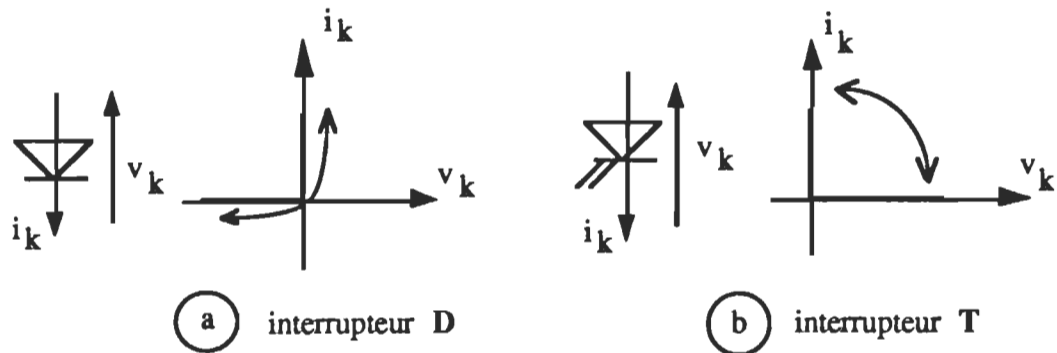


Fig. I.7 Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs à deux segments  
 a) Interrupteur type "diode"  
 b) Interrupteur type "transistor"

### I.3.2 Interrupteurs à trois segments

Ces interrupteurs se répartissent en deux groupes suivant qu'ils sont bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension (Fig. I.8a), ou bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant (Fig. I.8b). Dans chacun des groupes, les interrupteurs ont la même caractéristique statique et ils ne diffèrent que par leurs modes de commutation. Ces interrupteurs ne peuvent être utilisés que dans des convertisseurs déterminés en imposant un cycle de fonctionnement bien précis. Certains convertisseurs peuvent avoir des fonctionnements complexes qui imposent des cycles différents à chacun des interrupteurs (onduleur en modulation de largeur d'impulsion) [3]. Dans ce cas, ils se comportent comme de véritables interrupteurs à deux segments (transistor en antiparallèle avec une diode).

À l'exception du thyristor, les interrupteurs à trois segments sont tous des interrupteurs de synthèse, réalisés en associant une diode en série ou en parallèle à un interrupteur à deux segments dont l'une des commutations est commandée, l'autre commutation étant rendue spontanée car les fréquences de commande et de fonctionnement sont égales (commutation douce, cf. Règle 10.1).

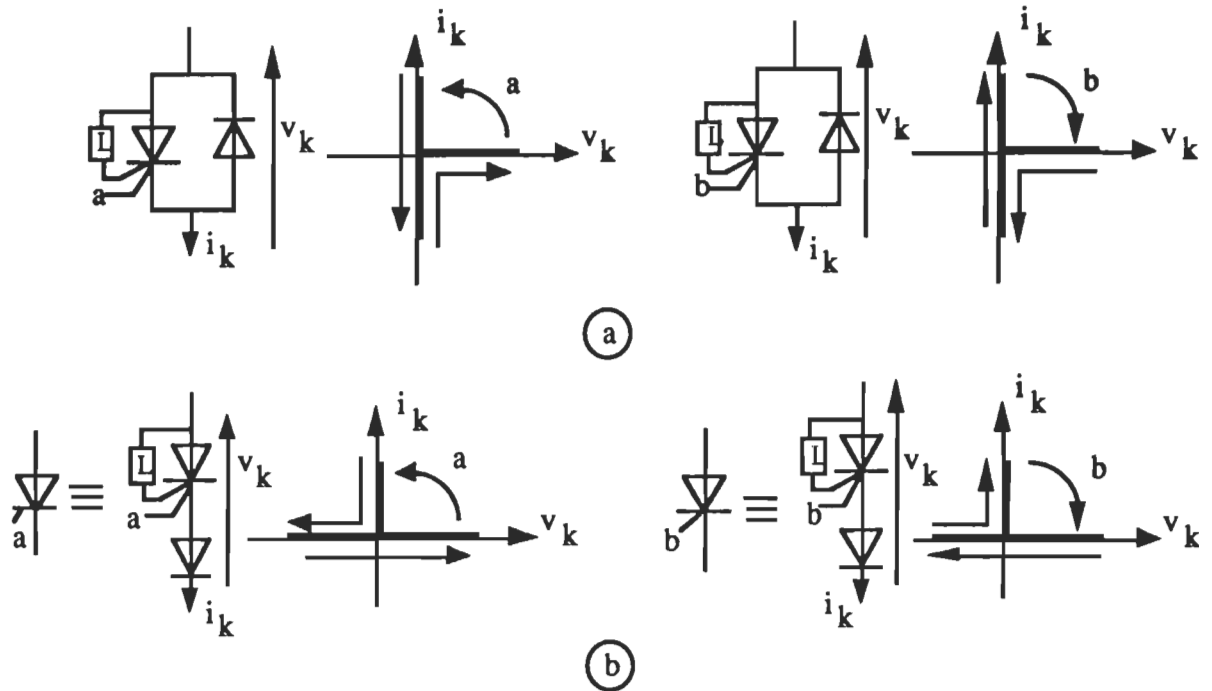


Fig. I.8 Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs à trois segments  
 a) bidirectionnels en courant.  
 b) bidirectionnels en tension.

### I.3.3 Interrupteurs à quatre segments

Tous les interrupteurs à quatre segments possèdent la même caractéristique statique. Ils ne diffèrent que par leurs modes de commutation qui peuvent être, a priori, différents dans les quadrants 1 et 3. Il est donc possible de distinguer six interrupteurs à quatre segments. Ces interrupteurs sont généralement utilisés dans les cycloconvertisseurs [4], et sont constitués pratiquement de deux interrupteurs à trois segments en série ou en parallèle (Fig. I.9).



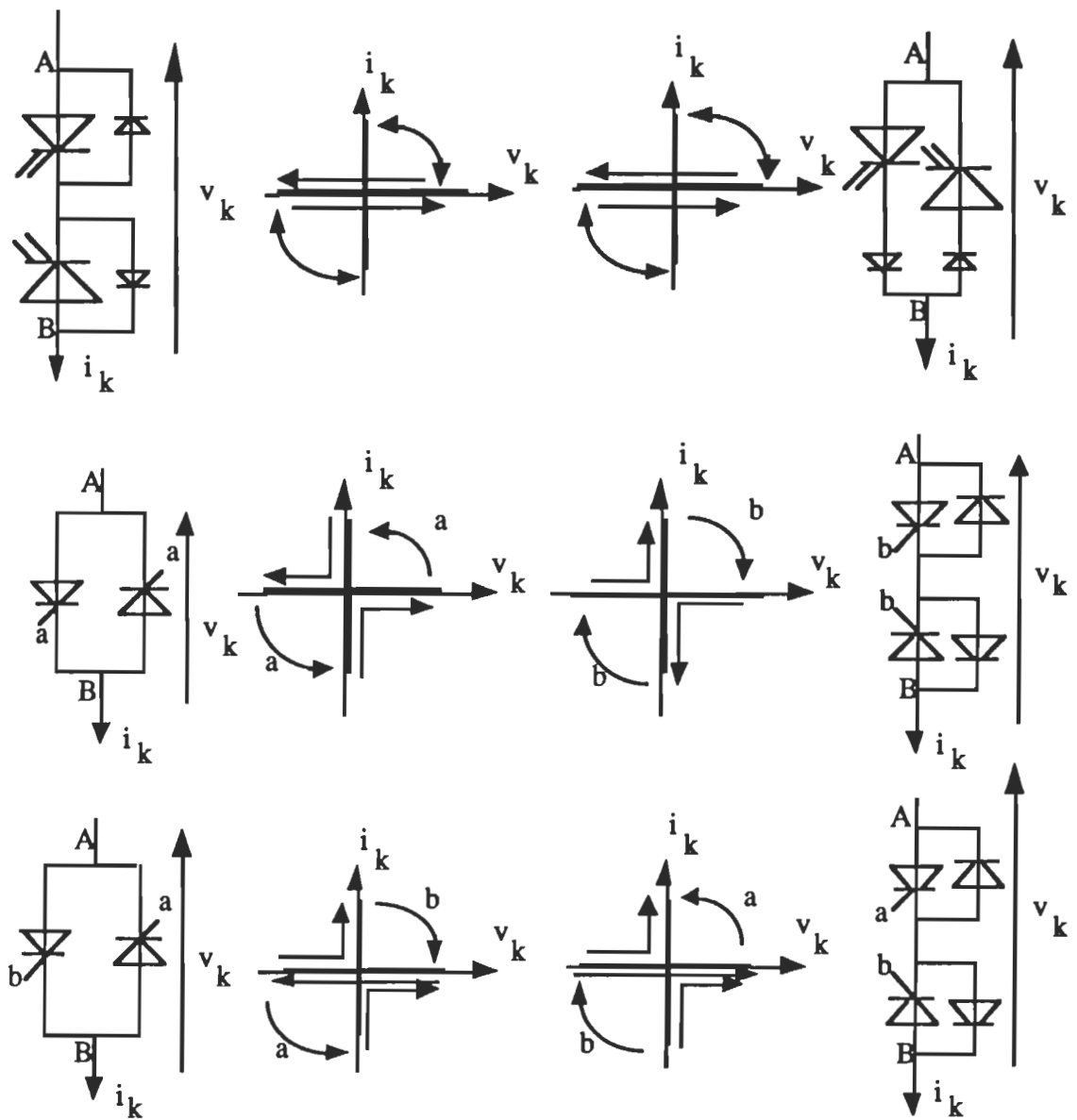


Fig. I.9 Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs à quatre segments

## I.4 CARACTÉRISATION DES SOURCES

### I.4.1 Notion de sources

Lorsqu'on désire faire la synthèse d'un convertisseur, les seuls éléments connus sont les sources d'entrée et de sortie. Les entrée/sortie d'un convertisseur peuvent se caractériser comme des sources (génératrices ou réceptrices) de tension ou de courant, unidirectionnelles ou bidirectionnelles en tension et/ou en courant. Tout dipôle électrique connecté à l'entrée ou à la sortie d'un convertisseur statique appartient donc à l'une des huit catégories représentées dans la figure I.10. Les flèches désignent les réversibilités du courant et les signes (+ -) les réversibilités de la tension.

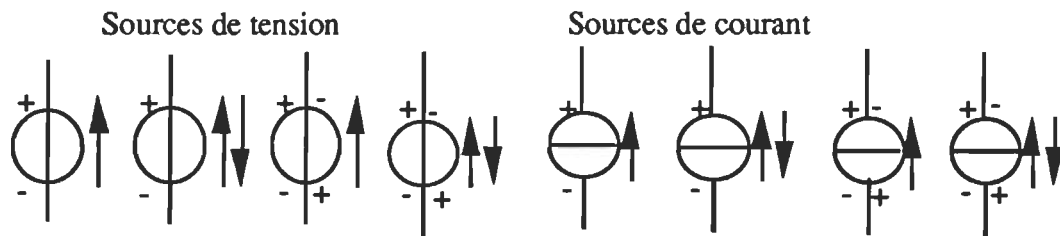


Fig.I.10 Réversibilités des sources

### I.4.2 Nature des sources

Le principe de fonctionnement des convertisseurs repose sur le fonctionnement en commutation des interrupteurs qui les composent. Ces commutations d'interrupteurs impliquent des commutations très rapides de courant et/ou de tension et, vis à vis du convertisseur, le comportement transitoire des sources est donc de première importance. Ce comportement est caractérisé par son aptitude ou son inaptitude à subir des discontinuités de la tension à ses bornes ou du courant qui la parcourt [3], ces

[discontinuités étant provoquées par le circuit extérieur. Deux types de sources peuvent être ainsi définis:

- les sources de tension dont la tension aux bornes ne peut pas subir de discontinuité;
- les sources de courant dont le courant qui la traverse ne peut pas subir de discontinuité.

#### I.4.3 Règles d'interconnexion des sources

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique relie par l'intermédiaire de ses interrupteurs, les sources entre lesquelles il assure et contrôle l'échange d'énergie.

Les règles d'interconnexion entre la source d'entrée et la source de sortie d'un convertisseur, qui orientent la conception des structures de convertisseurs, s'énoncent telles que suit:

- une source de tension ne doit jamais être court-circuité mais elle peut être ouverte;
- une source de courant ne doit jamais être ouverte mais elle peut être court-circuitée;
- il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature; cela revient à dire qu'on ne peut connecté entre elle qu'une source de courant et une source de tension.

### I.5 STRUCTURE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Les structures des convertisseurs découlent logiquement de la nature des générateurs et des récepteurs qui leurs sont associés. Elle dépendent en outre des réversibilités d'énergie souhaitées et du mode de réglage de ces transferts d'énergie. Une

conversion d'énergie électrique peut être réalisée par une ou plusieurs structures, avec un ou plusieurs étages intermédiaires de conversion. Lorsque cette conversion est faite sans étage intermédiaire apte à stocker temporairement de l'énergie, cette conversion est dite directe et elle est réalisée par un **convertisseur direct**. Au contraire, lorsque cette conversion est réalisée avec un ou plusieurs étages aptes à stocker temporairement de l'énergie, cette conversion est dite indirecte et elle est réalisée par un **convertisseur indirect**.

### I.5.1 Structure des convertisseurs directs

Dans un tel convertisseur, le transfert d'énergie s'effectue directement entre l'entrée et la sortie et, si les pertes dans le convertisseur sont négligées, la puissance à l'entrée du convertisseur est à chaque instant égale à la puissance à sa sortie. Dans ces conditions, si la source d'entrée d'un convertisseur direct est une source de tension (respectivement de courant), la sortie du convertisseur se comporte telle une source de tension (respectivement de courant) et ne peut être fermée que sur une source de courant (respectivement de tension) (Fig. I.11). L'entrée (respectivement la sortie) d'un convertisseur direct est de même nature que la source de sortie (respectivement la source d'entrée).



Fig. I.11 Synoptique d'un convertisseur statique direct

Compte tenu des règles d'interconnexion des sources énoncées précédemment, les différentes connexions possibles entre une source de tension et une source de courant sont représentées à la figure I.12. La structure la plus générale qui permet de réaliser ces connexions est la structure en pont à quatre interrupteurs [2] (Fig. I.13).

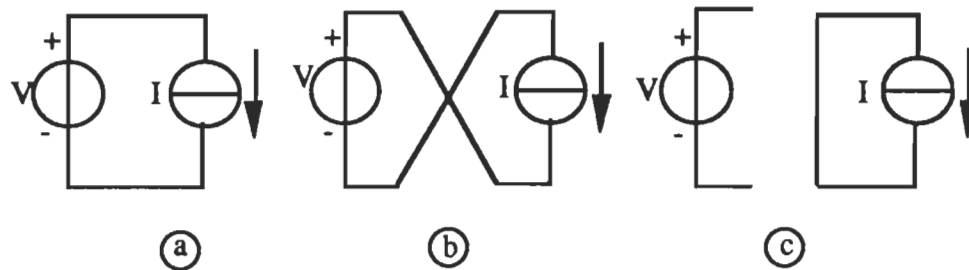


Fig. I.12 Possibilités d'interconnexions d'une source de tension (V) et d'une source de courant (I)

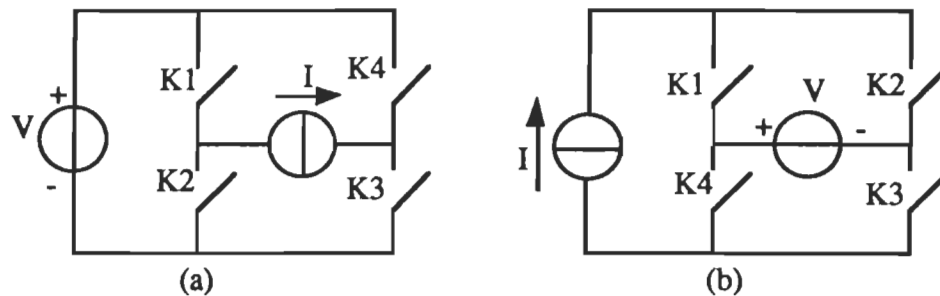


Fig. I.13 Configurations de base d'un convertisseur direct

### I.5.2 Convertisseurs indirects

Un convertisseur indirect est généralement constitué par une association de convertisseurs directs et d'éléments réactifs (inductances et condensateurs). L'énergie électrique échangée entre les sources d'entrée et de sortie transite donc par ces éléments sans perte de puissance active. Dans son principe un convertisseur indirect résulte de l'association en cascade d'au moins deux convertisseurs directs, deux de ces convertisseurs directs étant reliés par un étage intermédiaire ne comportant que des

éléments purement réactifs. Un convertisseur indirect donne la possibilité de contrôler indépendamment les différentes grandeurs sur chaque convertisseur direct [3].

La conversion indirecte d'énergie est principalement utilisée lorsque les deux sources à interconnecter par le convertisseur sont de même nature, un étage intermédiaire de nature différente de celle des sources en présence étant indispensable. Cet étage tampon est une source de tension si le transfert doit avoir lieu entre deux sources de courant (Fig. I.14a) ou bien une source de courant si le transfert d'énergie doit avoir lieu entre deux sources de tension (Fig. I. 14b).

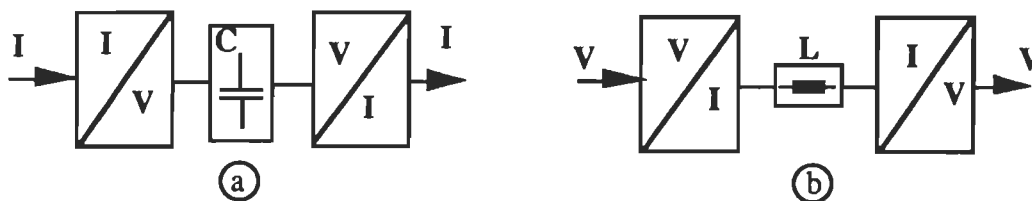


Fig. I.14 Utilisation d'un étage tampon

Certains convertisseurs peuvent aussi être simplifiés en supprimant un certain nombre d'interrupteurs lorsqu'on utilise un élément de stockage (inductance ou condensateur) faisant partie du fonctionnement propre du convertisseur [1,2]. Dans ces convertisseurs indirects, les deux sources de tension (respectivement de courant) ne sont jamais reliées simultanément à l'inductance  $L$  (Fig. I.15) (respectivement le condensateur  $C$ , figure I.16).

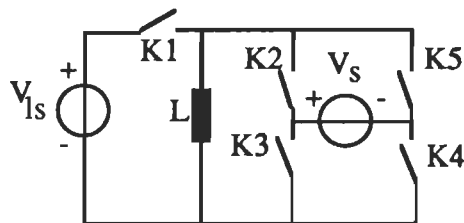


Fig. I.15 Convertisseur indirect tension-tension à accumulation inductive

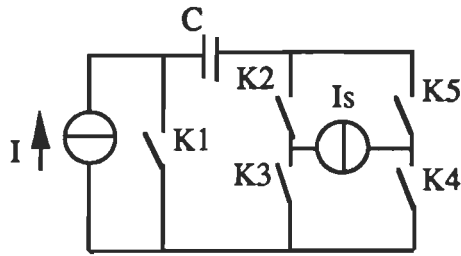


Fig. I.16 Convertisseur indirect courant-courant à accumulation capacitive

## I.6 CLASSIFICATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Un panorama général des structures des convertisseurs statiques peut être donné par le tableau à double entrée de la figure I.17.

Dans ce tableau, les sources d'entrée et de sortie sont rangées tel que les sources 1 et 8, 2 et 7, 3 et 6, 4 et 5 soient duales (voir chapitre II). Ce tableau est divisé en quatre régions:

- dans la région II et III se trouvent les convertisseurs directs;
- dans la région I, les convertisseurs indirects tension-tension;
- dans la région IV les convertisseurs indirects courant-courant.

Les cases barrées correspondent à des incompatibilités de réversibilité entre source d'entrée et source de sortie [2]. Les cases symétriques par rapport à la diagonale principale (D) sont occupées par des montages identiques chaque fois que le montage considéré est réversible en puissance. Les cases symétriques par rapport au point (O) sont des montages duaux (voir chapitre II).

(D)

entrée sortie (E) (S)	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
1		X	X			X	X	
2	X		I				III	X
3	X							X
4								
5								
6	X		II				IV	X
7	X							X
8		X	X			X	X	

Fig. I.17 Tableau général des convertisseurs statiques



## I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a principalement caractérisé les éléments fondamentaux des convertisseurs statiques que sont les interrupteurs et les sources, les règles essentielles qui régissent leur bon fonctionnement ainsi que les structures des convertisseurs directs et indirects. Ces notions permettent de bien cerner la fonction à réaliser par un convertisseur et d'en établir la structure en ne tenant pas compte des phénomènes secondaires et souvent complexes.

Dans toute la suite, seuls les convertisseurs directs (tension-courant et courant-tension) seront étudiés.

## CHAPITRE II

### LA DUALITÉ DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

#### II.1 INTRODUCTION

La transformation duale est devenue un outil très utile dans le domaine de l'électronique de puissance. Le concept de la dualité est utilisé pour générer de nouvelles topologies de convertisseurs, pour promouvoir la compréhension des relations entre les convertisseurs existants et pour modéliser électriquement des interrupteurs duaux. Les éléments constitutifs des convertisseurs sont principalement des interrupteurs et des éléments réactifs. Parmi ces éléments il existe une relation de bijection qui associe à chaque élément possédant certaines propriétés en tension (respectivement en courant) un autre élément possédant les mêmes propriétés en courant (respectivement en tension). Cette relation est la dualité.

Après avoir rappelé quelques notions de base sur la dualité dans les graphes et les circuits [5, 6], on montre comment étendre ce concept aux circuits d'électronique de puissance.

## II.2 LA DUALITÉ DANS LES GRAPHES ET LES CIRCUITS

La théorie de la dualité est généralement appliquée à une certaine classe spéciale des graphes appelés graphes planaires. Un graphe  $G$  est dit planaire s'il peut être dessiné sur un plan tel que ses branches ne se coupent qu'à travers des noeuds (Fig. II.1).

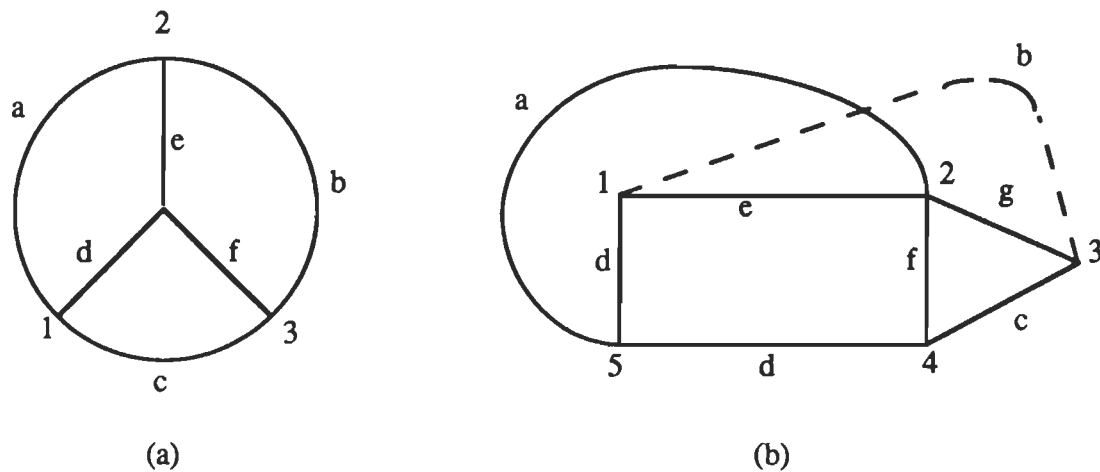


Fig. II.1 Graphes: planaire (a) et non planaire (b)

Une maille est une boucle n'ayant aucune branche à son intérieur. De façon analogue une boucle qui ne contient aucune branche à l'extérieur est une boucle extérieure.

Deux graphes planaires  $G$  et  $G^*$  sont duaux si:

- il y a une correspondance entre les mailles de  $G$  et les noeuds de  $G^*$  et vice versa, une correspondance entre les branches de chaque graphe, tel que la branche commune à deux mailles, correspond à une branche connectée aux noeuds qui correspondent aux maillons du premier graphe.

Deux circuits électriques  $N$  et  $N^*$  sont duaux si:

- les graphes qui leurs sont associés sont duaux;

• les éléments, placés sur les branches duales  $B$  et  $B^*$  appartenant à chacun de ces graphes, sont duaux.

Interchanger la tension et le courant seulement va violer la loi de Kirchoff dans un circuit électrique et n'est donc pas possible. La seconde étape dans la transformation duale change la topologie du circuit de telle sorte que les mailles et les noeuds soient interchangés. Cette étape topologique, combinée avec les éléments duaux, assurent la satisfaction de la loi de Kirchoff.

Les équations d'une branche de  $N^*$  sont obtenues en utilisant la substitution suivante:

$$v \rightarrow i^*, i \rightarrow v^*, q \rightarrow \varphi^* \text{ et } \varphi \rightarrow q^* \quad (1)$$

où  $v$ ,  $i$ ,  $q$  et  $j$  sont respectivement la tension, le courant, la quantité d'électricité et le

flux de la branche  $B$ .

À partir de cette correspondance on déduit la substitution duale suivante:

$$L \rightarrow C^*, C \rightarrow L^*, r \rightarrow g^* \text{ (} g^* = 1/r \text{) et } ir \rightarrow v^*g^* \quad (2)$$

### II.3 ALGORITHME DE CONSTRUCTION D'UN GRAPHE DUAL ET D'UN CIRCUIT DUAL

Le graphe dual  $G^*$  d'un graphe planaire  $G$  peut être obtenu si:

- pour chaque maille du graphe  $G$  on associe un noeud dans  $G^*$ . À la fin, un noeud additionnel est placé à l'extérieur du graphe  $G$  qui correspond à la maille extérieure;
- pour chaque branche nommée  $b$  de  $G$  qui est commune à deux mailles de  $G$ , on associe une branche duale connectée aux noeuds de  $G^*$  correspondants aux mailles de  $G$ ;

• en donnant l'orientation des courants (respectivement des tensions) dans le graphe G, l'orientation des tensions (respectivement des courants) dans les branches du graphe dual s'obtient par rotation de  $90^\circ$  dans le sens horaire du courant (respectivement de la tension) dans la branche du graphe original, comme montré à la figure II.2.

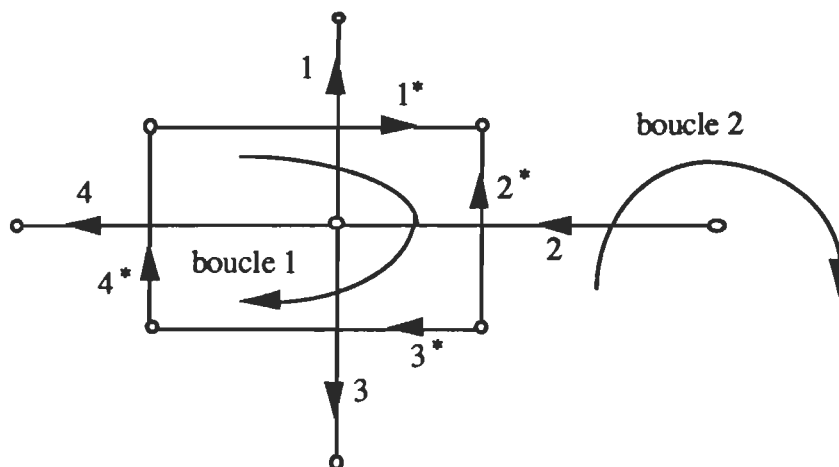


Fig. II.2 Orientation du graphe dual

La construction du circuit dual orienté nécessite seulement les étapes additionnelles de la substitution duale (1) et (2) dans chacune des branches. La loi des mailles pour le circuit de la figure II.3a s'écrit:

$$V_1 + V_2 + V_3 - V_4 = 0$$

$$V_4 + V_5 + V_6 = 0$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_5 + V_6 = 0$$

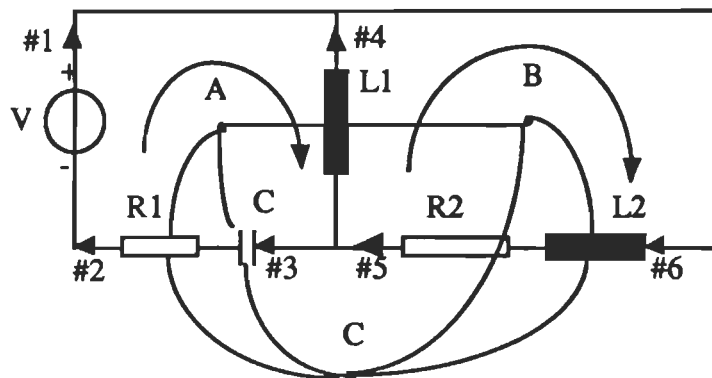
Pour les noeuds A, B et C, la loi des noeuds s'écrit par dualité:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0 \quad (3)$$

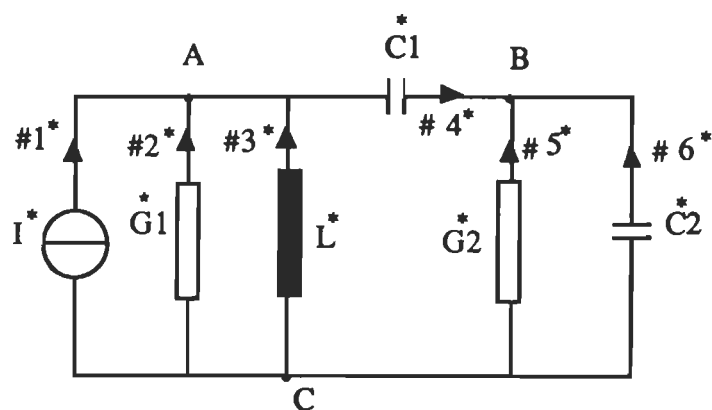
$$I_4 + I_5 + I_6 = 0 \quad (4)$$

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_5 + I_6 = 0 \quad (5)$$

L'orientation des branches du circuit de la figure II.3b est directement déduite des expressions (3), (4) et (5).



(a)



(b)

Fig. II.3 Exemple de recherche d'un circuit dual  
 a) circuit et graphe du circuit dual  
 b) circuit dual

La détermination du signe des grandeurs duales est fondamentale surtout lorsque les circuits comportent des éléments unidirectionnels.

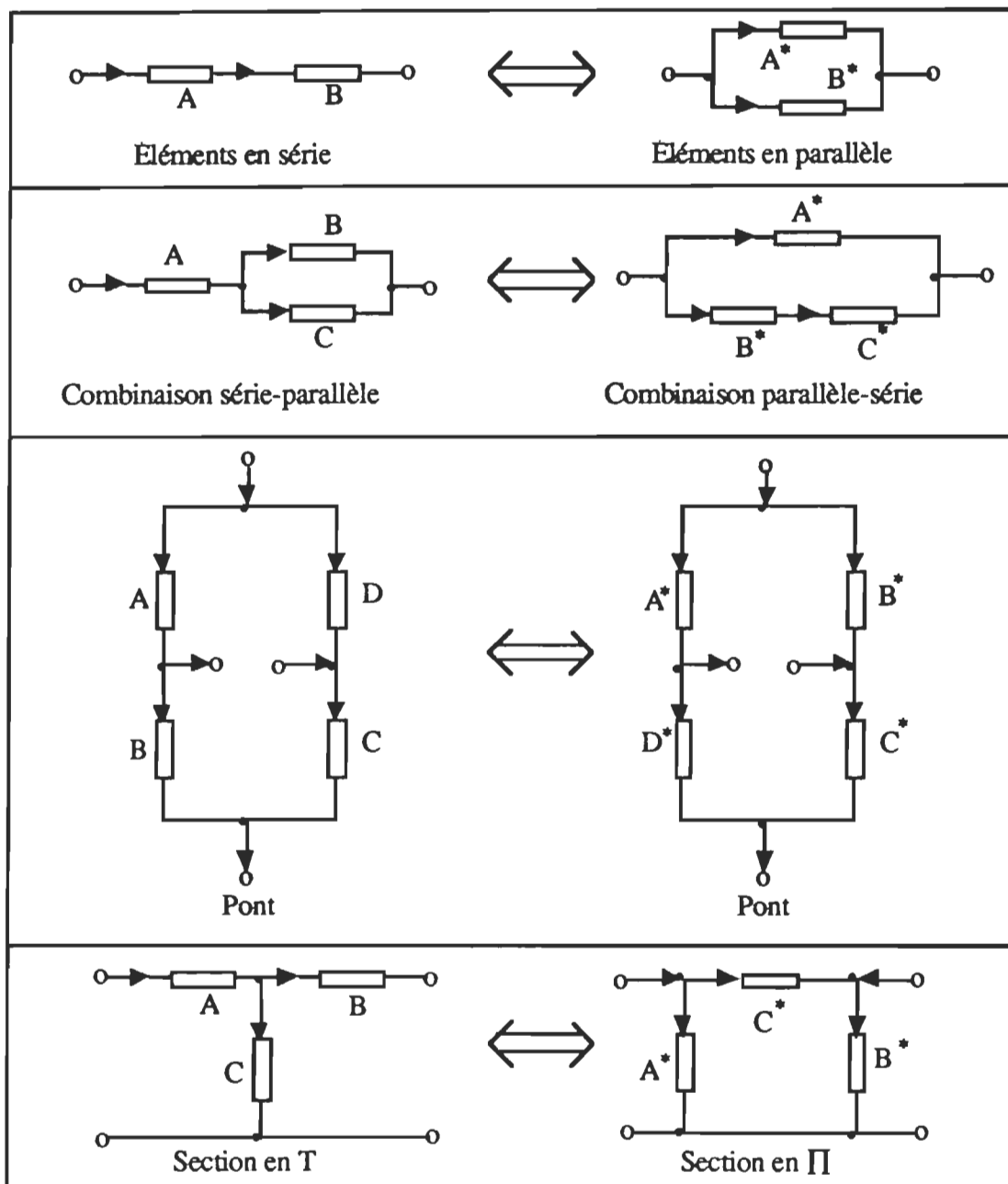


Fig. II.4 Structures duales des sections d'un circuit

Les différentes parties électriques d'un circuit peuvent être transformées en conservant soigneusement l'orientation des bornes non connectées (une méthode consiste à connecter un élément fictif entre les bornes ouvertes, effectuer la transformation du circuit, puis

enlever l'élément fictif). Des exemples de structures duales présentant des interconnexions courantes sont données dans le tableau de la figure II.4 [8].

#### II.4 INTERRUPTEURS STATIQUES DUAUX

La notion de la dualité peut être étendue aux convertisseurs statiques qui sont fondamentalement des circuits électriques. Néanmoins, pour être complètement applicable, elle nécessite la connaissance des éléments duaux des interrupteurs.

Dans la recherche des circuits duaux en électronique de puissance, certains auteurs [7] ont décomposé le convertisseur en ses différentes séquences possibles de fonctionnement, et ils ont remplacé les interrupteurs fermés (respectivement ouverts) par des court-circuits (respectivement des circuits ouverts) dans les circuits associés à chacune de ces séquences. L'application des règles de la dualité à chacun de ces circuits permet d'obtenir les circuits associés aux différentes séquences de fonctionnement du convertisseur dual qu'il faut alors identifier. Cette méthode permet de déterminer les caractéristiques statiques des interrupteurs mais elle ne donne aucune information sur les caractéristiques dynamiques ou le mode de commutation des interrupteurs pour passer d'une séquence à une autre.

Le tableau de la figure II.5 [4, 8] présente différents interrupteurs à deux, trois et quatre segments et montre les relations de dualité qui existent entre eux, où "a" et "b" représentent respectivement les commandes à l'amorçage et au blocage. La figure II.5 indique les conventions des signes du courant traversant les interrupteurs et de la tension à leurs bornes.

Les interrupteurs à deux segments (la diode et les composants types "transistors") sont les duaux d'eux mêmes. L'interrupteur qui possède un amorçage commandé et un blocage



spontané est de type "thyristor" (associé ou non à une diode en antiparallèle). On peut concevoir un interrupteur dual qui ne correspond à aucun composant discret existant (associé ou non à une diode en série) mais qui possède la caractéristique duale à celle d'un thyristor. Cet interrupteur est appelé "thyristor dual". Cet interrupteur est fabriqué uniquement par synthèse (association de composants et logique adaptée). En ce qui concerne l'interrupteur à trois segments qui possède un amorçage et un blocage commandé, transistor avec une diode en antiparallèle, l'application de la dualité conduit à un interrupteur qui est l'association en série d'un transistor et d'une diode. Les interrupteurs possédant une caractéristique statique à quatre segments ont des interrupteurs duaux qui sont bâtis selon le même principe.

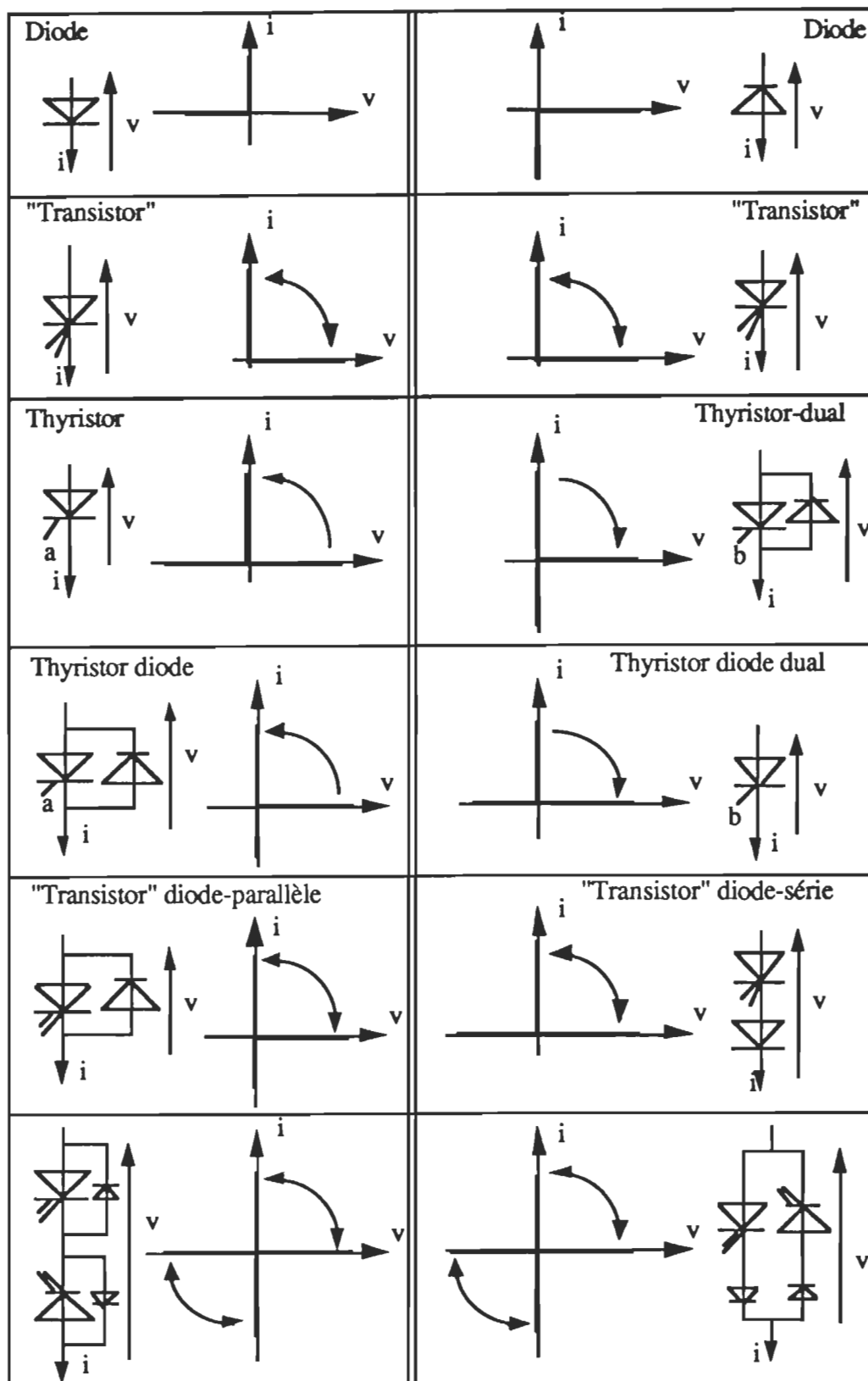


Fig. II.5 Relation de dualité entre les interrupteurs

## II.5 LE THYRISTOR DUAL

Le thyristor dual ("Zero Voltage Switch, ZVS") s'amorce si sa commande le permet et si la tension à ses bornes est nulle; il se bloque par un signal de commande lorsqu'il est parcouru par un courant positif. Les propriétés du thyristor et du thyristor dual sont rassemblées dans le tableau comparatif de la figure II.6 [9].

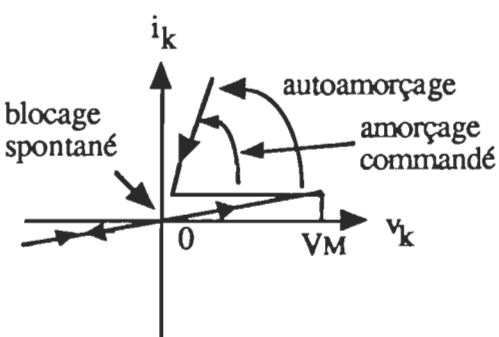
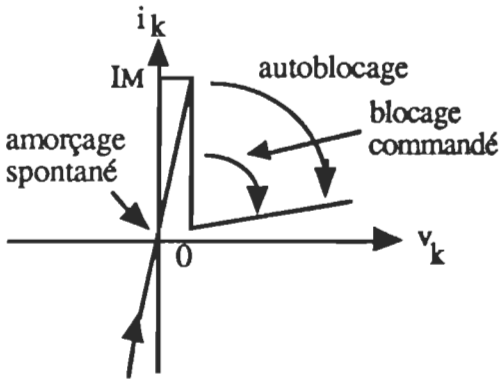
Thyristor	Thyristor-dual
	
Condition d'amorçage: $v_k > 0$ + commande d'amorçage	Condition de blocage: $i_k > 0$ + commande de blocage
Condition de blocage: $i_k < 0$	Condition d'amorçage: $v_k < 0$
Autoamorçage si: $v_k \geq V_M$	Autoblocage si: $i_k \geq I_M$
Courant maximal à l'état passant	Tension maximale à l'état bloqué
Nécessité d'une protection contre $di/dt > 0$ à l'amorçage	Nécessité d'une protection contre $dv/dt > 0$ au blocage
Inductance de protection en série	Condensateur de protection en parallèle
Diminution des pertes à l'amorçage	Diminution des pertes au blocage

Fig. II.6 Tableau comparatif des propriétés du thyristor et du thyristor dual

Pratiquement, le thyristor dual est réalisé à l'aide des composants habituels (transistor, diode, etc ...) et de logiques spécifiques de commande.

## II.6 APPLICATION DES REGLES DE LA DUALITÉ DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

La connaissance des interrupteurs duaux permet de définir complètement les structures duales des convertisseurs statiques. La recherche des structures duales à partir de celles déjà existantes se fait par une méthode semblable à celle appliquée dans le cas des circuits linéaires. Cependant, la présence d'éléments unidirectionnels dans les circuits de convertisseurs nécessite de connaître l'orientation des branches du circuit dual au positionnement des éléments corrélatifs sur ces branches. La méthode de recherche du convertisseur dual d'un convertisseur donné (§ II.3 ) est tout à fait générale. Elle est appliquée ici dans la recherche du convertisseur dual d'un hacheur à thyristor à commutation forcée (Fig. II.7).

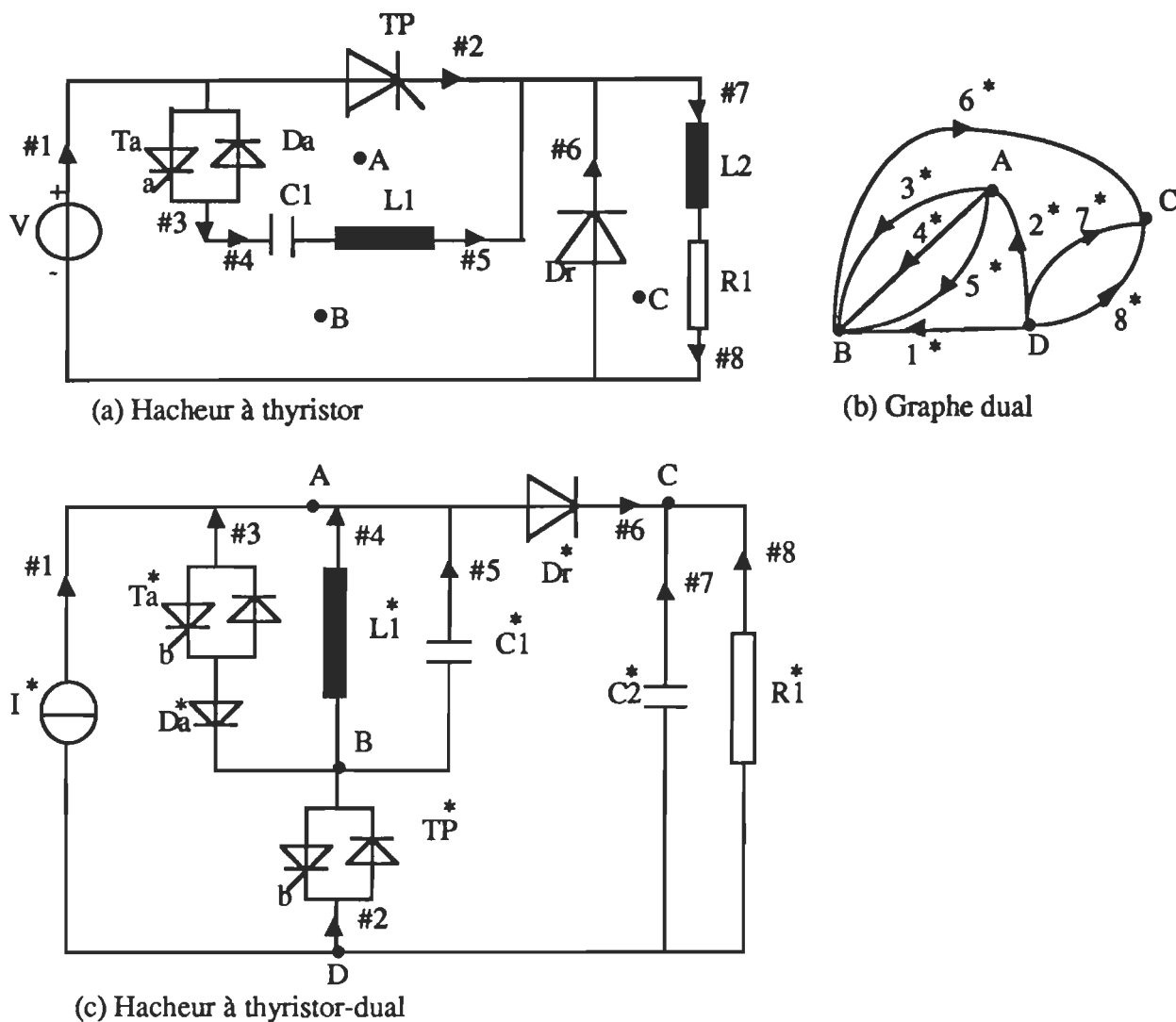


Fig. II.7 Recherche du convertisseur dual d'un hacheur à thyristor à commutation forcée

La structure de base des convertisseurs statiques directs tension-courant (Fig. II.8a) est la structure en pont à quatre interrupteurs. Cette structure est invariante par dualité. Il suffit de remplacer tous les éléments par leurs duaux et permuter  $K^*2$  et  $K^*4$ . Par dualité, on obtient la structure de base des convertisseurs courant-tension (Fig. II.8b).

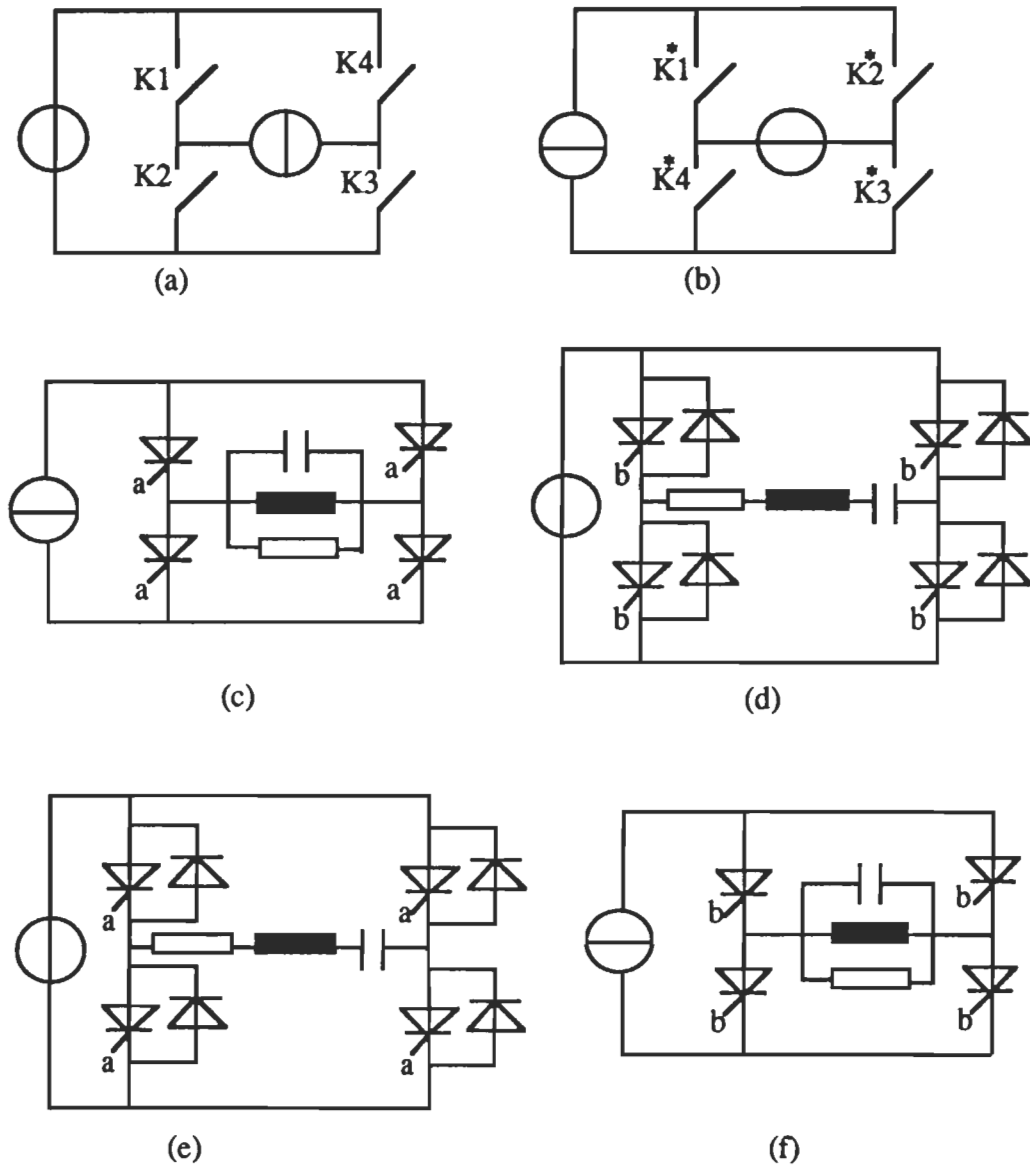


Fig. II.8 Recherche des structures duales de quelques convertisseurs statiques directs

Dans les exemples de la figure II.8 la recherche des circuits duaux est basée sur la remarque précédente.

Il est aussi aisé de démontrer que le hacheur abaisseur ("Buck") est le dual du hacheur survolteur ("Boost"), et que le hacheur à stockage capacitif ("Cuk converter") est le dual du hacheur à stockage inductif abaisseur-élevateur ("Buck-Boost").

## II.7 CONCLUSION

La notion de dualité n'est certes pas nouvelle dans les convertisseurs, elle a déjà été largement utilisée dans la présentation des convertisseurs moyenne fréquence tel que l'onduleur série à thyristors ( Fig. II.8c et Fig. II.8e).

Ces convertisseurs ont des structures duales mais des mécanismes de commutation identiques. En d'autres termes, les interrupteurs qui composent ces convertisseurs ont des caractéristiques statiques duales mais des caractéristiques dynamiques qui sont parcourues dans le même sens.

Plusieurs résultats bénéfiques peuvent être obtenus une fois que les relations de la dualité sont connues. Spécifiquement, par l'utilisation du principe de la dualité, toutes les propriétés et les résultats quantitatifs trouvés pour l'un des convertisseurs peuvent être transférés à son dual, ce qui réduit de moitié le nombre de convertisseurs à étudier.

## CHAPITRE III

### COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

#### III.1 INTRODUCTION

Le fonctionnement d'un convertisseur statique se décompose en une succession de séquences élémentaires. A chaque séquence élémentaire correspond un réseau électrique maillé différent du précédent, obtenu par la modification de l'interconnexion des différentes branches actives. L'analyse du processus qui permet effectivement ces modifications successives, sans contraintes excessives sur les éléments du dispositif et le plus rapidement possible, est donc indispensable pour la recherche des structures permettant d'exploiter dans les meilleures conditions les dispositifs semi-conducteurs et de minimiser les pertes et les émissions perturbatrices [10].

Une analyse fine des mécanismes de commutation dans les convertisseurs statiques, fondée sur les notions fondamentales d'interrupteurs, de commutation commandée ou spontanée et de cellule de commutation est présentée dans ce chapitre.

#### III.2 CELLULE DE COMMUTATION

Le processus de modifications successives du réseau fait appel à un dispositif statique réalisé par un groupement en étoile d'interrupteurs électroniques (Fig. III.1). Les



branches du circuit reliées à ce dispositif statique sont soumises aux règles d'interconnexion des sources. Il en résulte que [11]:

- chaque interrupteur est connecté à une branche tension si non l'ouverture d'un interrupteur provoquerai l'ouverture d'une source de courant,
- le nœud de l'étoile est connecté à une branche courant car une source de tension ne peut être connectée qu'à une source de courant par l'intermédiaire d'un interrupteur contrôlé,
- à chaque instant, un et un seul interrupteur est passant afin de ne pas connecter deux sources de tension entre elles et de ne pas ouvrir la source de courant.

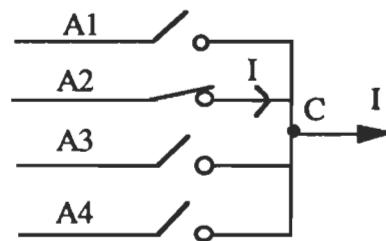


Fig. III.1 Dispositif de commutation réalisé par un groupement en étoile d'interrupteurs.

Le fonctionnement de ce dispositif met en jeu un ensemble complexe de phénomènes qui accompagnent les changements d'états simultanés et complémentaires de deux interrupteurs et que l'on regroupe sous le terme général de commutation.

En conséquence, si l'on s'intéresse à ces phénomènes de commutation, le nombre d'interrupteurs du dispositif statique n'intervient pas, et chaque commutation ne met en jeu que deux interrupteurs et deux seulement. Ce qui amène donc à ne considérer qu'une cellule de commutation [1] telle que représentée à la figure III.2. La source de tension symbolise la différence de potentiel  $V_1 - V_2$  imposée entre les points  $A_1$  et  $A_2$  par les branches de tension qui leur sont associées. La source de courant I est représentative du

courant maillon dans la branche connectée au point C, en étoile avec les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  concernés par la commutation.

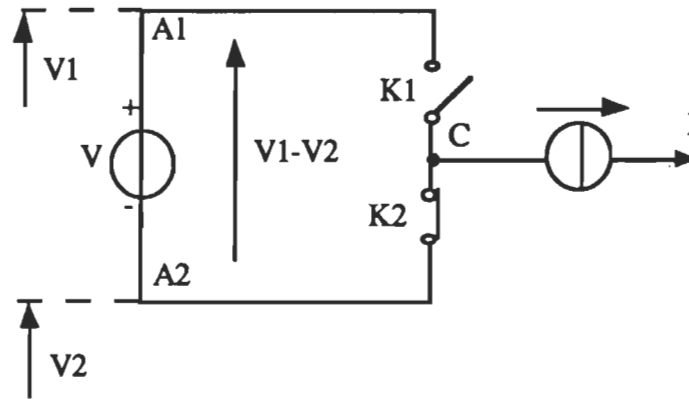


Fig. III.2 La cellule de commutation

Cette cellule permet, en fonction des contraintes électriques qui sont imposées avant, pendant et après la commutation, l'analyse du mode de fonctionnement des deux interrupteurs et leur caractérisation.

La figure III.3 représente quelques structures de base de convertisseurs, sur lesquelles les interrupteurs ont été regroupés pour bien faire apparaître les cellules de commutation élémentaires [4].

La commutation est fondamentalement liée au fonctionnement de deux interrupteurs (amorçage et blocage). Elle présente un aspect local et un aspect système.

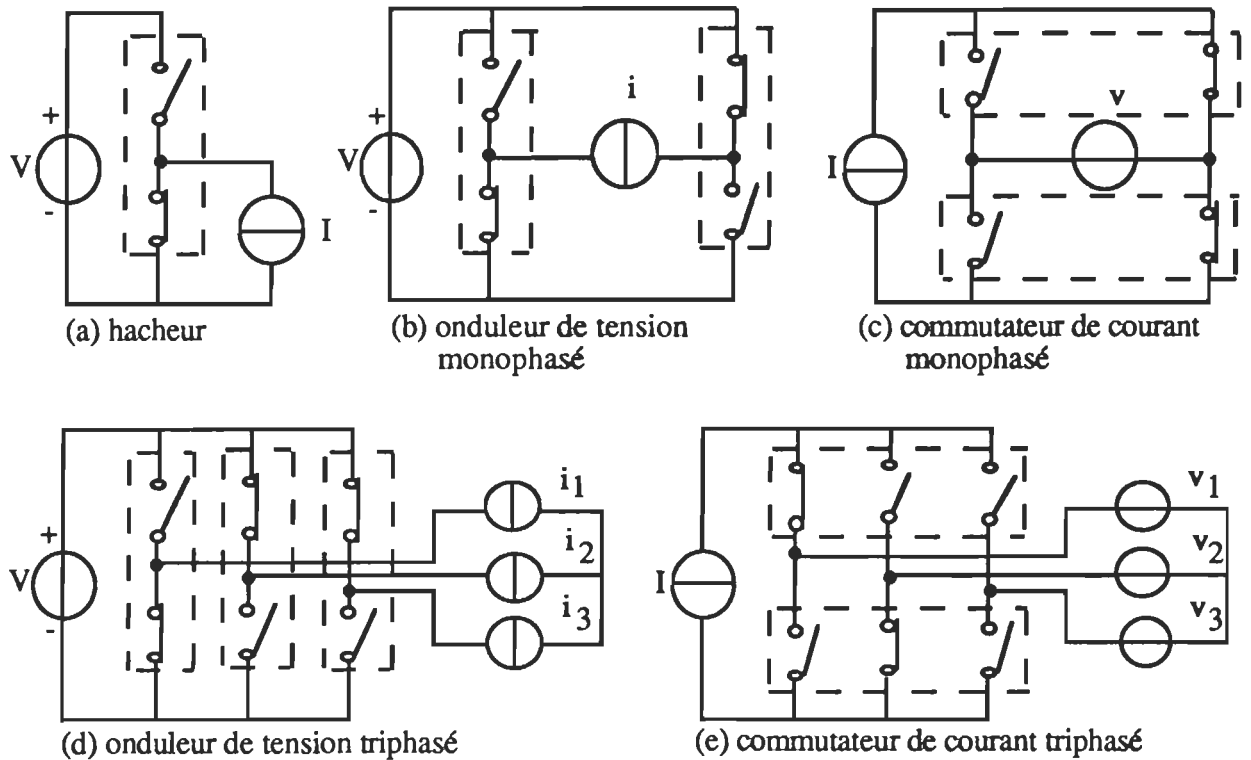


Fig. III.3 Exemples de structures classiques faisant apparaître les cellules de commutation

### III. 3 ASPECT LOCAL DE LA COMMUTATION

L'aspect local de la commutation d'un interrupteur [1] est relatif aux modes de fonctionnement de l'interrupteur et à la manière dont son basculement peut ou doit s'effectuer, du point de vue strictement local, c'est à dire limité au seul dipôle constitué par le modèle électrique, plus ou moins complexe, de l'interrupteur. Les caractéristiques statiques et dynamiques des interrupteurs ainsi que les règles qui lient ces deux types de caractéristiques, dont on a parlé au premier chapitre, représente l'aspect local de la commutation.

Ces règles font justement apparaître la dépendance du fonctionnement d'un interrupteur vis-à-vis de son environnement.

### III.4 ASPECT SYSTEME DE LA COMMUTATION

L'aspect local de la commutation se limite à l'étude des caractéristiques propres d'un interrupteur à l'amorçage et au blocage.

L'aspect système [1] concerne la manière dont doivent effectivement fonctionner les deux interrupteurs, associés dans une même cellule élémentaire de commutation, pour que la commutation s'effectue correctement, compte tenu des contraintes électriques imposées par le circuit extérieur. Par la suite, on supposera parfaites les sources de courant et de tension.

#### III.4.1 Loi fondamentale de la commutation

Considérons la cellule de commutation de la figure III.4. Avec les conventions arbitraires de signes définies sur cette figure, on peut écrire en permanence:

$$v_{k1} + v_{k2} = V_1 - V_2 = V \quad (6)$$

$$i_{k1} - i_{k2} = I \quad (7)$$

$V$  et  $I$  sont des grandeurs invariables à l'échelle de la commutation.

Avant et après la commutation, les états de deux interrupteurs sont complémentaires. Cela définit, sur les caractéristiques statiques, les points de fonctionnement correspondants, représentés sur la figure III.5, en supposant  $V > 0$  et  $I > 0$ . Pendant la commutation, le point de fonctionnement de chaque interrupteur doit se déplacer sur sa propre caractéristique dynamique, de manière simultanée, de façon que les relations (6) et (7) soient continûment vérifiées. Les caractéristiques dynamiques de deux interrupteurs se situent dans deux quadrants adjacents et, cela, quels que soient les signes respectifs de  $V$  et de  $I$ :

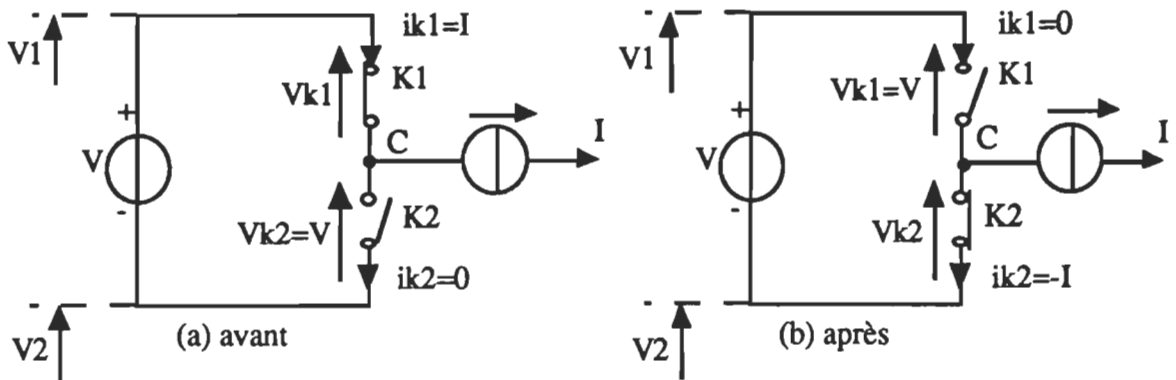


Fig. III.4 Cellules élémentaires avant et après la commutation

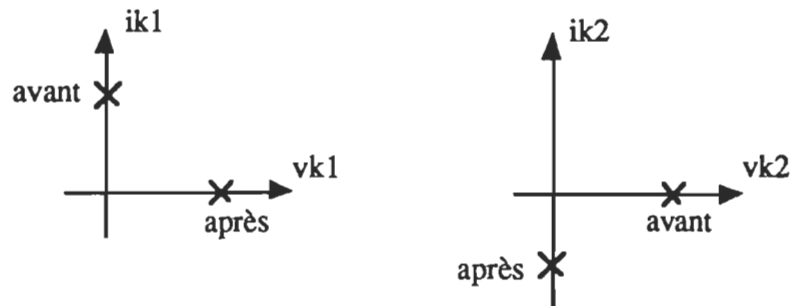


Fig. III.5 Caractéristiques statiques des deux interrupteurs

- l'un de ces deux quadrants a deux demi-axes de même signe; l'interrupteur correspondant ( $K_1$ ) doit donc obéir à un mode de commutation de type commandé;
- par contre, le deuxième quadrant a forcément deux demi-axes de signes contraires, l'interrupteur  $K_2$  doit obéir à un mode de commutation de type spontané.

C'est donc la commande de l'un des deux interrupteurs, soit à l'amorçage soit au blocage, qui provoque la commutation et entraîne le changement d'état spontané de l'autre interrupteur. Les caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs restent toujours liées par les conditions (6) et (7). Comme le second interrupteur subit un changement d'état spontané, qui oblige son point de fonctionnement à suivre les axes (Fig. III.6), le point de fonctionnement de l'interrupteur commandé se déplace simultanément dans le plan  $i_k(v_k)$  suivant une caractéristique dynamique quasi-rectangulaire.

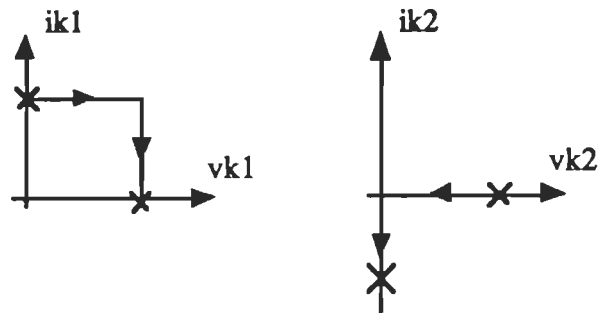


Fig. III.6 Caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs

#### III.4.2 Modes de commutation

Pour différencier, de façon systématique, les deux modes possibles de commutation dans une cellule de commutation:

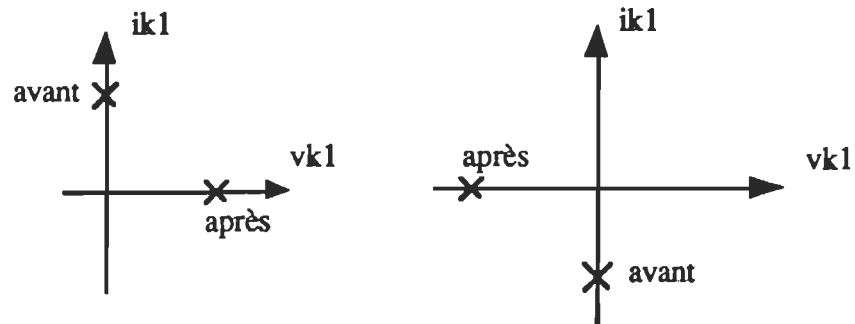
- commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert
- et commutation par commande au blocage de l'interrupteur fermé,

il suffit de déterminer les points de fonctionnement des deux interrupteurs sur leur caractéristiques  $i_k(v_k)$ , avant et après la commutation.

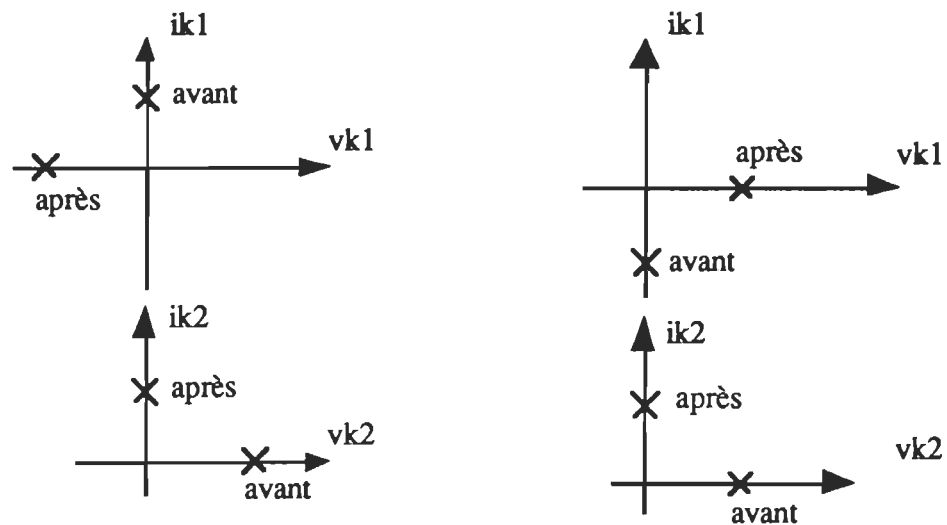
Supposons que l'interrupteur soit passant avant la commutation:

- si le courant qui le traverse avant la commutation est de même signe que la tension à ses bornes après la commutation, celle-ci s'effectue par commande au blocage de cet interrupteur (Fig. III.7a);

- si ces deux grandeurs sont de signes contraires (interrupteur K1), la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur (interrupteur K2) est nécessaire (Fig. III.7b).



(a) Commande au blocage de l'interrupteur passant K1



(b) Commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué K2

Fig. III. 7 Détermination du mécanisme de commutation

Mais il est plus intéressant de rattacher le mode de commutation à l'analyse du fonctionnement du convertisseur et aux formes d'ondes qui en découlent. Celles-ci déterminent en effet, d'une part, le signe du courant  $I$ , d'autre part, le potentiel du nœud de commutation  $C$  considéré:

- lorsque la commutation entraîne un accroissement du potentiel du point  $C$ , on parle d'une commutation positive (Fig. III.8a);

- dans le cas contraire, on parle d'une commutation négative.

Un accroissement du potentiel du point C (commutation positive) correspond forcément à la fermeture de  $K_1$  et à l'ouverture de  $K_2$ :

- si le courant  $I$  est positif, l'interrupteur  $K_1$  est donc commandé à l'amorçage;
- si le courant  $I$  est négatif,  $K_2$  est commandé au blocage.

Il en découle la règle suivante [1], sur laquelle sera basée la recherche des topologies des convertisseurs statiques directs:

- si la commutation et le courant  $I$  sont de mêmes signes, il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué (Fig. III.8a);

- si la commutation et le courant  $I$  sont de signes contraires, il y a commutation par commande au blocage de l'interrupteur passant (Fig. III.8b).

L'application de cette règle nécessite un respect absolu des conventions de signe utilisées. En particulier, le sens du courant  $I$  doit être compté positivement dans la branche de la source de courant lorsqu'il vient du nœud C.



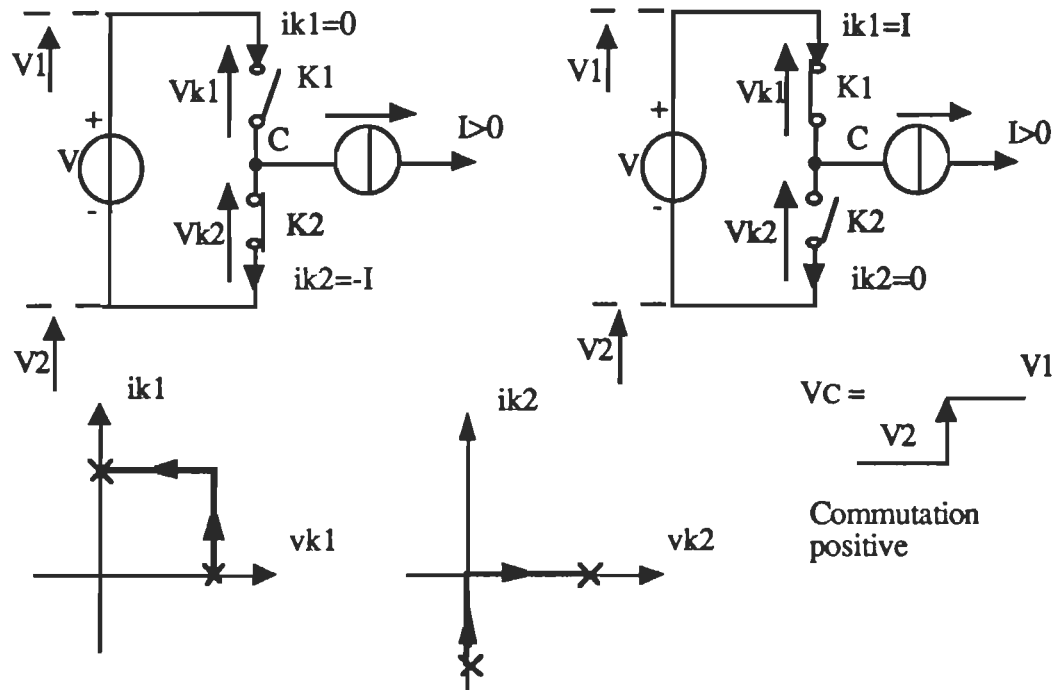
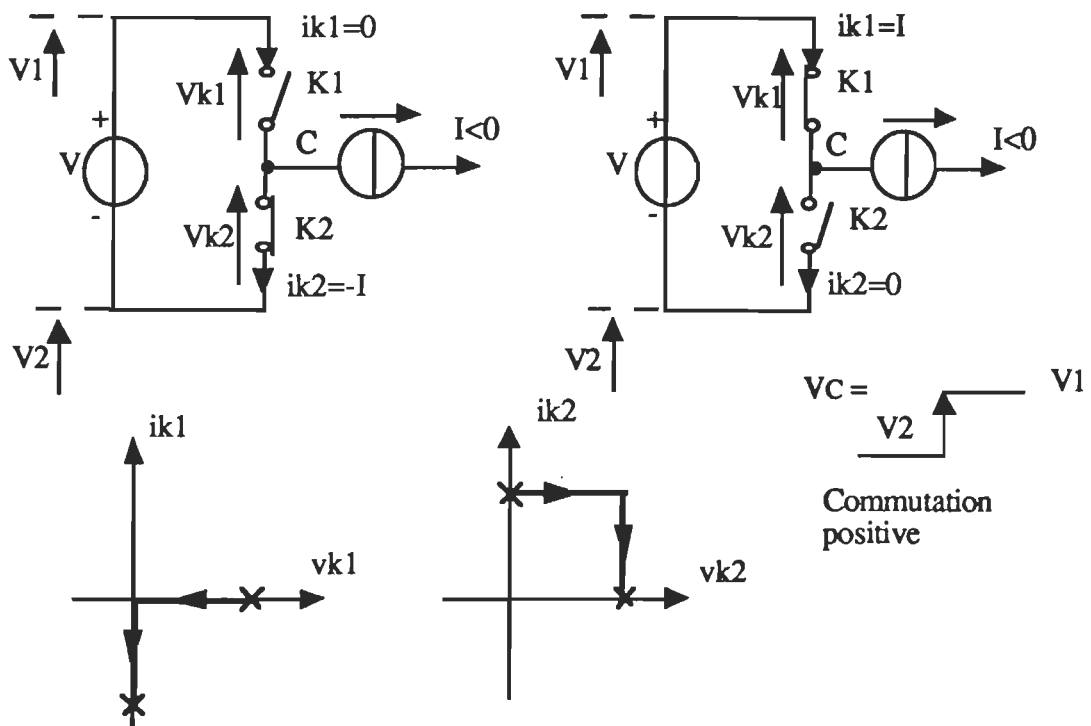
(a) Commutation et courant de même signe  $\Rightarrow$  amorçage de K1(b) Commutation et courant de signes contraires  $\Rightarrow$  blocage de K2

Fig. III.8 Détermination du mécanisme de commutation à partir des signes relatifs du courant et de la variation de potentiel

### III.5 CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les règles fondamentales qui régissent la commutation dans les convertisseurs. L'application de ces règles, compte tenu des conditions de fonctionnement imposées par un convertisseur donné, permet de déterminer le mode de commutation de chacune des cellules élémentaires. La caractérisation des interrupteurs qui les constituent en découle immédiatement. Ceci nous permettra d'effectuer la synthèse des convertisseurs par analyse du fonctionnement des interrupteurs de la cellule de commutation (chapitre V).

## CHAPITRE IV

### SYNTHESE DES CONVERTISSEURS STATIQUES DIRECTS

#### IV.1 INTRODUCTION

La recherche de structures de convertisseurs statiques adaptées aux problèmes spécifiques à résoudre a suscité de nombreuses études tant dans les domaines de pointe que dans les domaines industriels [2, 12, 13, 14, 15].

C'est pourquoi la structure des convertisseurs devient de plus en plus le fruit d'un raisonnement construit.

Les approches actuelles de synthèse des convertisseurs statiques sont généralement basées sur la nature de la conversion d'énergie, continu-continu [14, 15], continu-alternatif [13], etc. D'autres, sont fondées sur l'analyse de toutes les séquences possibles de fonctionnement d'un convertisseur [2] en se basant sur les réversibilités en tension et/ou en courant des sources d'entrée et de sortie.

Une autre méthode se distingue par la présentation du cahier des charges des sources d'entrée et de sortie, et par conséquent, par l'analyse de ce cahier des charges. Elle est basée sur l'analyse des formes d'ondes désirées des sources d'entrée et de sortie du convertisseur.

Dans ce chapitre, on se propose d'analyser la méthode qui traite les séquences possibles de fonctionnement et dans le chapitre suivant celle qui traite les formes d'ondes des sources.

Dans toute la suite, c'est le cas des convertisseurs statiques directs tension-courant (C.S.D.T.C) qui sera traité. Le cas des convertisseurs statiques directs courant-tension (C.S.D.C.T) sera facilement déduit car les deux structures sont duales (chapitre II) et les méthodes de traitement des deux cas sont similaires.

## IV.2 SYNTHESE DES CONVERTISSEURS STATIQUES DIRECTS

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs et permettant, par un choix des séquences de fonctionnement convenables de ces derniers, un transfert d'énergie entre les sources d'entrée et de sortie. Un interrupteur présente deux états stables en régime statique: l'état passant et l'état bloqué. Le passage d'un état à un autre implique le mode de commutation en régime dynamique. Les caractéristiques statiques et dynamiques des principaux interrupteurs ont été défini au chapitre I.

Une classification des C.S.D.T.C selon les réversibilités des sources d'entrée et de sortie en tension et/ou en courant est donnée à la figure I.17.

La structure de base des C.S.D.T.C (Fig. IV.1) présente quatre séquences possibles de fonctionnement: deux séquences d'apport d'énergie (séquences 1 et 3) et deux séquences de récupération (séquences 2 et 4) (Fig. IV.2).

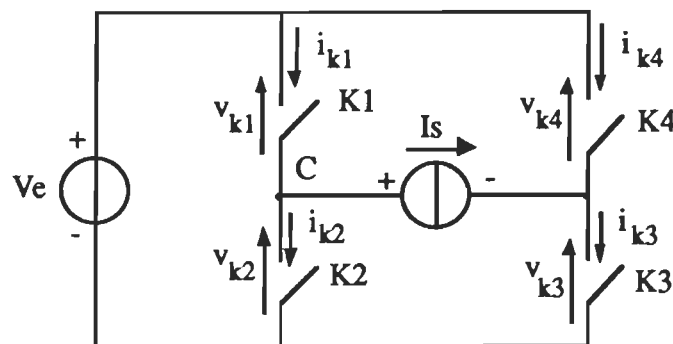


Fig IV.1 Structure de base d'un C.S.D.T.C

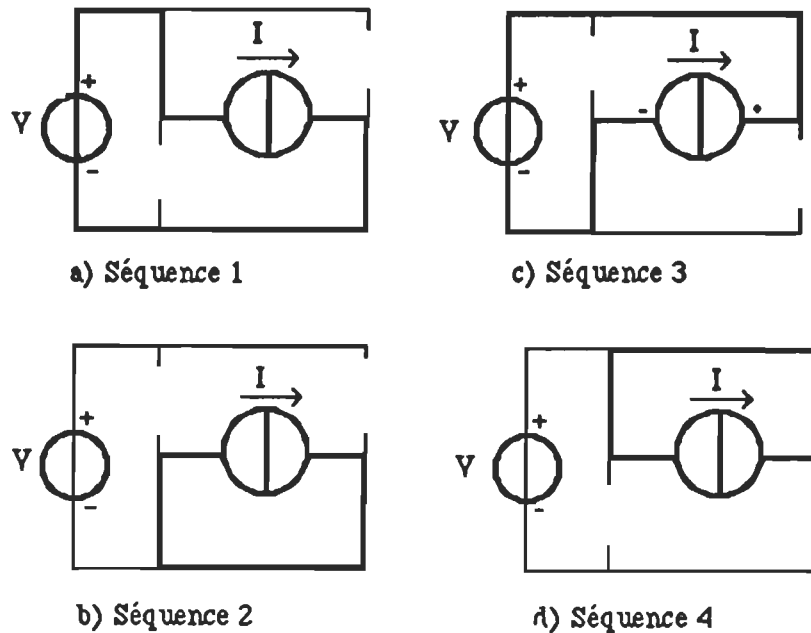


Fig. IV.2 Séquences de fonctionnement d'un C.S.D.T.C

Selon la manière de commander les interrupteurs, on distingue deux modes de fonctionnement [2]:

- fonctionnement à trois séquences (séquences 1, 2 et 3 de la figure IV.2)
- fonctionnement à quatre séquences (séquences 1, 2, 3, et 4 de la figure IV.2).

#### IV.2.1 Principes de synthèse des C.S.D.T.C

Le cahier des charges fournit la nature des sources, tension ou courant. Pour faire la synthèse d'un convertisseur statique il faut réaliser les étapes suivantes:

- déterminer sa configuration de base;
- déduire du cahier des charges les réversibilités en tension et en courant des sources;
- identifier sur la configuration de base les séquences de fonctionnement nécessaires, compte tenu des réversibilités en tension et en courant et des contrôles

d'énergie souhaités: effectuer les simplifications de la structure de base si cela est nécessaire et en déduire la topologie du convertisseur;

- déterminer la caractéristique statique  $i_k(v_k)$  de chaque interrupteur pour les différentes séquences de fonctionnement;
- déterminer les types de commutation de chaque interrupteur pour les différentes séquences de fonctionnement;
- connaissant les caractéristiques statiques et le type de commutation de chaque interrupteur, déduire la nature des interrupteurs à utiliser.

#### IV.2.2 Principes de synthèse des C.S.D.C.T

Les mêmes principes de synthèse des convertisseurs statiques directs tension-courant peuvent être appliqués pour faire la synthèse des convertisseurs statiques directs courant-tension (C.S.D.C.T). Dans ce cas, la source d'entrée est une source de courant et la source de sortie est une source de tension.

### IV.3 CARACTÉRISTIQUES STATIQUES DES INTERRUPTEURS

La connaissance des caractéristiques statiques des interrupteurs nécessite la détermination du sens du courant dans les interrupteurs fermés et du signe de la tension aux bornes de ceux qui sont ouverts et cela en fonction des réversibilités en tension et en courant de l'entrée et de la sortie pour chacune des quatre séquences de fonctionnement. Considérons, par exemple, la séquence 3 de la figure IV.2. Nous avons alors, si E et S représentent l'entrée et la sortie du convertisseur:

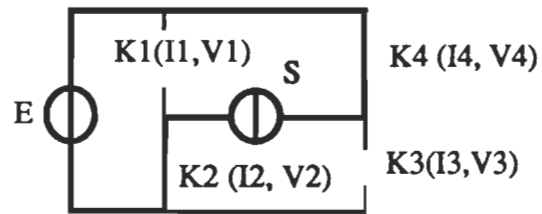


Fig. IV.2.1

1) Si

$E$  est bidirectionnelle en courant ( $E \rightleftarrows$ )

$S$  est bidirectionnelle en courant ( $S \rightleftarrows$ )

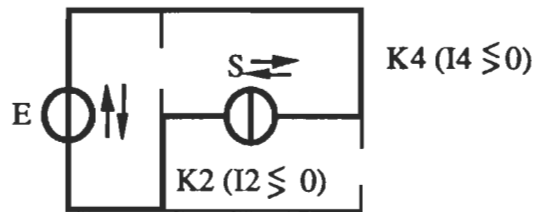


Fig IV.2.2

c.à.d.  $I4 \lesseqgtr 0$   
 $I2 \lesseqgtr 0$

2) Si

$E$  est bidirectionnelle en courant ( $E \rightleftarrows$ )

$S$  est unidirectionnelle en courant ( $S \rightarrow$ )

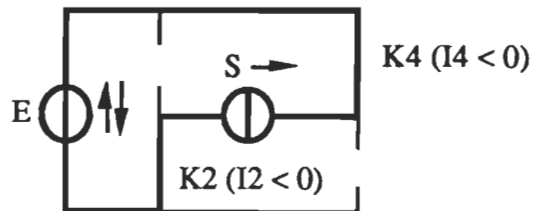


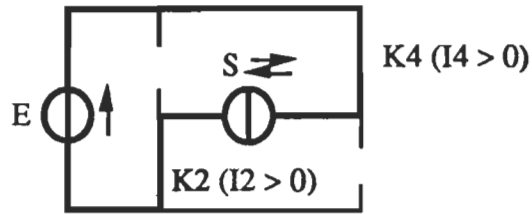
Fig. IV.2.3

$I4 < 0$   
 $I2 < 0$

3) Si

E est unidirectionnelle en courant ( $E \rightarrow$ )

S est bidirectionnelle en courant ( $S \rightleftarrows$ )



$$I_4 > 0$$

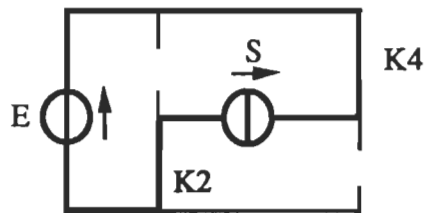
$$I_2 > 0$$

Fig. IV.2.4

4) Si

E est unidirectionnelle en courant ( $E \rightarrow$ )

S est unidirectionnelle en courant ( $S \rightarrow$ )



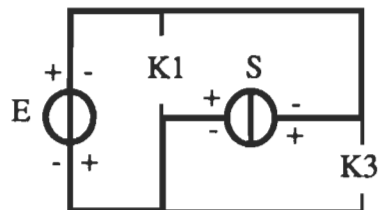
séquence impossible

Fig. IV.2.5

5) Si

E est réversible en tension ( $E \begin{smallmatrix} + & - \\ - & + \end{smallmatrix}$ )

S est réversible en tension ( $S \begin{smallmatrix} + & - \\ - & + \end{smallmatrix}$ )



$$V_1 \leq 0$$

$$V_3 \leq 0$$

Fig. IV.2.6



6) Si

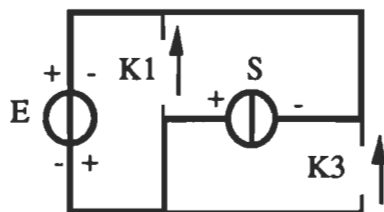
E est réversible en tension ( $E \begin{smallmatrix} + & - \\ - & + \end{smallmatrix}$ )S est non réversible en tension ( $S \begin{smallmatrix} + & - \\ + & - \end{smallmatrix}$ )

Fig. IV.2.7

$$V1 < 0$$

$$V3 < 0$$

7) Si

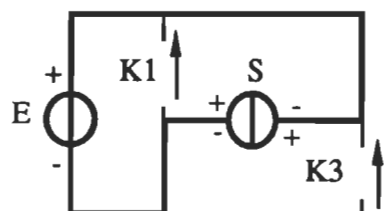
E est non réversible en tension ( $E \begin{smallmatrix} + & - \\ + & - \end{smallmatrix}$ )S est réversible en tension ( $S \begin{smallmatrix} + & - \\ - & + \end{smallmatrix}$ )

Fig. IV.2.8

$$V1 > 0$$

$$V3 > 0$$

8) Si

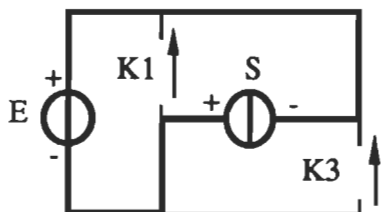
E est non réversible en tension ( $E \begin{smallmatrix} + & - \\ + & - \end{smallmatrix}$ )S est non réversible en tension ( $S \begin{smallmatrix} + & - \\ + & - \end{smallmatrix}$ )

Fig. IV.2.9

Séquence impossible

Si nous regroupons ces résultats:

$$E \text{ et } S \rightleftharpoons I_2 \approx 0, I_4 \approx 0,$$

$$\begin{array}{l} E \\ S \end{array} \begin{array}{l} \rightleftharpoons \\ \longrightarrow \end{array} I_2 < 0, I_4 < 0,$$

$$\begin{array}{l} S \\ E \end{array} \begin{array}{l} \rightleftharpoons \\ \longrightarrow \end{array} I_2 > 0, I_4 > 0,$$

$$E \text{ et } S \longrightarrow \text{séquence impossible}$$

$$E \text{ et } S \rightleftharpoons V_1 \approx 0, V_3 \approx 0,$$

$$\begin{array}{l} E \\ S \end{array} \begin{array}{l} \rightleftharpoons \\ \longrightarrow \end{array} V_1 < 0, V_3 < 0,$$

$$\begin{array}{l} S \\ E \end{array} \begin{array}{l} \rightleftharpoons \\ \longrightarrow \end{array} V_1 > 0, V_3 > 0,$$

$$E \text{ et } S \longrightarrow \text{séquence impossible.}$$

Si nous appliquons cette technique aux quatre séquences nous obtenons les caractéristiques statiques de chaque interrupteur qui sont regroupées dans le tableau IV.1

[2]. Dans ce dernier,

si  $i_k = 0$ , l'interrupteur est équivalent à un circuit ouvert

si  $v_k = 0$ , l'interrupteur est équivalent à un court-circuit.

Tab. IV.1 Caractéristiques statiques des interrupteurs [2]

a) fonctionnement à trois séquences: séquences 1, 2 et 3

b) fonctionnement à quatre séquences: séquences 1, 2, 3 et 4

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>
E, S $\leftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> > 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> > 0
E $\leftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> < 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> < 0
S $\leftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> > 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> > 0
E, S $\nleftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> < 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> = 0
E, S $\rightleftharpoons$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> > 0	V <sub>4</sub> > 0
E $\rightleftharpoons$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> < 0	V <sub>4</sub> > 0
S $\rightleftharpoons$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> > 0	V <sub>4</sub> > 0
E, S $\nrightarrow$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> = 0	V <sub>4</sub> > 0

(a)

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>
E, S $\leftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> > 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> > 0
E $\leftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> < 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> < 0
S $\leftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> > 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> > 0
E, S $\nleftrightarrow$	I <sub>1</sub> > 0	I <sub>2</sub> < 0	I <sub>3</sub> > 0	I <sub>4</sub> = 0
E, S $\rightleftharpoons$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> > 0	V <sub>4</sub> > 0
E $\rightleftharpoons$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> > 0	V <sub>4</sub> > 0
S $\rightleftharpoons$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> > 0	V <sub>4</sub> > 0
E, S $\nrightarrow$	V <sub>1</sub> > 0	V <sub>2</sub> > 0	V <sub>3</sub> = 0	V <sub>4</sub> > 0

(b)

#### IV.4 CARACTÉRISTIQUES DYNAMIQUES DES INTERRUPTEURS POUR UN FONCTIONNEMENT EN MODE CONTINU

En passant d'une séquence à une autre, les interrupteurs passent de l'état passant à l'état bloqué ou inversement. Tant à l'amorçage qu'au blocage deux modes de changement d'état des interrupteurs sont à distinguer: la commutation commandée et la commutation spontanée.

Les sources de tension et de courant sont supposées continues, réversibles ou non en tension et/ou en courant. Selon leurs réversibilités une ou plusieurs des 8 transitions élémentaires du tableau IV.2 sont possibles. Une transition est le passage d'une phase active à une phase de récupération. Pour un fonctionnement à 3 séquences, la possibilité de réaliser les transitions élémentaires implique que toutes les transitions soient possibles

puisque l'on passe d'une séquence active à une séquence de récupération puis à nouveau à une séquence active. Pour chaque transition la séquence de récupération est la même. Il suffit de commander les interrupteurs pour réaliser les transitions.

Pour le fonctionnement à 4 séquences la présence de deux séquences différentes de récupération nécessite d'autres commandes pour les interrupteurs que celles définies par les transitions élémentaires. Les résultats sont résumés dans les tableaux IV.3 et IV.4 [2]. Le tableau IV.3 regroupe les commandes au blocage, le tableau IV.4 celles à l'amorçage. Les cases barrées d'une croix dans ces deux tableaux correspondent à des interrupteurs inexistant, les cases vides correspondent à un blocage par inversion du courant dans l'interrupteur correspondant, "d" correspond à un interrupteur de type "diode", "Thd" correspond à un interrupteur de type "thyristor-dual".

Quand un interrupteur (K) est bidirectionnel en courant, il est considéré comme l'association de deux interrupteurs en antiparallèle (T et T'). Si le courant est positif dans l'interrupteur (K) il s'agit de T, s'il est négatif il s'agit de T' (Fig. IV.3).

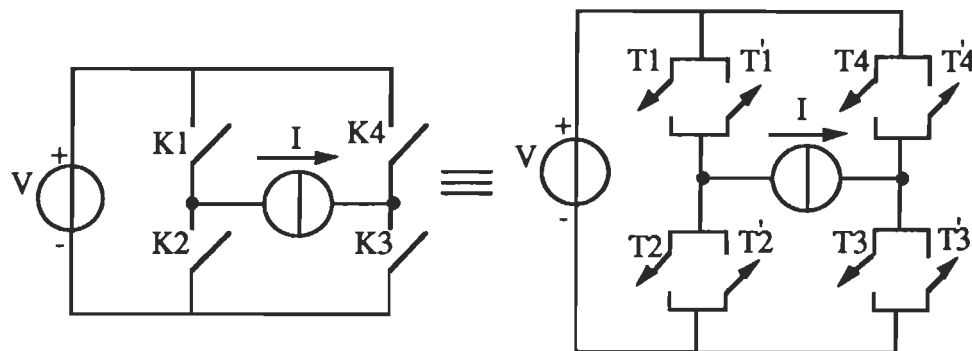


Fig. IV.3 Convention de signes pour les interrupteurs

Dans les tableaux IV.2, IV.3 et IV.4, si le courant (respectivement la tension) est égale à zéro "0" cela signifie que la source correspondante est unidirectionnelle en courant (respectivement unidirectionnelle en tension). Si le courant (respectivement la tension) est

égale à un "1" cela signifie que la source correspondante est bidirectionnelle en courant (respectivement bidirectionnelle en tension).

Tab. IV.2 Transitions élémentaires: fonctionnement à trois séquences

Transitions élémentaires		Entrée		Sortie		blocage et amorçage forcés	
		I	V	I	V		
1			0	0	0	0	$T_1$
2			0	0	1	1	$T_4$
3			1	0	1	0	$T_2$
4			1	0	0	1	$T_3$

Tab. IV.2 Suite

5			0	1	0	1	$\tau_2'$
6			0	1	1	0	$\tau_3'$
7			1	1	1	1	$\tau_1'$
8			1	1	0	0	$\tau_4'$

Tab. IV.3 Commandes au blocage

Entrée		Sortie										Transitions
I	V	I	V	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	
0	0	0	0	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	d	⊗	⊗	⊗	⊗	1
0	0	1	1	T <sub>1</sub>	⊗		d		d	T <sub>4</sub>	⊗	1, 2
1	0	1	0	T <sub>1</sub>	d	T <sub>2</sub>	d	⊗	⊗	⊗	⊗	1, 3
1	0	0	1	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	d	T <sub>3</sub>	⊗	⊗	d	1, 4
1	1	0	0	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	d	d	⊗	⊗	T <sub>4</sub> '	1, 8
0	1	1	0	T <sub>1</sub>	⊗		d	d	T <sub>3</sub> '		⊗	1, 6
0	1	0	1	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	T <sub>2</sub> '	⊗	⊗	⊗	⊗	1, 5
1	1	1	0	T <sub>1</sub>		T <sub>2</sub>	d	d	T <sub>3</sub> '		T <sub>4</sub> '	1, 3, 6, 8
1	1	0	1	T <sub>1</sub>	d	d	T <sub>2</sub> '	T <sub>3</sub>	d	d	T <sub>4</sub> '	1, 4, 5, 8
1	0	1	1	T <sub>1</sub>	d	T <sub>2</sub>	d	T <sub>3</sub>	d	T <sub>4</sub>	d	1, 2, 3, 4
0	1	1	1	T <sub>1</sub>	⊗		T <sub>2</sub> '		T <sub>3</sub> '	T <sub>4</sub>	⊗	1, 2, 5, 8
1	1	1	1	T <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> '	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> '	T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> '	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> '	1 à 8

où les cases vides et les cases barrées d'une croix correspondent à:



Blocage par inversion du courant



Interrupteur inexistant

Tab. IV.4 Commandes à l'amorçage

Entrée		Sortie										Transitions
I	V	I	V	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	
0	0	0	0	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	d	⊗	⊗	⊗	⊗	1
0	0	1	1	T <sub>1</sub>	⊗	Thd	d	Thd	d	T <sub>4</sub>	⊗	1, 2
1	0	1	0	T <sub>1</sub>	d	T <sub>2</sub>	d	⊗	⊗	⊗	⊗	1, 3
1	0	0	1	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	d	T <sub>3</sub>	⊗	⊗	d	1, 4
1	1	0	0	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	d	d	⊗	⊗	T <sub>4</sub> '	1, 8
0	1	1	0	T <sub>1</sub>	⊗	Thd	d	d	T <sub>3</sub> '	Thd	⊗	1, 6
0	1	0	1	T <sub>1</sub>	⊗	⊗	T <sub>2</sub> '	⊗	⊗	⊗	⊗	1, 5
1	1	1	0	T <sub>1</sub>	Thd	T <sub>2</sub>	d	d	T <sub>3</sub> '	Thd	T <sub>4</sub> '	1, 3, 6, 8
1	1	0	1	T <sub>1</sub>	d	d	T <sub>2</sub> '	T <sub>3</sub>	d	d	T <sub>4</sub> '	1, 4, 5, 8
1	0	1	1	T <sub>1</sub>	d	T <sub>2</sub>	d	T <sub>3</sub>	d	T <sub>4</sub>	d	1, 2, 3, 4
0	1	1	1	T <sub>1</sub>	⊗	Thd	T <sub>2</sub> '	Thd	T <sub>3</sub> '	T <sub>4</sub>	⊗	1, 2, 5, 8
1	1	1	1	T <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> '	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> '	T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> '	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> '	1 à 8

#### IV. 5 EXEMPLES D'APPLICATIONS DE SYNTHÈSE

##### IV.5.1 Exemple I

La méthode décrite auparavant est appliquée pour déterminer la structure d'un convertisseur où la source d'entrée est une batterie d'accumulateurs et la source de sortie est une machine à courant continu alimentée sous tension variable. Cette machine



est à excitation séparée, fonctionnant en moteur et en génératrice pour le même sens de rotation.

L'algorithme de conception est dans ce cas le suivant:

- caractérisation des sources d'entrée et de sortie: la source d'entrée est une source de tension réversible en courant; la source de sortie c.à.d la machine est une source de courant non réversible en tension et réversible en courant.
- les différentes séquences de fonctionnement sont, pour la phase de traction: une séquence active, une séquence de récupération. Pour la phase de freinage, une séquence active et une séquence de récupération.

La figure IV.4 représente les différentes séquences de la phase de traction et leur enchaînement.

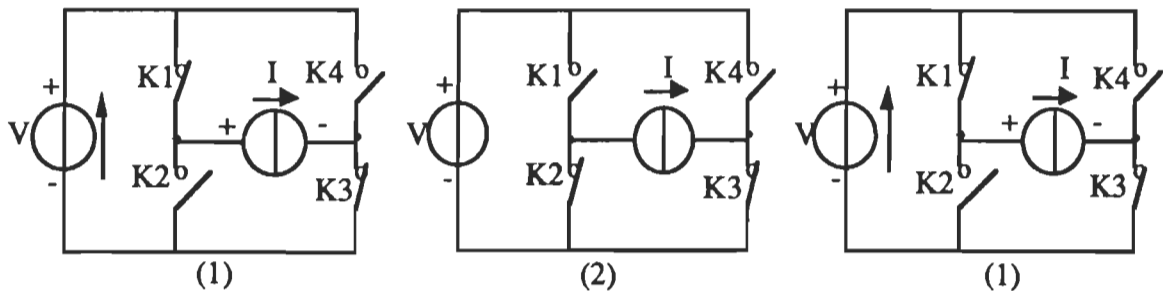


Fig. IV.4 Séquences de fonctionnement de la phase de traction

La figure IV.5 représente les différentes séquences de la phase de freinage et leur enchaînement.

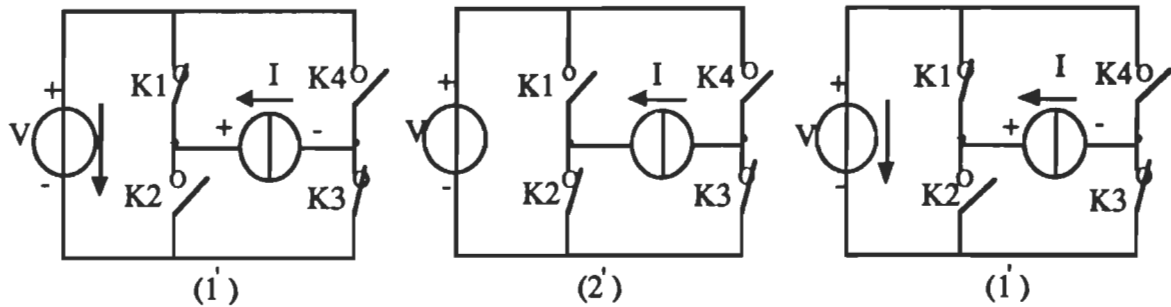


Fig. IV.5 Séquences de fonctionnement de la phase de freinage

- D'après le tableau IV.1(a) on tire les caractéristiques statiques des interrupteurs des phases de traction et de freinage:

$$E, S \rightleftharpoons I_1 \geq 0; I_2 \geq 0; B \geq 0; K = 0$$

$$\text{et } E, S \begin{array}{c} + \\ - \end{array} \begin{array}{c} / \\ + \end{array} V_1 > 0; V_2 > 0; V_3 = 0; V_4 > 0$$

Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension. Les transitions correspondantes sont les transitions 1 et 3 du tableau IV.2.

- Des caractéristiques statiques on peut tirer la nature des interrupteurs K3 et K4:

$$V_3 = 0, \text{ d'où } K_3 \text{ est équivalent à un court-circuit,}$$

$$I_4 = 0, \text{ d'où } K_4 \text{ est équivalent à un circuit ouvert.}$$

- D'après le tableau IV.3 on tire les interrupteurs commandés au blocage:

T1 et T2 sont à blocage commandé;

T'1 et T'2 sont à blocage spontané.

- D'après le tableau IV.4 on tire les interrupteurs commandés à l'amorçage:

T1 et T2 sont à amorçage commandé;

T'1 et T'2 sont à amorçage spontané.

- Les types des interrupteurs correspondants sont alors:

T1 et T2 sont des interrupteurs type transistor;

T'1 et T'2 sont des interrupteurs type diode;

K3 est un court-circuit;

K4 est un circuit ouvert.

La structure du convertisseur ainsi synthétisée est celle d'un hacheur réversible en courant. Elle est représentée à la figure IV.6.

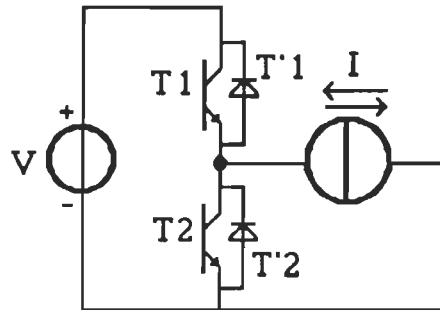


Fig. IV.6 Structure du hacheur réversible en courant

### IV.5.2 Exemple II

La méthode est appliquée cette fois dans le cas d'une source de tension continue non réversible alimentant une source de courant réversible en tension et en courant. Les transitions pour le fonctionnement à trois séquences puis celles pour le fonctionnement à quatre séquences sont représentées respectivement aux figures IV.7 et IV.8.

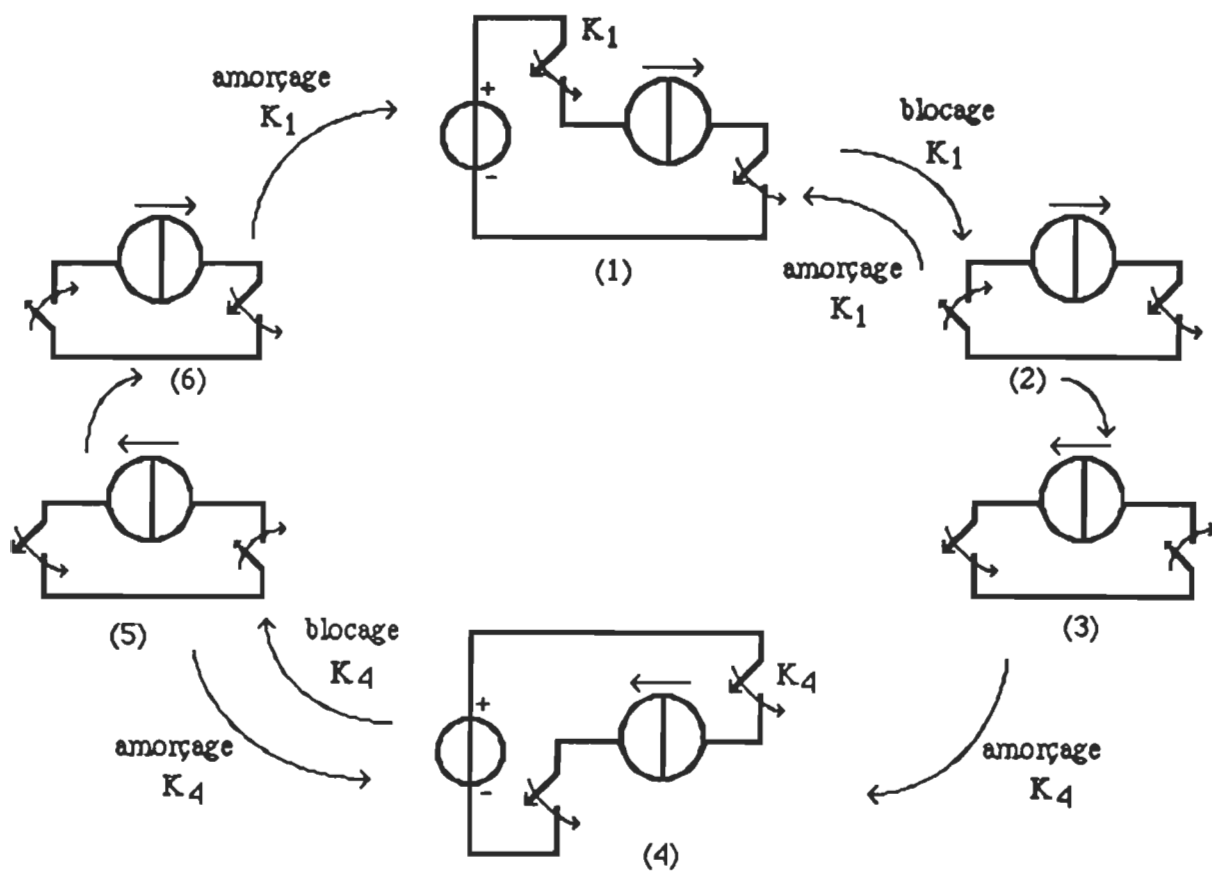


Fig. IV.7 Transitions élémentaires: fonctionnement à trois séquences

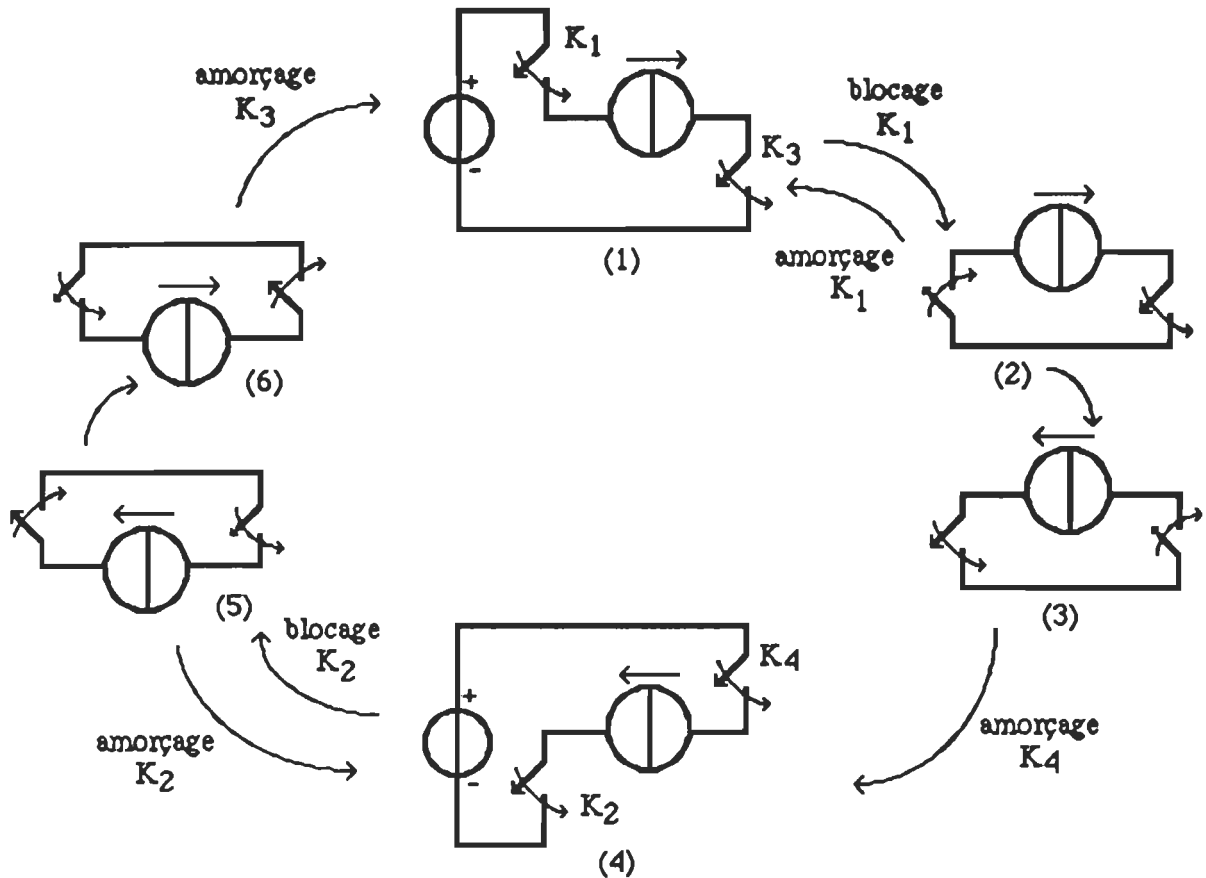


Fig. IV.8 Transitions élémentaires: fonctionnement à quatre séquences

A partir d'une étude approfondie du cahier des charges, on déduit pour chaque commutation l'enchaînement des différentes séquences de fonctionnement et le type de commutation de chaque interrupteur. Le tableau IV.5 regroupe les caractéristiques statiques, dynamiques et les types de commutation des interrupteurs pour les transitions de la figure IV.7 (fonctionnement à trois séquences). Dans ce tableau, "d" signifie un amorçage spontané type diode et "Thd" type thyristor-dual. La nature de certains interrupteurs est alors facilement déduite. Par exemple, T1 est commandable à l'amorçage et au blocage, il est donc un interrupteur de type transistor. T'2 est à amorçage et blocage spontanés, il est un interrupteur de type diode.

Tab. IV.5 Types de commutation des interrupteurs

Transitions	Caractéristiques statiques et dynamiques	Type de commutation
(1) → (2) (2) → (1)		$T_1$ : - blocage commandé - amorçage commandé $T_2'$ : - amorçage spontané (d) - blocage spontané
(2) → (3)		$T_2$ : - amorçage spontané (Thd) $T_3'$ : - amorçage spontané (d)
(3) → (4)		$T_3'$ : - blocage spontané $T_4$ : - amorçage commandé
(4) → (5) (5) → (4)		$T_4$ : - blocage commandé - amorçage commandé $T_3'$ : - amorçage spontané (d) - blocage spontané
(5) → (6)		$T_2$ : - amorçage spontané (d) $T_3$ : - amorçage spontané (Thd)
(6) → (1)		$T_1'$ : - amorçage commandé $T_2$ : - blocage spontané

La figure IV.9 représente la structure du convertisseur ainsi synthétisée. Cependant, on pourrait la déduire directement des tableaux IV.3 et IV.4, mais nous avons détaillé cette application pour mettre en évidence la méthode de construction de ces deux tableaux. Dans ce cas nous avons traité les deux lignes correspondant aux transitions 1, 2 des tableaux IV.3 et IV.4 (Entrée:  $I=0$ ,  $V=0$  et Sortie:  $I=1$ ,  $V=1$ ).

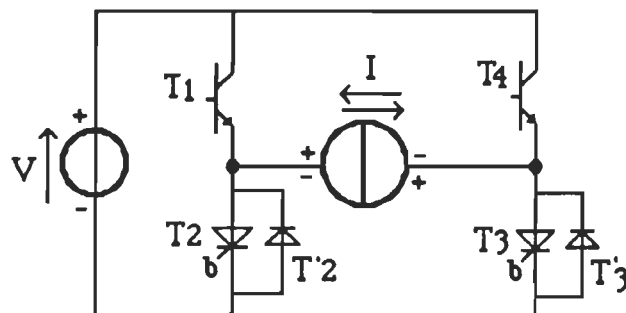


Fig. IV.9 Structure du convertisseur étudié

#### IV.6 CONCLUSION

La méthode de synthèse proposée permet de retrouver les convertisseurs statiques tension-courant les plus connus, hacheur non réversible, hacheur réversible en courant et en tension, onduleurs, etc... Il est possible de généraliser cette méthode pour synthétiser d'autres types de convertisseurs, les convertisseurs indirects tension-tension et courant-courant. Cette méthode a été implantée sur ordinateur (SYCOSTO) [2] pour aider à la recherche automatique des structures de convertisseurs statiques.

Mais pour bien utiliser cette méthode, il faut tout d'abord l'avoir bien assimilée, sinon le risque de faire une erreur ou d'oublier un paramètre est très grand [2]. Le reproche que l'on peut faire à cette méthode est sa complexité dans la recherche des caractéristiques dynamiques quand le nombre de séquences devient grand. D'une part, elle nécessite la

connaissance de ces séquences, d'autre part, l'enchaînement des séquences n'est pas toujours évident surtout quand plusieurs choix sont possibles.

Cela nous a amené à étudier et développer la deuxième méthode qui, basée sur des règles de commutation simples à appliquer, permet de mieux comprendre le mode de fonctionnement des interrupteurs et leur caractérisation.



## CHAPITRE V

### SYNTHESE DES INTERRUPTEURS DE LA CELLULE DE COMMUTATION

#### V.1 INTRODUCTION

Les règles établies dans le chapitre III permettent, pour une commutation donnée, connaissant le signe de la tension  $v$  et le sens du courant  $i$  de déterminer lequel des deux interrupteurs de la cellule élémentaire de commutation doit être commandé et s'il doit être commandé à l'amorçage ou au blocage.

Le fonctionnement d'un convertisseur étant un fonctionnement cyclique, il est indispensable de connaître toutes les commutations susceptibles d'être imposées à la cellule au cours d'un cycle complet. L'étude de ces différentes commutations permet de déduire le cycle dynamique de chaque interrupteur. L'identification et le choix de l'interrupteur le mieux adapté en découlent. Nous avons ainsi effectué la synthèse des interrupteurs de la cellule.

Nous allons appliquer cette méthode à plusieurs cas de fonctionnements cycliques élémentaires, qui sont ceux que l'on rencontre dans les structures de base des convertisseurs. Ce sont des fonctionnements à cycle unique.

Ces notions ont déjà été introduites dans les notes de cours d'Électronique de Puissance de l'ENSEEIH Toulouse [1], et dans l'extrait de la collection "Les Techniques de l'Ingénieur" [4].

## V.2 FONCTIONNEMENT À CYCLE UNIQUE

De nombreux convertisseurs ont un fonctionnement cyclique simple, dans lequel il y a alternance des commutations. Dans le cas de la cellule élémentaire à deux voies (Fig. III.2), pour revenir à l'état initial après la commutation de K1 à K2, il faut effectuer la commutation de K2 à K1 avec les nouvelles conditions de signe de  $v$  et de  $i$  que le convertisseur a imposées entre-temps.

Analysons les divers cas possibles.

### V.2.1 Tension et courant ne changeant pas de signe entre deux commutations

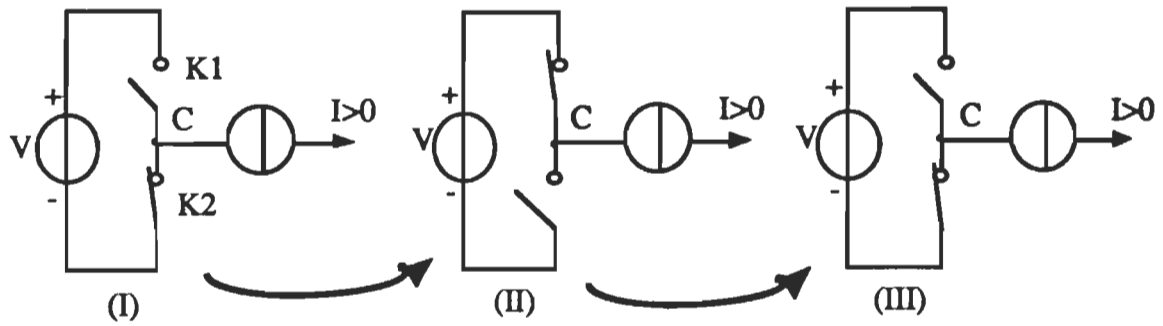
Dans ce cas, les deux interrupteurs sont unidirectionnels en tension et en courant et les deux commutations successives sont forcément de signes contraires; si la première est positive, la seconde est négative, ou inversement. De plus, le courant garde le même signe pour les deux commutations.

Il y a donc deux modes de commutation différents (voir III.4.2):

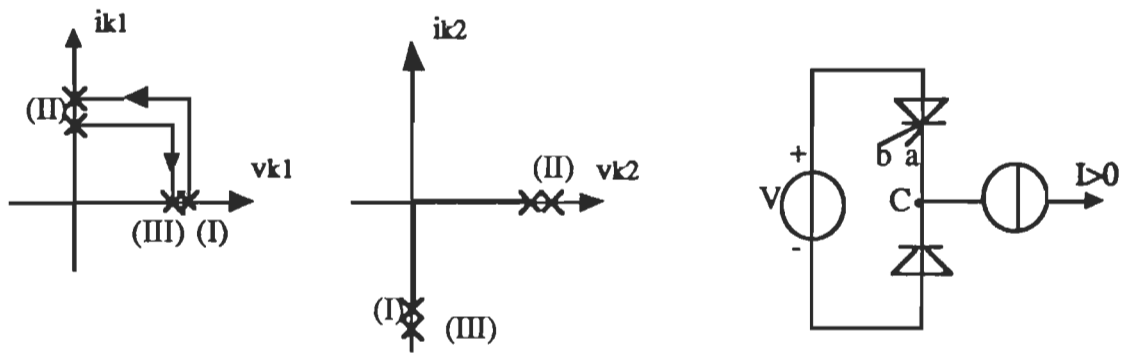
- commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué pour l'une des commutations,
- commande au blocage de l'interrupteur passant pour l'autre.

C'est le même interrupteur qui est commandé à chaque commutation. Le second interrupteur est à amorçage et blocage spontanés. La figure V.1 illustre ce premier cas; avec les conventions de signe de la figure V.1a, nous avons:

- pour la première commutation: K1 est commandé à l'amorçage; K2 est à blocage spontané (Fig. V.1);
- pour la deuxième commutation: K1 est commandé au blocage; K2 est à amorçage spontané (Fig. V.1).



a) cycle de commutation

a commande à l'amorçage  
b commande au blocage

b) caractéristiques des interrupteurs

c) structure du commutateur

Fig. V.1 Mécanisme de commutation sans changement de signe de la tension et du courant

Ce cas associe donc un interrupteur unidirectionnel en tension et en courant commandé à l'amorçage et au blocage (interrupteur de type transistor) et un autre interrupteur unidirectionnel en tension et en courant à amorçage et blocage spontanés (interrupteur de type diode).

Nous pouvons dire que la structure du commutateur est asymétrique (Fig. V.1c) puisque les deux interrupteurs sont de natures différentes.

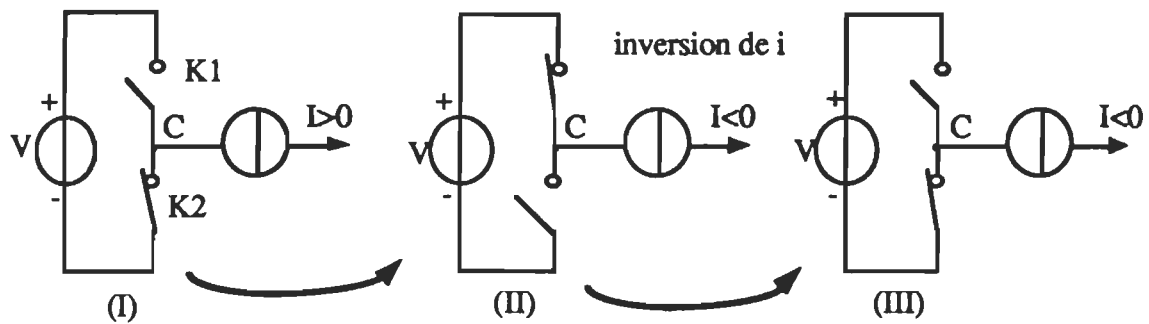
Le hacheur dévolteur non réversible constitue un exemple d'application.

### V.2.2 Sens du courant changeant entre deux commutations

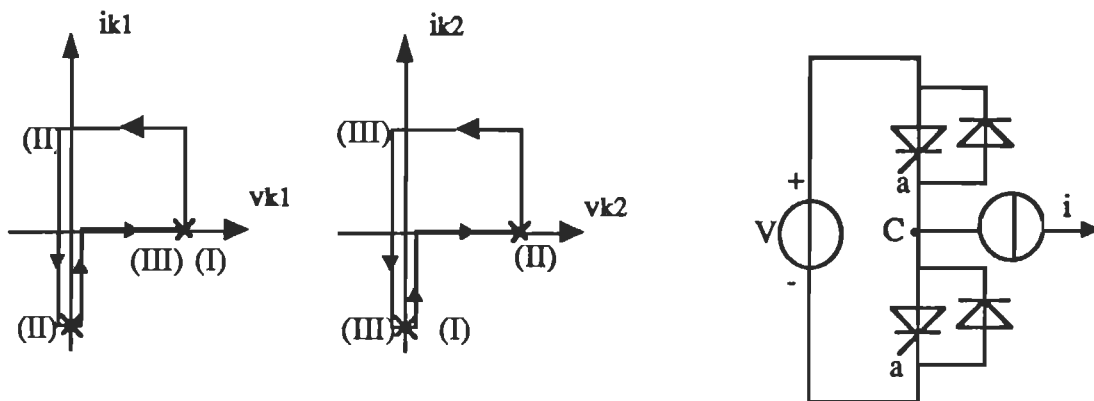
Dans ce deuxième cas, la tension  $V$  est unidirectionnelle et la source de courant est bidirectionnelle. Il se produit une commutation lors de chaque demi-période du courant.

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

- Supposons que la première commutation soit positive (fermeture de l'interrupteur  $K1$  relié au point de plus haut potentiel); si le courant est alors positif, il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué (soit  $K1$  sur la figure V.2a). La commutation suivante est donc négative (fermeture de l'interrupteur  $K2$  relié au point de plus bas potentiel). Le courant  $i$ , qui a changé de sens, est alors négatif; il y a, à nouveau, commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué (maintenant  $K2$ ).



a) cycle de commutation



a commande à l'amorçage

b) caractéristiques des interrupteurs

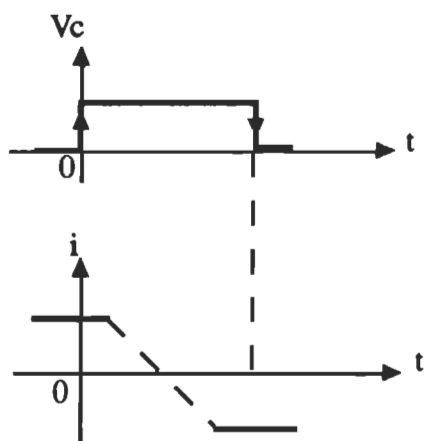
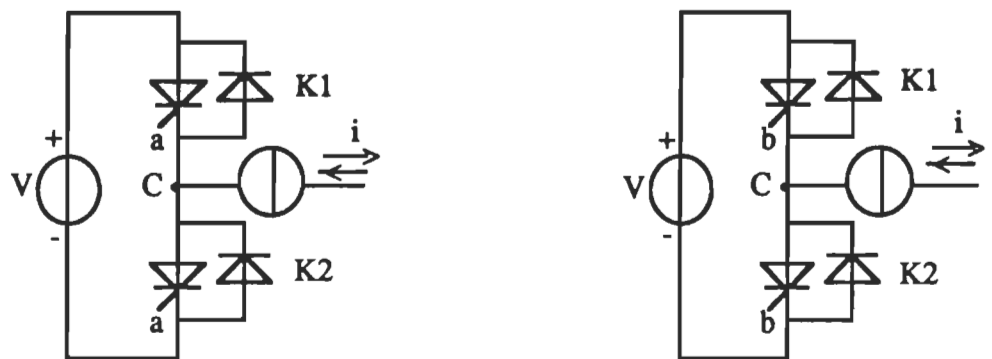
c) structure du commutateur

Fig. V.2 Mécanisme de commutation lorsque le courant change de signe entre deux commutation

Par conséquent, les deux interrupteurs sont tous les deux à amorçage commandé et à blocage spontané. Ils sont du même type (thyristor-diode, Fig. V.2c).

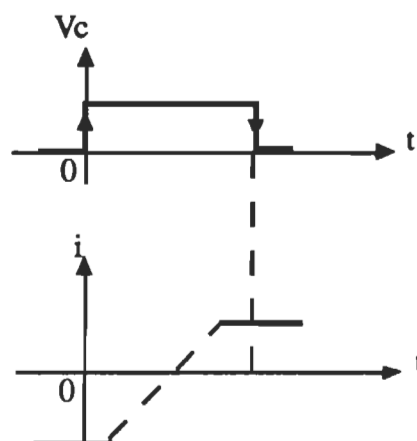
- Dans l'exemple choisi, les signes de la commutation et du courant sont les mêmes mais ils peuvent être de signes contraires. Il est facile de voir qu'alors les deux interrupteurs sont tous deux unidirectionnels en tension, bidirectionnels en courant, à blocage commandé et amorçage spontané (thyristor-dual).

- La figure V.3 résume les deux possibilités, avec les symboles conventionnels des interrupteurs ainsi identifiés (interrupteur commandé avec diode en antiparallèle).



K2 → K1    K1 → K2

a) commutation et courant de mêmes signes: commande à l'amorçage



K2 → K1    K1 → K2

b) commutation et courant de signes contraires: commande au blocage

Fig. V.3 Cellules de commutation avec une source de tension unidirectionnelle et source de courant bidirectionnelle

On peut citer, comme exemples d'application, les onduleurs de tension où  $i_s$  est en avance de phase sur  $v_s$  (Fig. V.3a) ou bien le contraire (Fig. V.3b).

### V.2.3 Signe de la tension changeant entre deux commutations

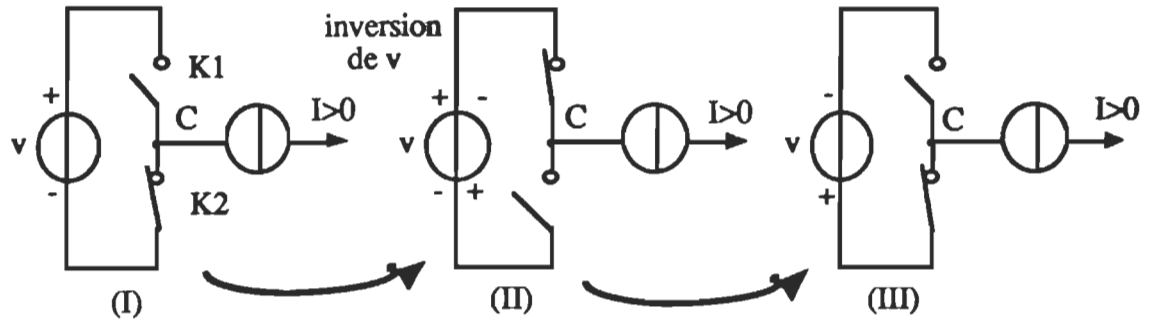
Dans ce troisième cas, le courant  $I$  garde le même sens, la tension  $v$  est bidirectionnelle et il se produit une commutation à chaque demi-période. Les deux interrupteurs sont donc unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension.

- Supposons le courant positif: si la première commutation est, elle même, positive (fermeture de l'interrupteur relié au point de plus haut potentiel), il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (soit K1 sur la figure V.4a).

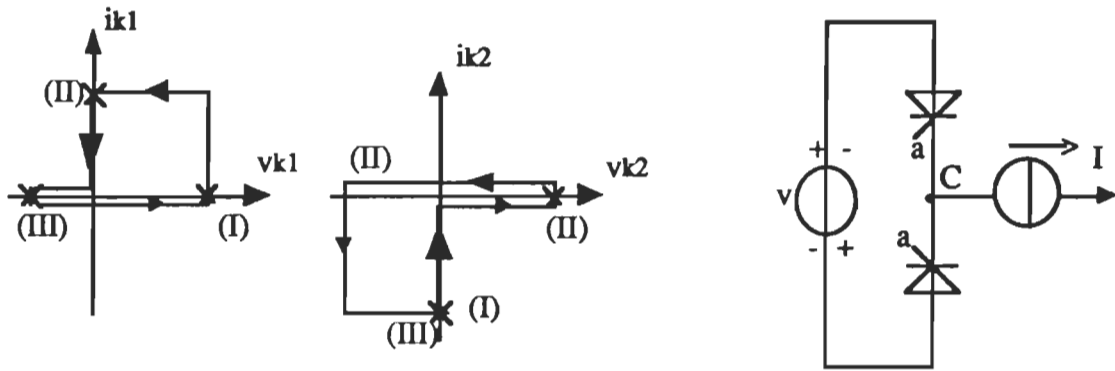
Le signe de la tension  $v$  ayant changé, la commutation suivante est à nouveau positive, il y a donc, à nouveau, commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (soit K2).

En conséquent, les deux interrupteurs sont tous les deux à amorçage commandé et blocage spontané. Il sont de même type (thyristor, Fig. V.4c).

- Si nous nous plaçons dans le cas où commutation et courant sont de signes contraires, les interrupteurs, toujours unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension, sont, par contre, à blocage commandé et amorçage spontané (Fig. V.5b). Ce sont deux thyristors-diodes-dux.



a) cycle de commutation

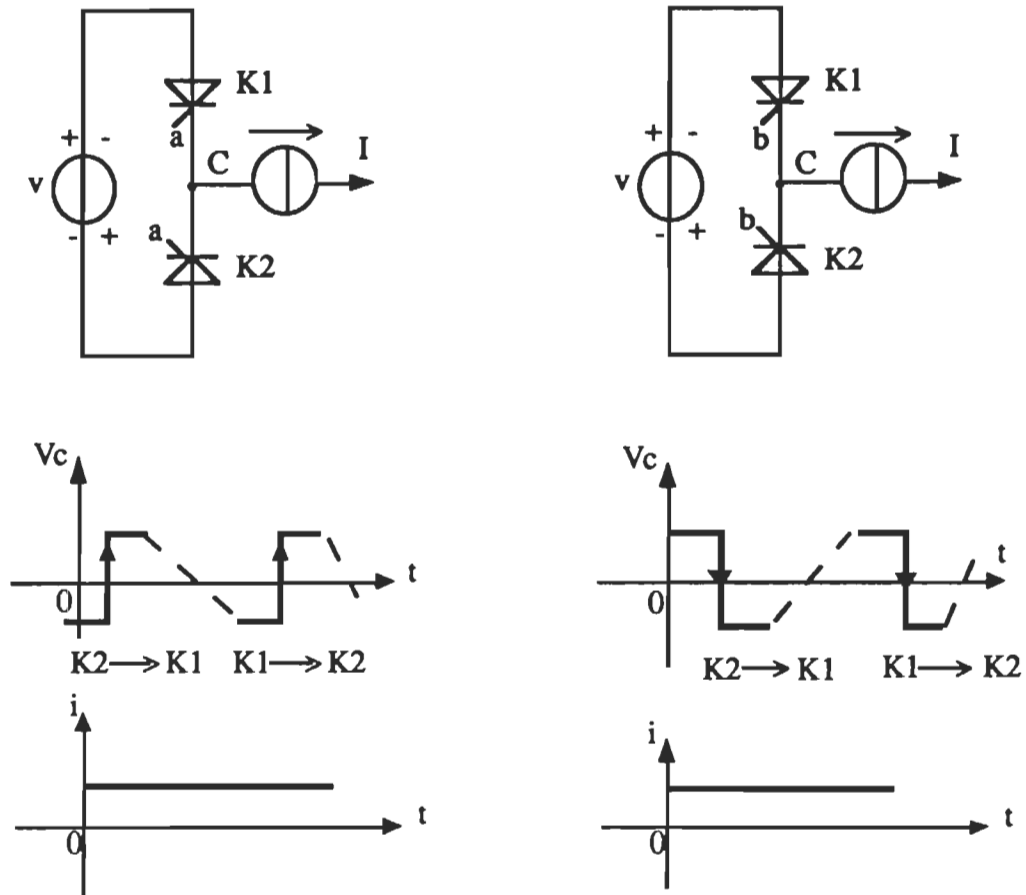


b) caractéristiques des interrupteurs

c) structure du commutateur

Fig. V.4 Mécanisme de commutation lorsque la tension change de signe entre deux commutations





a) commutation et courant de mêmes signes: commande à l'amorçage

b) commutation et courant de signes contraires: commande au blocage

Fig. V.5 Cellules de commutation avec une source de tension bidirectionnelle et une source de courant unidirectionnelle

On peut citer comme exemples d'application les redresseurs de tension (ou onduleurs non autonomes) où  $v_e$  est en avance de phase sur  $i_e$  (Fig. V.5a) ou bien le contraire (Fig. V.5b).

### V.3 REGLES GÉNÉRALES DE COMMUTATION DE CONVERTISSEURS STATIQUES DIRECTS

La notion de cellule de commutation a été introduite et utilisée pour étudier les aspects local et système du processus de commutation. Cette notion est un outil d'étude et de synthèse des topologies de convertisseurs. Au sein de la cellule de commutation, en fonction de la nature des commutations existantes, commandées à l'amorçage ou au blocage, l'analyse des tensions et des courants des sources d'entrée et de sortie nous a permis d'établir des lois et des règles générales de commutation qui sont regroupées dans ce paragraphe. Elles sont écrites en TURBO C au sein du programme "CAGECT" (Computer Aided GEneration of Converter Topologies) servant à la conception des topologies de convertisseurs statiques directs.

#### V.3.1 REGLES GÉNÉRALES

Dans tout ce qui suit, les conventions de signes adoptées pour les tensions (tensions d'entrée, de sortie et celles aux bornes des interrupteurs) et les courants (courants d'entrée, de sortie et ceux traversant les interrupteurs) sont telles que montrées à la figure V.6.

1. La structure de base des Convertisseurs Statiques Directs Tension-Courant (CSDTS) est la structure en pont à quatre interrupteurs (Fig. V.6).

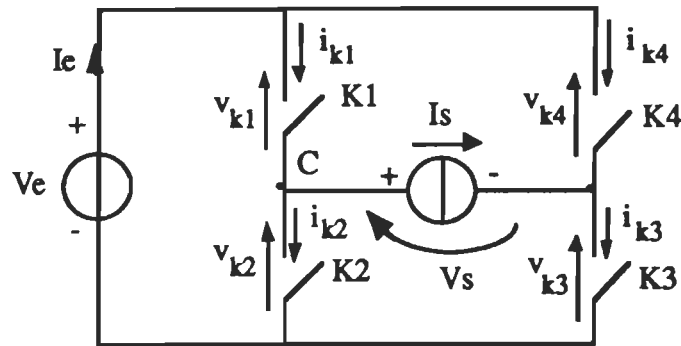


Fig. V.6 Structure de base des C.S.D.T.C avec les conventions de signe

2. La réversibilité intrinsèque des sources implique les réversibilités des interrupteurs.
  - 2.1 La réversibilité en courant de la source de courant implique des interrupteurs réversibles en courant.
  - 2.2 La réversibilité en tension de la source de tension implique des interrupteurs réversibles en tension.
3. Dans un convertisseur direct on ne peut connecter que deux sources de natures différentes.
  - 3.1 Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée, mais elle peut être ouverte.
  - 3.2 Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert, mais il peut être court-circuité.
4. Quatre séquences de fonctionnement sont possibles (Fig. IV.2 et Fig. V.6):
  - 4.1 K1 et K3 sont fermés (séquence A). La tension de sortie  $v_s$  est du même signe que la tension de la source d'entrée  $v_e$ .
  - 4.2 K2 et K3 sont fermés (séquence B), la tension  $v_s$  est nulle.
  - 4.3 K2 et K4 sont fermés (séquence C), la tension de sortie  $v_s$  est de signe opposé à la tension d'entrée  $v_e$ .
  - 4.4 K1 et K4 sont fermés (séquence D), la tension  $v_s$  est nulle.

5. La recherche des caractéristiques statiques se fait à l'aide du tableau IV.1.
6. Si le point de fonctionnement situé sur un demi-axe passe à un nouveau point de fonctionnement situé sur un demi-axe perpendiculaire de même signe la commutation est commandée.
7. Si le point de fonctionnement situé sur un demi-axe passe à un nouveau point de fonctionnement situé sur un demi-axe perpendiculaire de signe contraire la commutation est spontanée.
8. Si les caractéristiques statiques d'un interrupteur à deux segments sont:
  - 8.1 de mêmes signes alors les deux commutations sont commandées (interrupteur de type transistor ou "T")
  - 8.2 de signes contraires alors les deux commutations sont spontanées (interrupteur de type diode ou "D")
9. Un interrupteur à trois segments est utilisé avec:
  - 9.1 une source de tension d'entrée unidirectionnelle en tension et une source de courant de sortie bidirectionnelle en courant. L'interrupteur est alors réversible en courant et unidirectionnel en tension.
  - 9.2 une source de tension d'entrée réversible en tension et une source de courant de sortie unidirectionnelle en courant. L'interrupteur est alors réversible en tension et unidirectionnel en courant.
10. Pour un interrupteur à trois segments si:
  - 10.1 la fréquence des changements de signes de la source bidirectionnelle est égale à la fréquence de commutation de la tension de sortie  $v_s$  (ou de la tension  $v_c$  dans une cellule de commutation), alors une des deux commutations de l'interrupteur est spontanée. C'est ce qu'on nomme la commutation douce.

10.11 si la source de courant (de sortie) est bidirectionnelle en courant, on a:

- une commande au blocage (interrupteur de type thyristor dual) si le courant de la sortie  $i_s$  est en retard par rapport à la tension de la sortie  $v_s$  (ou de la tension  $v_c$ ).
- une commande à l'amorçage (interrupteur de type thyristor) dans le cas contraire.

10.2 la fréquence de commutation est différente de la fréquence des changements de signes de la source bidirectionnelle, la commutation est dure (modulation).

L'interrupteur est soit:

10.21 un interrupteur de type T en série avec un autre de type D (interrupteur unidirectionnel en courant et bidirectionnel en tension)

10.22 un interrupteur de type T en parallèle avec un autre de type D (interrupteur unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant).

11. Un interrupteur à quatre segments est:

- un interrupteur réversible en tension et en courant
- utilisé avec une source de tension réversible en tension et une source de courant bidirectionnelle en courant
- l'association en série ou en parallèle de deux interrupteurs à trois segments (Fig. I. 9).

12. Au sein d'une cellule élémentaire de commutation:

12.1 un seul interrupteur est passant à la fois et une commutation entraîne un changement d'état simultanément et complémentaire des deux interrupteurs

12.2 une commutation positive entraîne une augmentation du potentiel du point C (Fig. V.6)

12.3 une commutation négative entraîne une diminution du potentiel du point C

(Fig. V.6)

12.4 une commutation commandée de l'un des interrupteurs entraîne une commutation spontanée de l'autre

12.5 si la commutation et le courant de la source de sortie sont de mêmes signes il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué

12.6 si la commutation et le courant de la source de sortie sont de signes contraires il y a commutation par commande au blocage de l'interrupteur passant.

### Remarques

- Le courant et la commutation correspondent au noeud C (Fig. V.6).
- L'application de la dernière règle nécessite, toutefois, un respect absolu des conventions de signe utilisées. En particulier, le sens du courant est compté positivement dans la branche de la source courant lorsqu'il vient du point C.

### V.3.2 Extension des résultats de la cellule sur le convertisseur complet

Dans cette partie, les résultats tirés par application des règles au sein de la cellule de commutation sont appliqués au sein du convertisseur complet tension-courant. Pour cela, quand il s'agit d'une commutation c'est la commutation de la tension de la source de sortie,  $v_s$ , et non pas la commutation de la tension du point C,  $v_c$ .

13. La structure d'un convertisseur statique direct en pont à quatre interrupteurs contient deux cellules de commutation: K1, K2 et K3, K4.

14. Dans un convertisseur en pont à quatre interrupteurs:

14.1 la commutation commandée d'un interrupteur entraîne la commutation spontanée de l'autre interrupteur de la même cellule

14.2 si la commutation de la tension de sortie  $v_s$  et le courant de sortie sont de mêmes signes il y a amorçage commandé des interrupteurs bloqués

14.3 si la commutation de la tension de sortie et le courant de sortie sont de signes contraires il y a blocage commandé des interrupteurs passants.

15. Passage d'une séquence de fonctionnement à une autre.

En supposant que la source de tension ait une tension positive:

15.1 Si la tension de la sortie,  $v_s$ , ne change pas de signe lors d'un changement de séquences de fonctionnement, on parle d'une commutation nulle (commutation = 0). Lorsque la commutation entraîne un accroissement du potentiel de la tension de sortie,  $v_s$ , on parle d'une commutation positive (commutation  $>0$ ). Dans le cas contraire, il s'agit d'une commutation négative (commutation  $<0$ ).

Si on passe d'une séquence où K1 et K3 étaient passants à une autre séquence où K2 et K3 sont fermés, il faut ouvrir K1 et fermer K2 et la commutation est dans ce cas négative.

Pour alléger l'écriture, on écrit:

K1, K3 ---> K2, K3, ouverture de K1 et fermeture de K2  
commutation  $< 0$

15.2 (K1, K3 ---> K2, K4) ouverture simultanée de K1, K3 et fermeture simultanée de K2, K4  
commutation  $< 0$

15.3 (K1, K3 ---> K1, K4) ouverture de K3 et fermeture de K4  
commutation  $< 0$

15.4 (K2, K3 ---> K1, K3) ouverture de K2 et fermeture de K1  
commutation  $> 0$

15.5 (K2, K3 ---> K2, K4) ouverture de K3 et fermeture de K4

commutation  $< 0$

- 15.6 (K2, K3  $\rightarrow$  K1, K4) ouverture simultanée de K2, K3 et fermeture simultanée de K1, K4

commutation = 0

- 15.7 (K2, K4  $\rightarrow$  K1, K4) ouverture de K2 et fermeture de K1

commutation  $> 0$

- 15.8 (K2, K4  $\rightarrow$  K1, K3) ouverture simultanée de K2, K4 et fermeture simultanée de K1, K3

commutation  $> 0$

- 15.9 (K2, K4  $\rightarrow$  K2, K3) ouverture de K4 et fermeture de K3

commutation  $> 0$

- 15.10 (K1, K4  $\rightarrow$  K1, K3) ouverture de K4 et fermeture de K3

commutation  $> 0$

- 15.11 (K1, K4  $\rightarrow$  K2, K4) ouverture de K1 et fermeture de K2

commutation  $< 0$

- 15.12 (K1, K4  $\rightarrow$  K2, K3) ouverture simultanée de K1, K4 et fermeture simultanée de K2, K3

commutation = 0



#### V.4 EXEMPLE D'APPLICATION

Les règles déjà citées sont appliquées pour faire la recherche de la topologie d'un convertisseur ayant à l'entrée une source de tension continue (Fig. V.7), et à la sortie une source de courant continu (Fig. V.7). La forme d'onde de la tension de sortie,  $v_s$ , est donnée à la figure V.7.

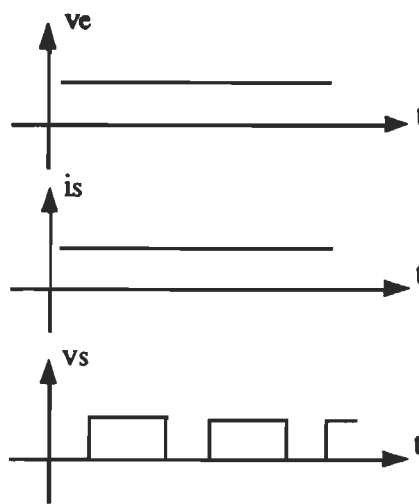


Fig. V.7 Formes d'onde des sources d'entrée et de sortie

Dans ce cas particulièrement simple, on peut aboutir à la solution très rapidement (première solution) mais on utilise cet exemple pour détailler la méthode (deuxième solution).

#### PREMIERE SOLUTION

La source de tension est unidirectionnelle en tension et la source de courant est unidirectionnelle en courant.

- D'après les règles 2.1 et 2.2 les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et en courant. Ils sont à deux segments.

- Les caractéristiques statiques des interrupteurs (voir Tab. IV.1) sont tels que:

$$i_{k1} > 0, i_{k2} < 0, i_{k3} > 0 \text{ et } i_{k4} = 0$$

$$v_{k1} > 0, v_{k2} > 0, v_{k3} = 0 \text{ et } v_{k4} > 0$$

- D'après la règle 8, les caractéristiques dynamiques des interrupteurs à deux segments sont directement déduites:

$i_{k1} > 0$  et  $v_{k1} > 0$ , d'où (règle 8.1): K1 est un interrupteur de type "transistor".

$i_{k2} < 0$  et  $v_{k2} > 0$ , d'où (règle 8.2): K2 est un interrupteur de type "diode".

$i_{k3} > 0$  et  $v_{k3} = 0$ , d'où: K3 est un court-circuit.

$i_{k4} = 0$  et  $v_{k4} > 0$ , d'où: K4 est un circuit ouvert.

La topologie du convertisseur ainsi étudié est le hacheur dévolteur, donnée à la figure V.8.

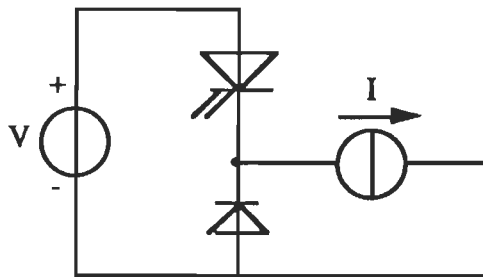


Fig. V.8 Topologie du convertisseur

### DEUXIEME SOLUTION

La méthode générale est l'analyse des formes d'onde des sources d'entrée et de sortie, méthode applicable quelques soient les formes d'onde. La méthode exposée reste toujours valable dans le cas des interrupteurs à deux segments associés à des sources unidirectionnelles: source de tension unidirectionnelle en tension et source de courant unidirectionnelle en courant.

- étape 1• L'entrée est une source de tension,  
la forme d'onde de  $v_e$  est continue, d'où  $v_e > 0$
- étape 2• La sortie est une source de courant,  
la forme d'onde du courant de sortie est continue, d'où  $i_s > 0$
- étape 3• La forme d'onde de la tension de sortie  $v_s$  est donnée à la figure V.7.

Les séquences possibles de fonctionnement sont:

- étape 4• pour  $v_s = v_e$ , (règle 4.1) K1 et K3 sont fermés (séquence A) (Fig. V.9)
- étape 5• pour  $v_s = 0$ , (règle 4.2) K2 et K3 sont fermés (séquence B) (Fig. V.9a)
- étape 6• ou (règle 4.4) K1 et K4 sont fermés (séquence D) (Fig. V.9b).

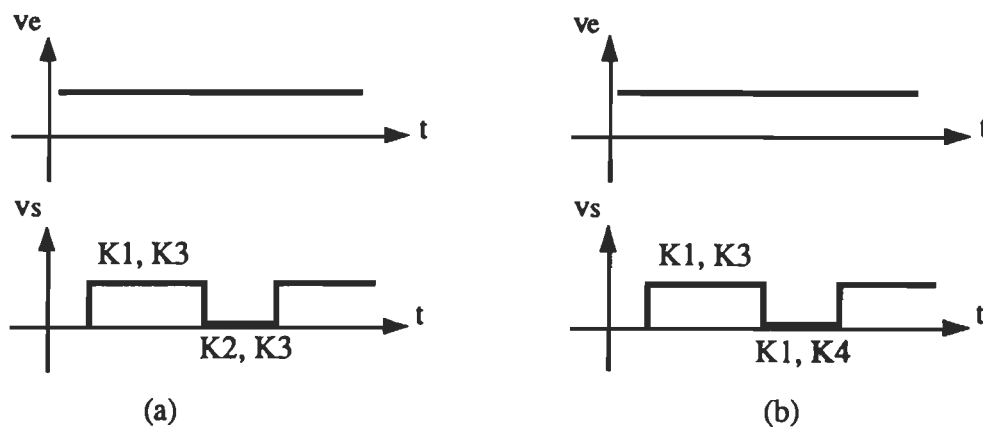


Fig. V.9 Séquences de fonctionnement possibles

Deux fonctionnements sont possibles:

- étape 7• fonctionnement #1: correspond au passage de  $v_s = v_e$  (étape 4) à  $v_s = 0$  (étape 5),
- étape 8• fonctionnement #2: correspond au passage de  $v_s = v_e$  (étape 4) à  $v_s = 0$  (étape 6).

Selon le fonctionnement, on peut déterminer lesquels des interrupteurs doivent être fermés et lesquels doivent être ouverts et on peut déterminer le signe de la commutation.

Fonctionnement #1: séquences A ---> B ---> A

étape 9• (étape 7) de  $v_s = v_e$  à  $v_s = 0$ , on a (règle 15.1): ouverture de K1 et fermeture de K2, et la commutation est  $<0$

étape 10• de  $v_s = 0$  (étape 5) à  $v_s = v_e$  (étape 4), on a (règle 15.4): ouverture de K1 et fermeture de K2, et la commutation est  $>0$ .

Le courant de sortie  $i_s$  est toujours positif (étape 2), et on a les signes des commutations, on peut donc déterminer les types de commandes des interrupteurs.

étape 11• de (l'étape 2) et de (l'étape 9) on conclut que, (règle 14.3), K1 est à blocage commandé et (règle 14.1) K2 est à amorçage spontané.

étape 12• de (l'étape 2) et de (l'étape 10) on conclut que, (règle 14.2), K1 est à amorçage commandé et (règle 14.1) K2 est à blocage spontané.

étape 13• Les caractéristiques statiques des interrupteurs définies par la première méthode et qui sont toujours valables, nous donnent le type des interrupteurs K3 et K4 ou d'autres interrupteurs dans le cas où  $i_k = 0$  ou  $v_k = 0$ . D'où:

K1 est à amorçage et blocage commandés, il est de type "transistor",

K2 est à amorçage et blocage spontanés, il est de type "diode",

K3 est un "court-circuit",

K4 est un "circuit ouvert".

La structure est donnée à la figure V.10a.

Fonctionnement #2: séquences A ---> D ---> A

Si on suit la même logique, on déduit facilement les commandes des interrupteurs:

K1 est un "court-circuit",

K2 est un "circuit ouvert",

K3 est à amorçage et blocage commandés, il est de type "transistor",

K4 est à amorçage et blocage spontanés, il est de type "diode".

D'où la structure correspondant au deuxième fonctionnement, donnée à la figure V.10b.

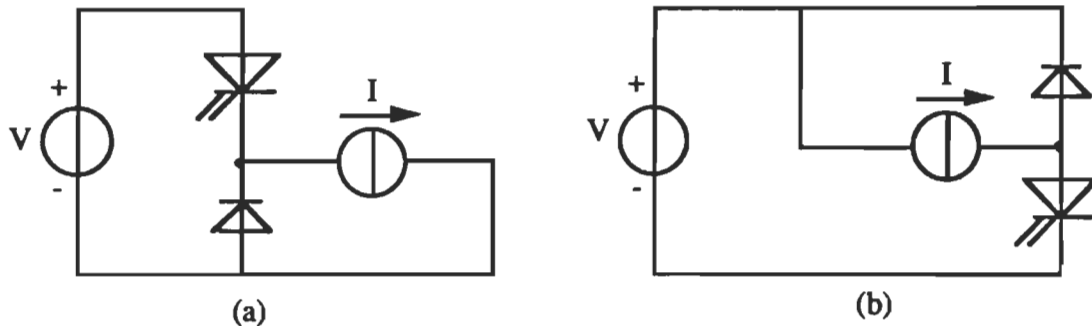


Fig. V.10 Topologies du convertisseur par application des règles de la commutation

## V. 5 CONCLUSION

Les règles générales d'électronique de puissance et de commutation sont regroupées dans ce chapitre. Elles permettent, pour une commutation donnée, connaissant les formes d'onde des sources d'entrée et de sortie, de déterminer la nature des interrupteurs de la cellule de commutation. L'application de ces règles au sein des cellules de convertisseurs va nous permettre de bâtir le logiciel de synthèse des convertisseurs statiques directs tension-courant: CAGECT.

## CHAPITRE VI

### RÉALISATION DU LOGICIEL ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE SYNTHÈSE

#### VI.1 INTRODUCTION

Après avoir défini la méthode de synthèse, nous nous proposons maintenant de réaliser un programme sur ordinateur permettant, grâce à un questionnaire évolutif, de trouver la topologie de (ou des) convertisseur(s) répondant au cahier des charges. Dans une première partie on exposera la démarche conduisant à la réalisation du logiciel CAGECT (Computer Aided GEneration of Converter Topologies) et dans une seconde partie on interprétera les résultats obtenus.

#### VI.2 RÉALISATION DU LOGICIEL "CAGECT"

##### VI.2.1 Justification de l'existence de ce logiciel

Pourquoi réaliser ce logiciel alors que la méthode définie aux chapitres précédents permet par une démarche logique de trouver le convertisseur cherché? À cela plusieurs raisons:

- réaliser un logiciel permettant grâce à un questionnaire interactif de synthétiser un convertisseur statique direct, et cela dans un très grand nombre de cas, était la preuve que la méthode utilisée ne faisait plus appel à l'intuition, mais simplement à la logique. Il ne

s'agit pas d'une reconnaissance de cas mémorisés au préalable (bibliothèque) mais bien d'un cheminement logique conduisant à la détermination de la structure;

- un autre avantage de ce logiciel par rapport à une démarche "manuelle" est sa facilité d'emploi. Pour bien utiliser la méthode expliquée aux chapitres précédents, il faut d'abord l'avoir bien assimilée, sinon le risque de faire une erreur ou d'oublier un paramètre est possible, surtout avec des sources réversibles.

Par contre, grâce à la manière conversationnelle utilisée pour traiter la problème sur ordinateur, le logiciel CAGECT est d'un emploi très simple et l'on peut même l'utiliser sans connaître la méthode de synthèse puisqu'il suffit de répondre à des questions.

- il découle une autre utilisation de ce logiciel, c'est l'aspect pédagogique qui permet de faire réfléchir des étudiants sur la conception des convertisseurs après en avoir expliqué les principes;

- possibilité d'étendre ce travail pour tenir compte d'autres types de convertisseurs: convertisseurs indirects tension-tension et courant-courant, convertisseurs triphasés, d'ajouter une librairie de composants et de leurs caractéristiques (courant maximal direct, tenue en tension inverse, leurs contraintes  $dv/dt$ ,  $di/dt$ , temps de commutation (Turn-on, Turn-off), etc.). Il sera alors possible de combiner ce logiciel avec d'autres logiciels de simulation de convertisseurs statiques en formant ainsi un système expert pour la conception, la simulation et l'analyse de défauts dans les convertisseurs statiques.

### VI.2.2 Cahier des charges

Contrairement à certains logiciels [2] où le cahier des charges représente les réversibilités des sources d'entrée et de sortie, le logiciel CAGECT analyse les formes d'ondes de ces sources. Quatre formes d'onde sont à analyser: la tension et le courant

d'entrée, la tension et le courant de sortie. Mais trois formes sont indépendantes, la quatrième peut être facilement déduite en appliquant les lois des mailles et des noeuds à chaque séquence de fonctionnement du convertisseur. Deux possibilités sont alors à envisager dans le cas des convertisseurs directs tension-courant: analyser la tension d'entrée, le courant et la tension de sortie ou la tension et le courant d'entrée et le courant de sortie. C'est la première possibilité qui a été utilisée dans notre logiciel. L'utilisateur choisit les numéros des formes d'onde correspondant à la tension d'entrée, au courant et à la tension de sortie pour un convertisseur tension-courant, et le courant d'entrée, la tension et le courant de sortie pour un convertisseur courant-tension. Dans ce but, une librairie de formes d'onde est proposée à l'utilisateur (Fig. VI.1). Elle contient actuellement huit formes d'onde.

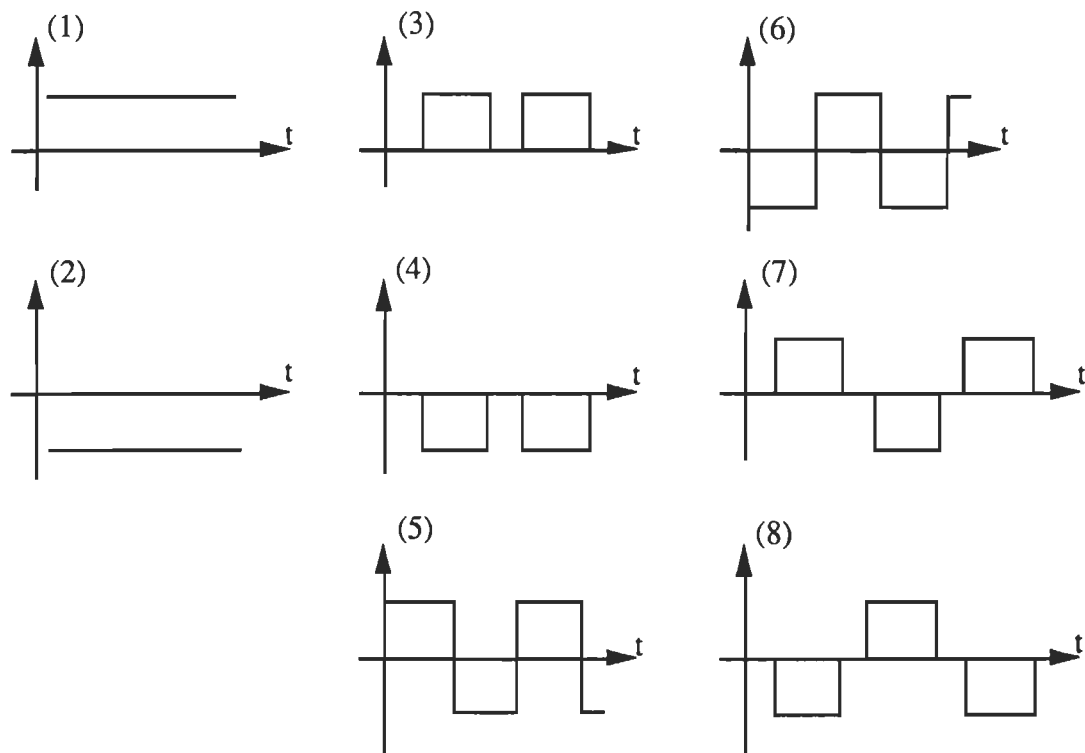


Figure VI.1 Librairie des formes d'ondes



### VI.2.3 Réalisation du logiciel

Nous n'entrerons pas ici dans les détails pratiques de programmation qui font l'objet de l'annexe I. Par contre, nous essayerons de dégager les grandes lignes de ce logiciel. Il se divise en plusieurs grandes parties comme le montre l'organigramme de la figure VI.2. L'annexe I fournit sous forme d'une disquette la version exécutable du logiciel "CAGECT".

Dans un premier temps nous caractérisons la nature de la source d'entrée (source de tension ou source de courant) afin de déterminer la structure de base (figure I.13). À partir des formes d'onde choisies, on étudie d'abord les réversibilités des sources d'entrée et de sortie ce qui nous permet de déterminer les caractéristiques statiques de chacun des interrupteurs; ensuite nous déterminons les séquences de fonctionnement qui permettent de définir les états des interrupteurs (fermé, ouvert). Le passage d'une séquence de fonctionnement à une autre nous permet d'identifier le changement d'état de certains interrupteurs: ouverture d'un interrupteur fermé, fermeture d'un interrupteur ouvert, de ceux qui ne changent pas d'état (toujours ouvert ou toujours fermé).

Dans une seconde étape, l'application des règles générales de commutation nous permet de déterminer les modes de commutation des interrupteurs.

On peut alors déterminer les différentes structures dans certains cas, unique dans d'autres. Dans le cas où la structure est unique le logiciel ne nous fournira qu'un seul schéma de convertisseur, dans le cas où elles sont multiples, il nous fournira toutes les possibilités. Le logiciel nous fournira également les caractéristiques statiques des interrupteurs synthétisés.

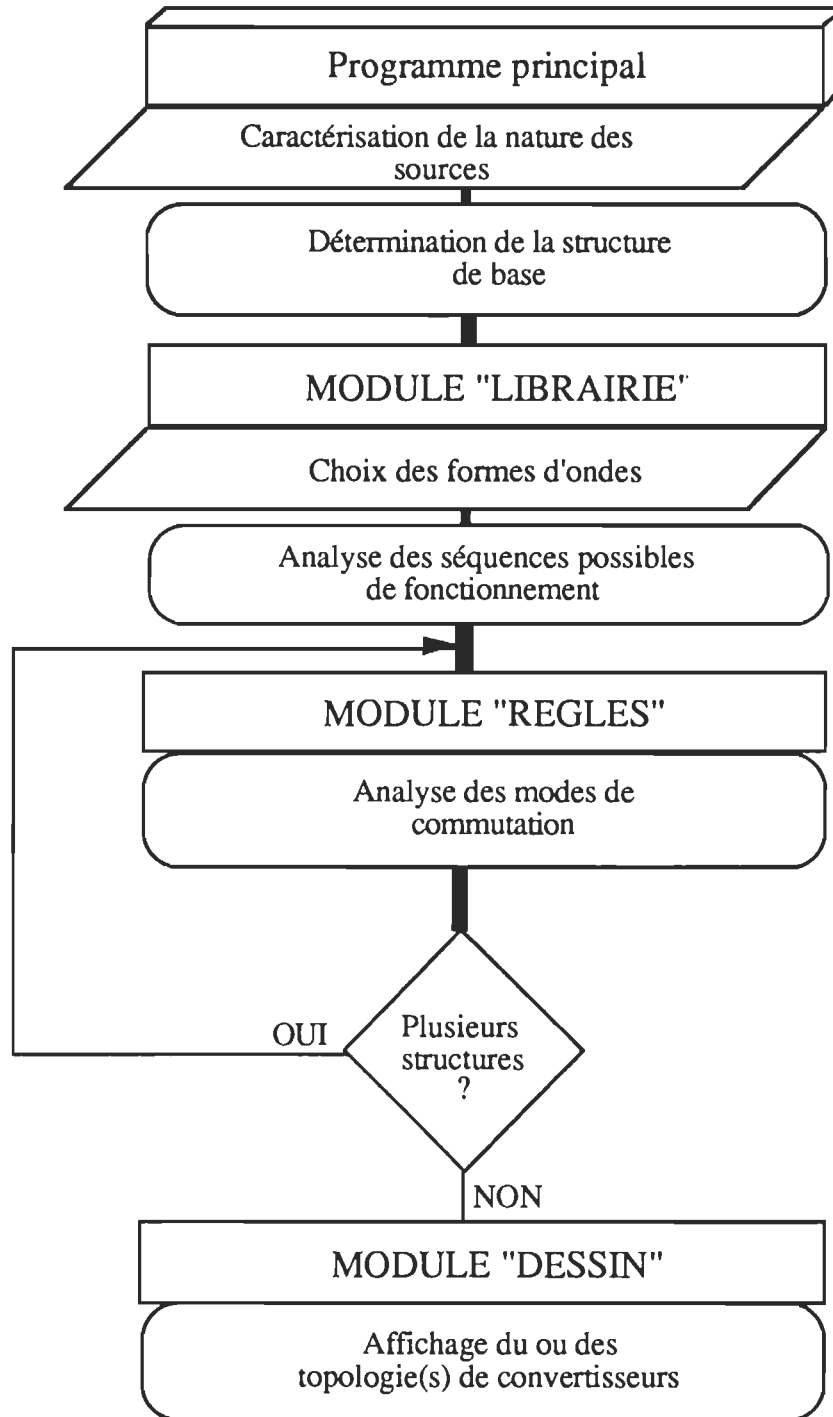


Figure VI.2 Organigramme du logiciel "CAGECT"

Pour terminer donnons quelques ordres de grandeurs. Le logiciel "CAGECT" peut être implanté sur n'importe quel ordinateur compatible IBM. Il est divisé en trois grands modules: "Règles", "Librairie" et "Dessin". Ils sont tous écrits en TURBO C 2.0 et occupent environ 111 K octets de mémoire.

Dans cette première version, le logiciel "CAGECT" propose les topologies des convertisseurs statiques directs tension-courant connaissant leurs formes d'ondes (tension d'entrée, courant et tension de sortie). Dans la version finale, il sera capable de proposer les structures des convertisseurs statiques directs courant-tension connaissant leurs formes d'ondes (tension ou courant d'entrée, tension et courant de sortie).

### VI.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS

Une fois programmée la méthode de détermination automatique, nous avons envisagé tous les cas possibles d'études. Nous avons alors retrouvé un grand nombre de montage connus (redresseurs, hacheurs, onduleurs, gradateurs...), mais aussi des convertisseurs moins connus ou moins utilisés. Nous avons dénombré 356 cas synthétisables (dans le cas des C.S.D.T.C) dont certains d'entre eux possèdent plusieurs solutions.

Le tableau tridimensionnel de la figure VI.3 dénombre les solutions possibles où l'axe vertical représente la tension d'entrée  $v_e$ , l'axe horizontal le courant de sortie  $i_s$  et l'axe de profondeur la tension de sortie  $v_s$ . Le premier plan de la figure correspond à  $v_s = 1$ .

Dans ce tableau, un "1" correspond à "une solution" et un "0" correspond à "pas de solution".

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. VI.3 Possibilités de convertisseurs statiques directs tension-courant

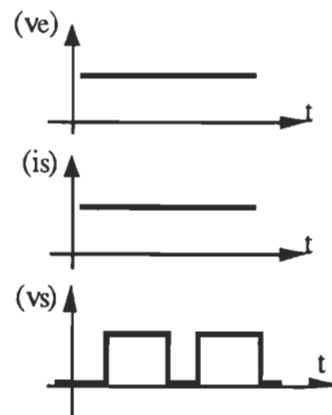
Après identification de la source d'entrée, qui est une source de tension, le logiciel affiche la structure générale tension-courant avec les caractéristiques statiques  $i_k(v_k)$  des quatre interrupteurs (Fig. VI.4). Le logiciel pose trois questions concernant les formes d'onde de la tension de la source d'entrée, le courant et la tension de la source de sortie. Ces formes sont sélectionnées à partir de la librairie des formes d'onde (Fig. VI.1). Le programme nous affiche la ou les structures correspondantes. Dans le cas où il n'y a pas de solution, le logiciel affiche "Pas de solution".

Dans la suite, on présente quelques exemples de synthèse fournis par le logiciel "CAGECT". Les résultats complets sont donnés en annexe-I sous forme d'une disquette

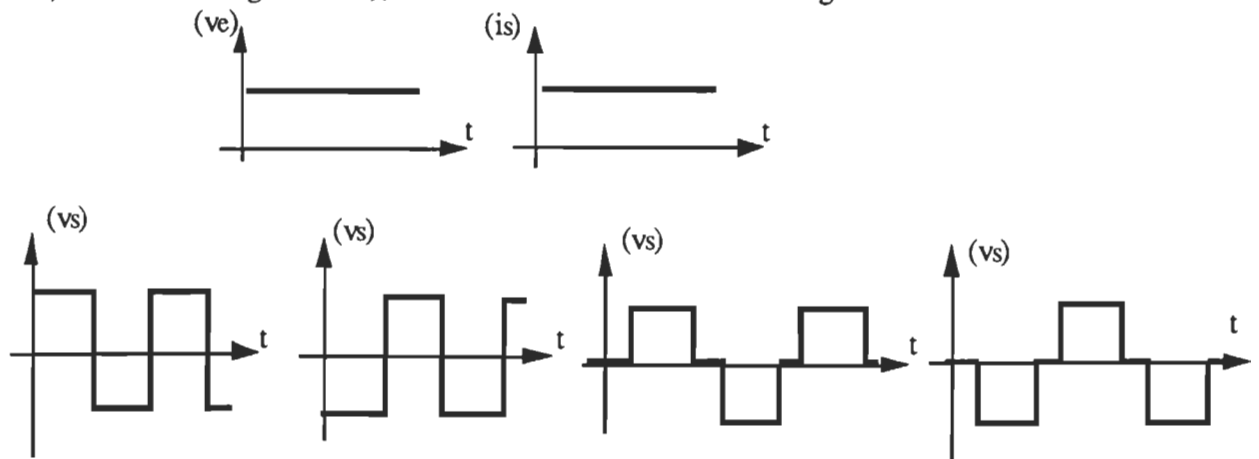
qui contient le programme sous une forme exécutable: "CAGECT.EXE", avec un guide d'utilisation.

### VI.3.1 Convertisseurs continu-continu: hacheurs

Nous retrouvons tous les montages classiques à transistors. Pour des sources non réversibles ( $v_e="1"$ ,  $i_s="1"$  et  $v_s="3"$  de la figure VI.1), nous retrouvons le hacheur dévolteur à transistor (Fig. VI.5).

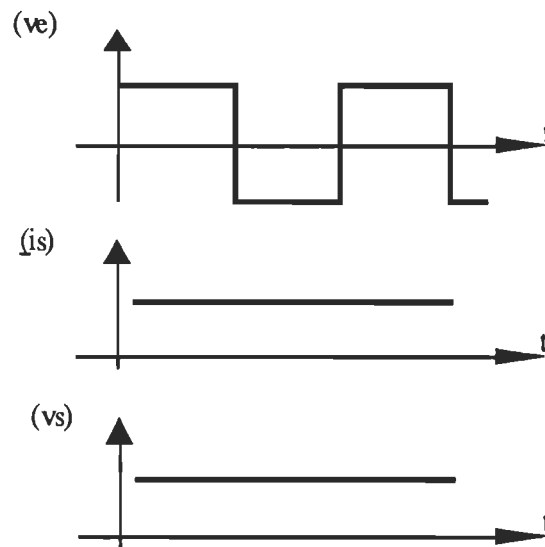


Pour une source de courant bidirectionnelle en tension ( $v_e="1"$ ,  $i_s="1"$  et  $v_s="5"$ , "6", "7", ou "8" de la figure VI.1), nous trouvons le hacheur de la figure VI.6.



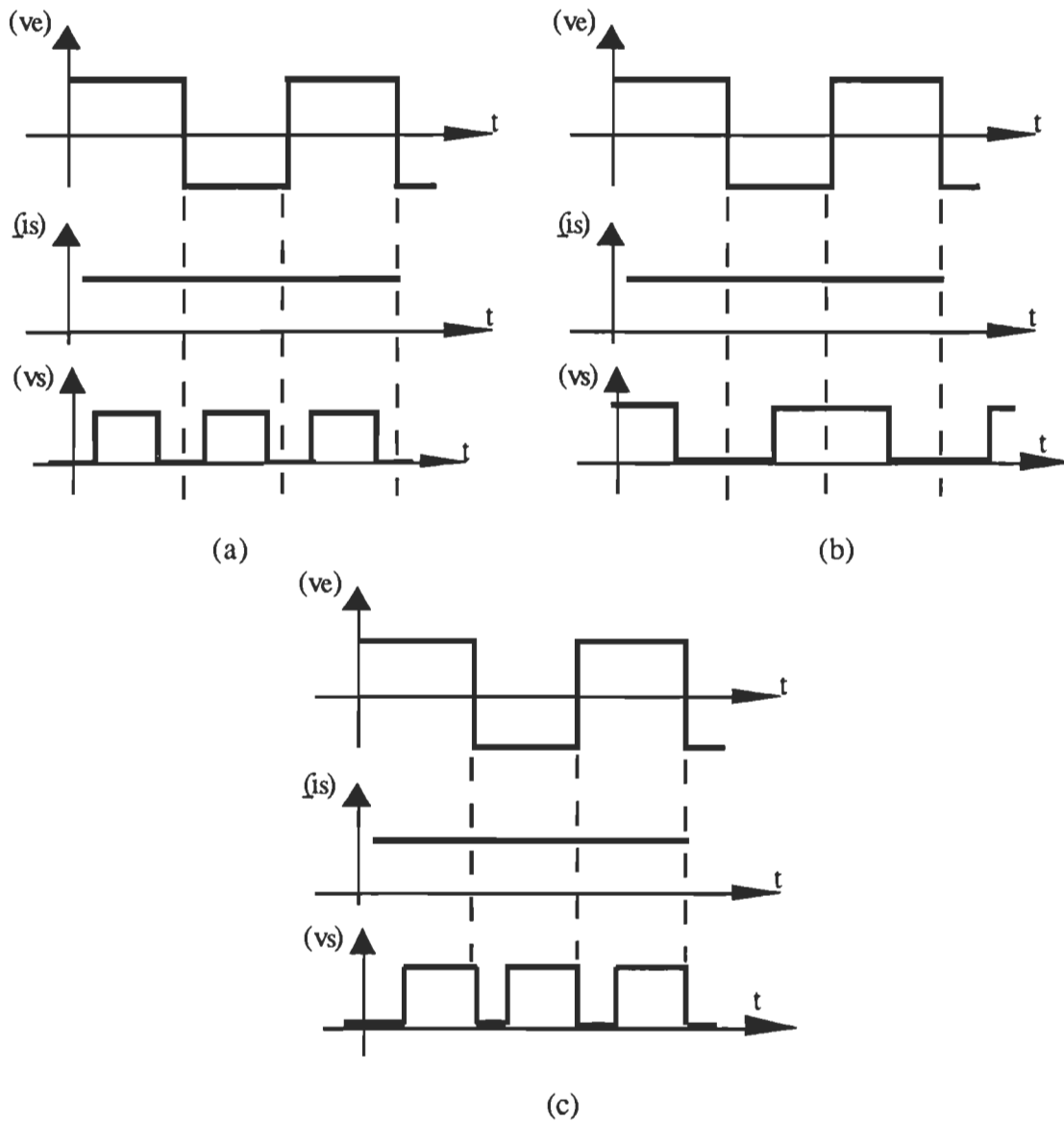
### VI.3.2 Convertisseurs alternatif-continu: Redresseurs

Pour une source de tension bidirectionnelle en tension et une source de courant unidirectionnelle en courant et en tension ( $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "1"$  de la librairie de formes d'onde, Fig. VI.1), nous retrouvons le redresseur à diodes (Fig. VI.7).

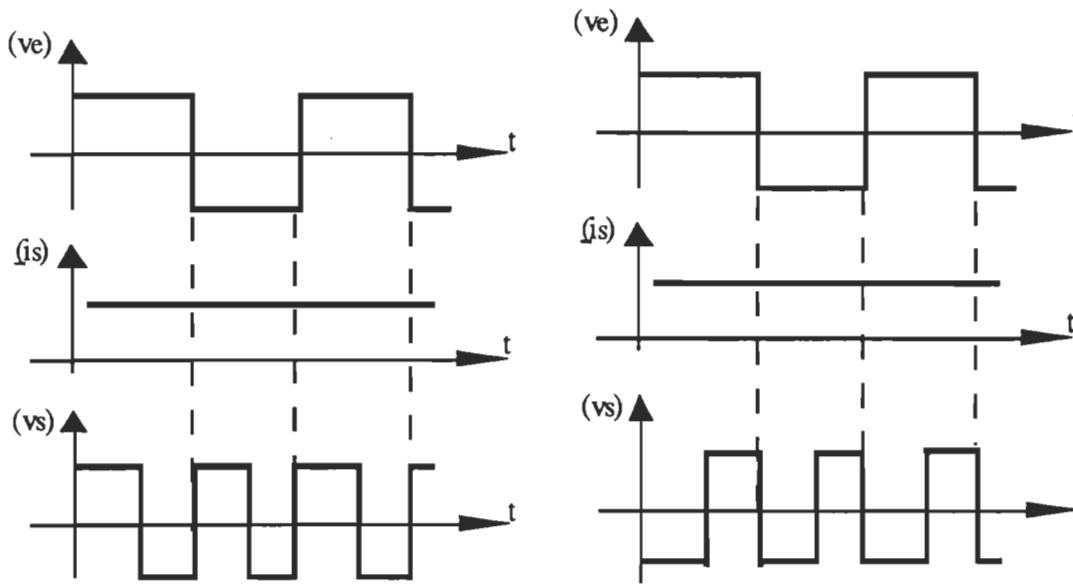


Pour une tension de sortie de la forme "3" ( $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "3"$ ), on trouve la structure de la figure VI.8a (correspondante à un redresseur à modulation de largeur d'impulsion), et un autre redresseur à thyristor/thyristor-diode-dual (Fig. VI.8b).

On retrouve encore les redresseurs mixtes ayant un bras à thyristors et un autre à diodes (Fig. VI.8c et VI.8d)



Pour  $v_s = "5"$  ( $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "5"$ ), on obtient le redresseur tous thyristors-diodes-duaux (Fig. VI.9) et pour  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "6"$  le redresseur tous thyristors (Fig. VI.10).

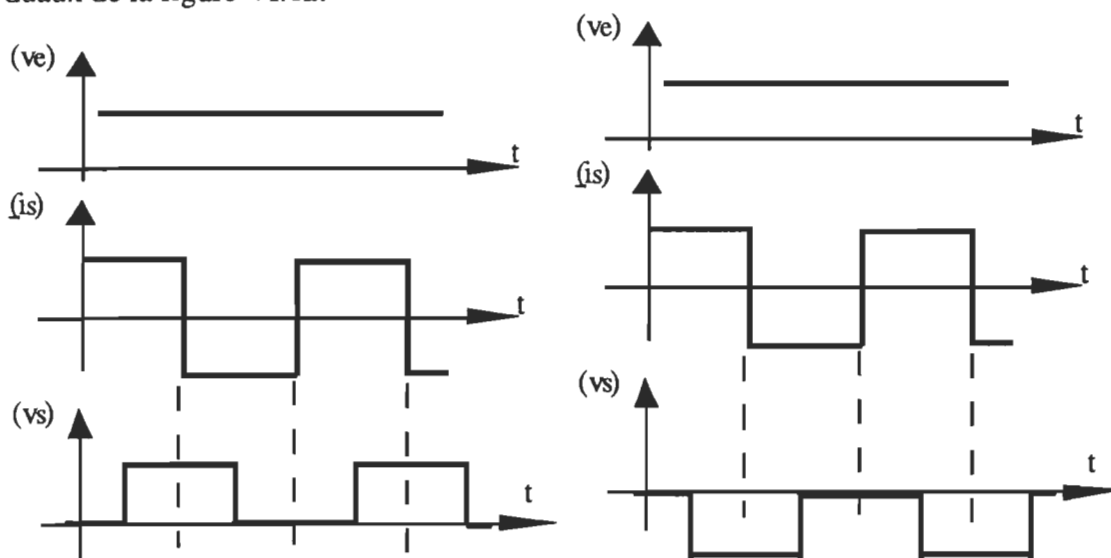


### VI.3.3 Convertisseurs continu-alternatif: Onduleurs

La tension d'entrée est continue ( $v_e = "1"$ ) et le courant de sortie est réversible ( $i_s = "5"$ ).

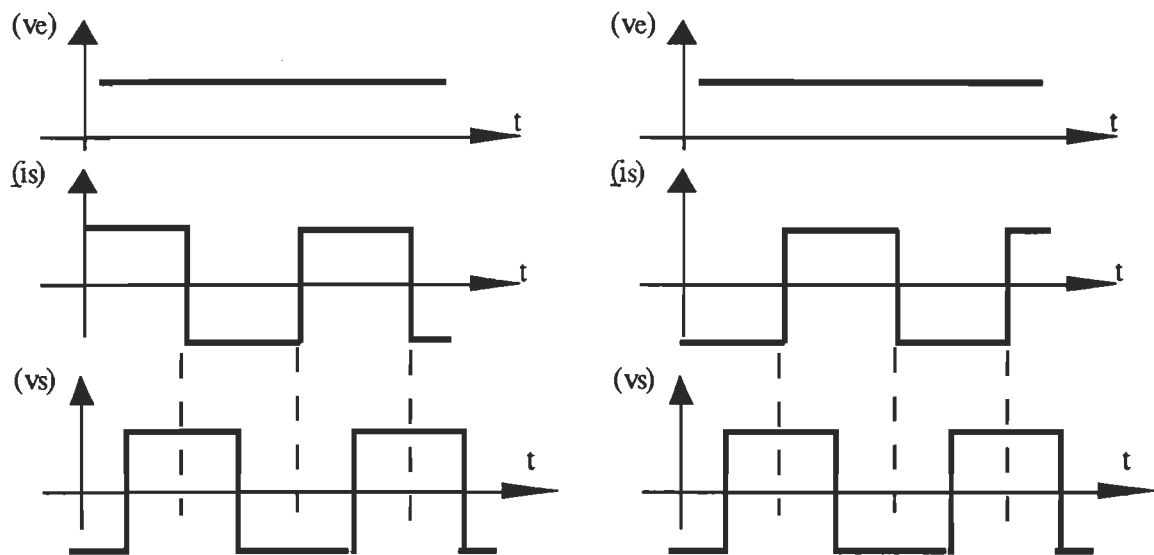
Pour une tension de sortie  $v_s = "3"$ , nous présentons une des deux structures comportant un bras à thyristors-diodes telle que montré à la figure VI.11.

Pour  $v_s = "4"$ , nous présentons une de deux structures comportant un bras à thyristors-duaux de la figure VI.12.





Pour  $v_s = "5"$  ou  $"6"$ , on trouve l'onduleur à déphasage arrière (tension de la sortie est en retard par rapport au courant de la sortie) ayant deux bras à thyristors-duaux (Fig. VI.13). Alors que pour  $v_e = "1"$ ,  $i_s = "6"$  et  $v_s = "5"$  ou  $"6"$ , on trouve l'onduleur à déphasage avant (tension de la sortie est en avance par rapport au courant de la sortie) ayant deux bras à thyristors-diodes (Fig. VI.13).



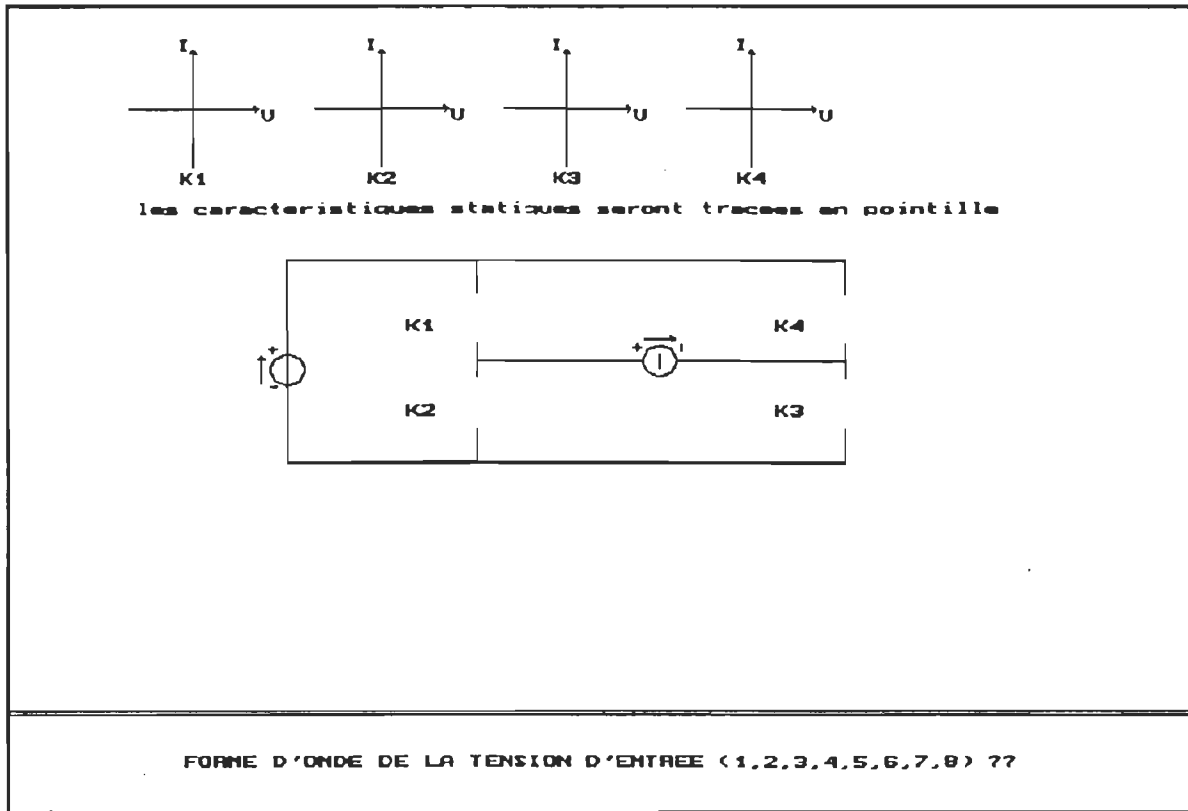


Fig. VI.4 Structure générale des convertisseurs tension-courant

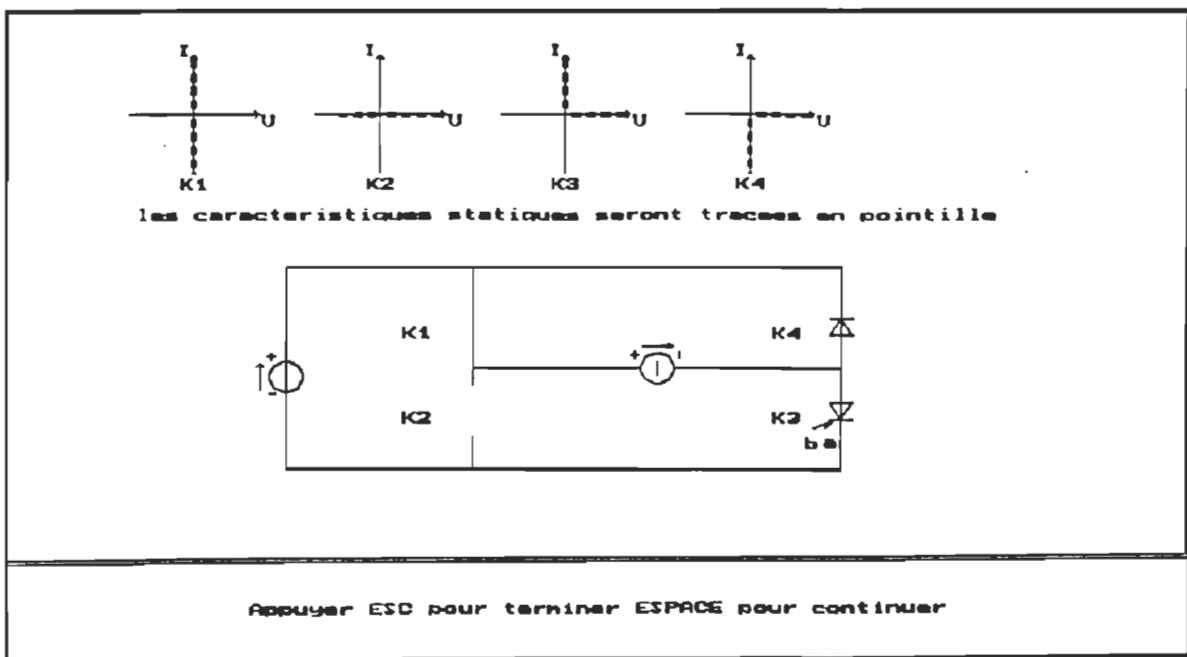
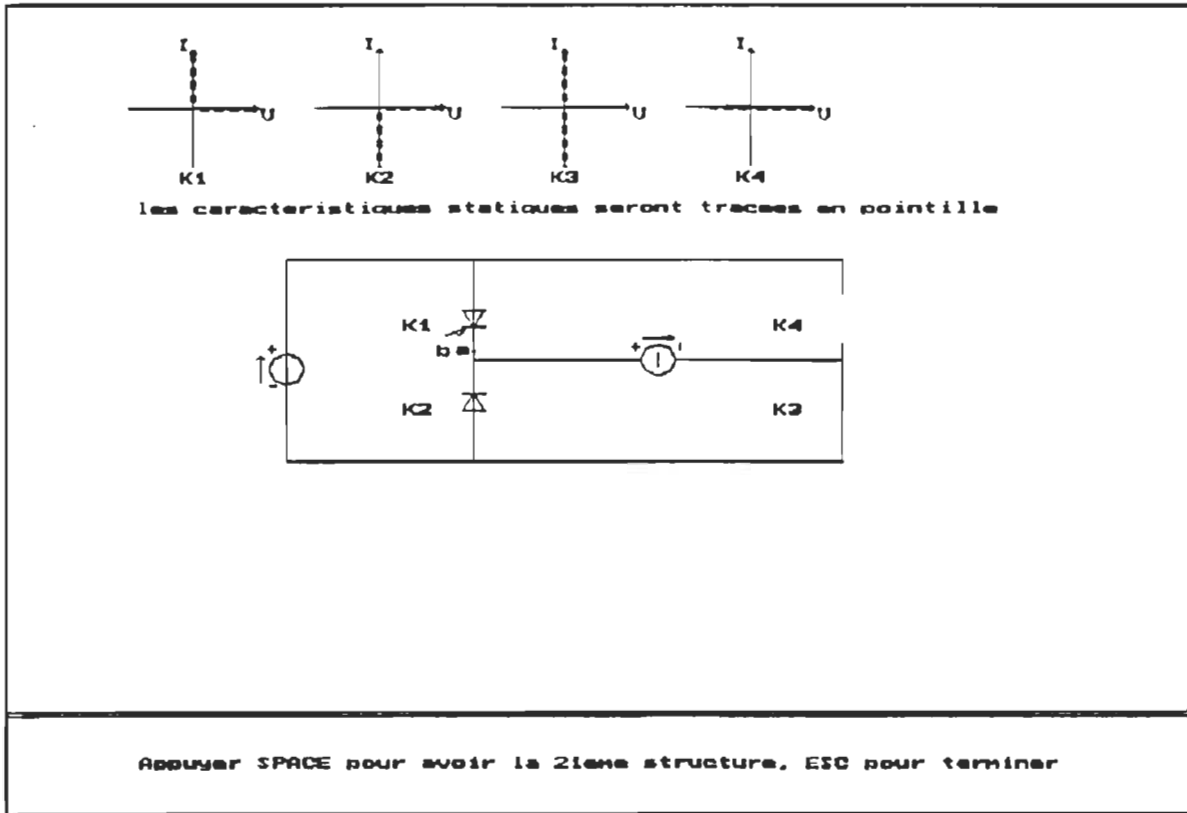


Fig. VI.5 Hacheurs dévolteurs ( $v_e = "1"$ ;  $i_s = "1"$ ;  $v_s = "3"$ )

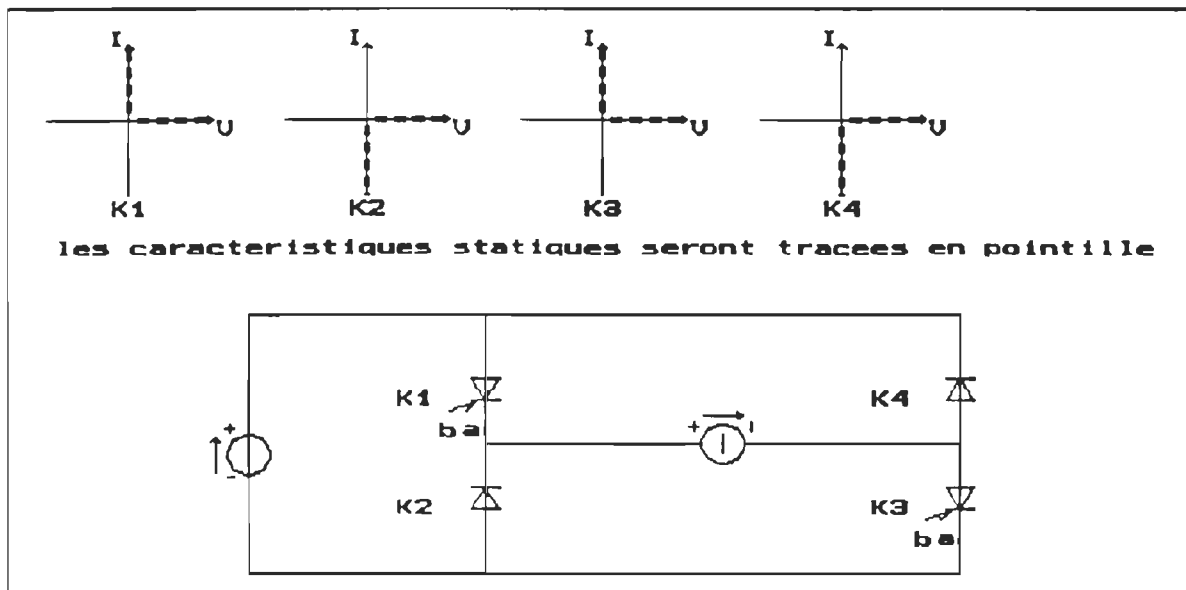


Fig. VI.6 Hacheur à transistors ( $v_e = "1"$ ;  $i_s = "1"$ ;  $v_s = "5", "6", "7"$  ou  $"8"$ )

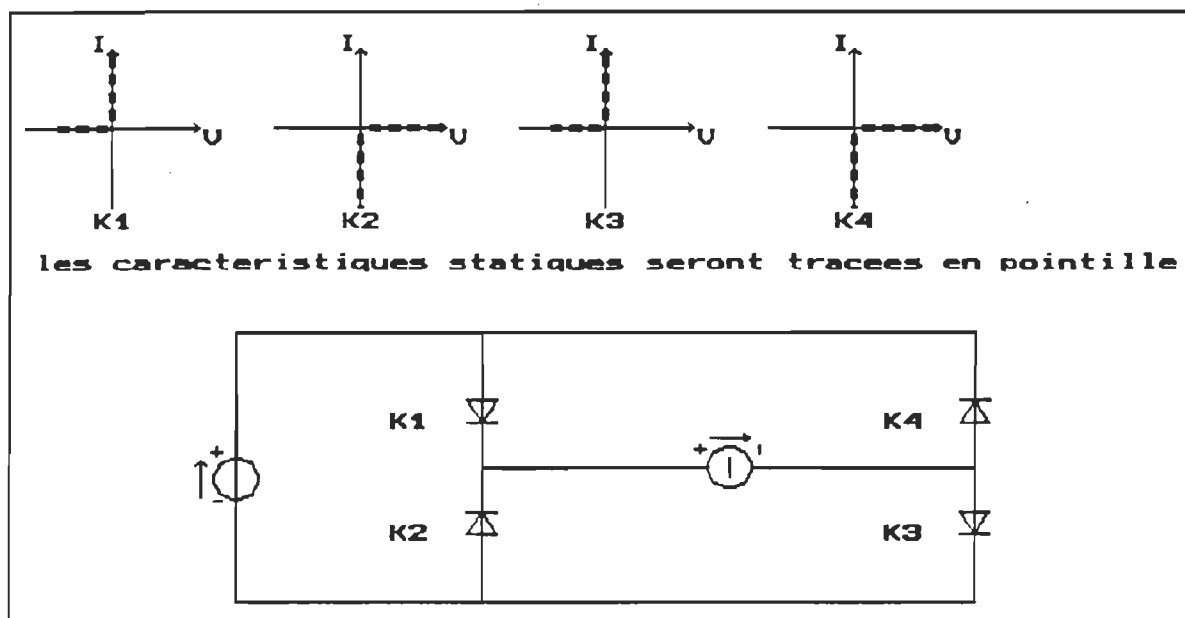
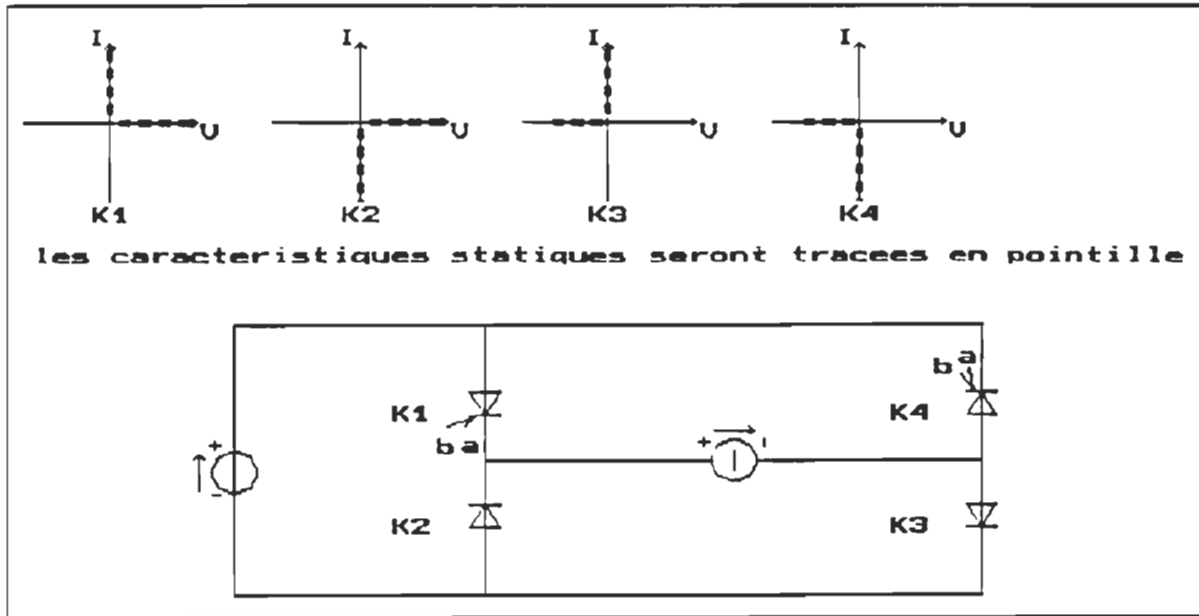


Fig VI.7 Redresseur à diodes ( $v_e = "5"$ ;  $i_s = "1"$ ;  $v_s = "1"$ )



a)

b)

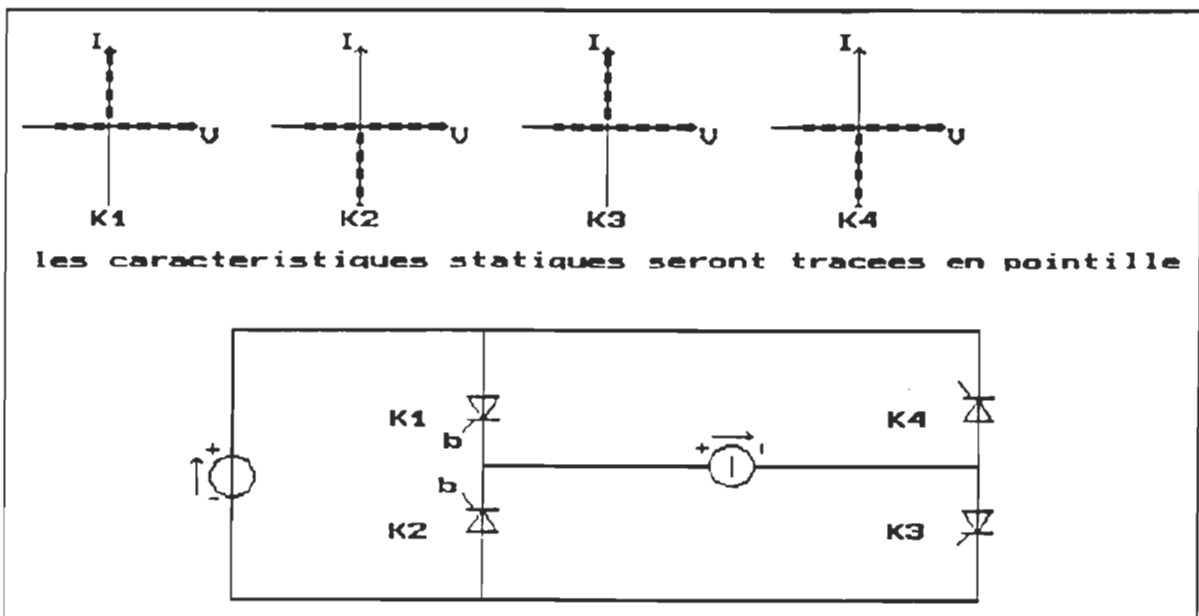
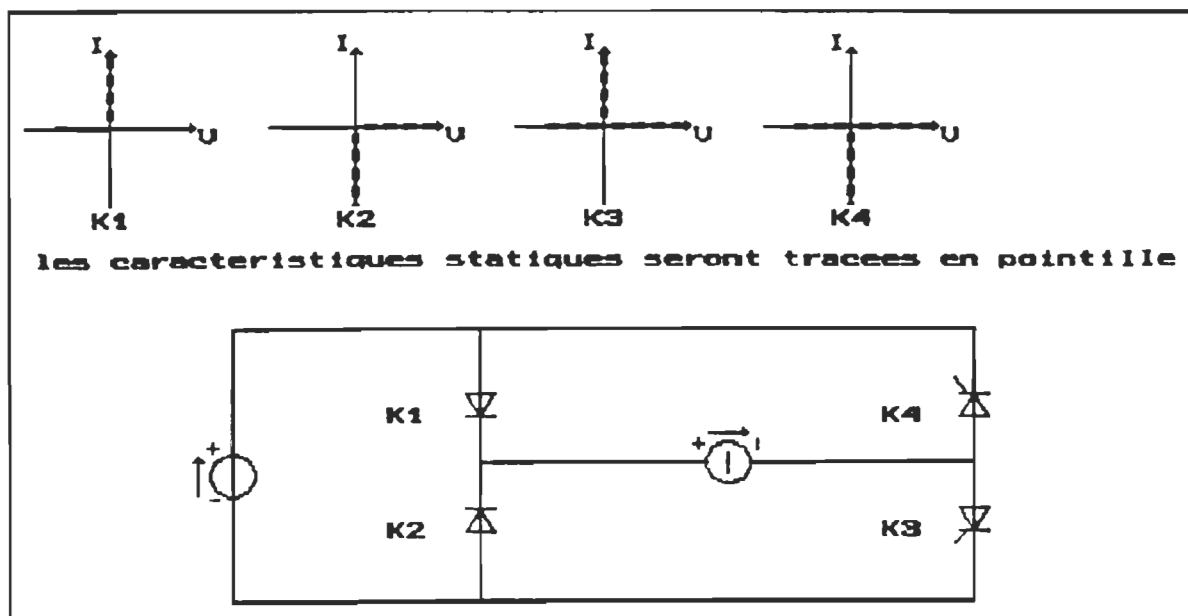


Fig. VI.8 Structures des redresseurs ( $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "3"$ )



c)

d)

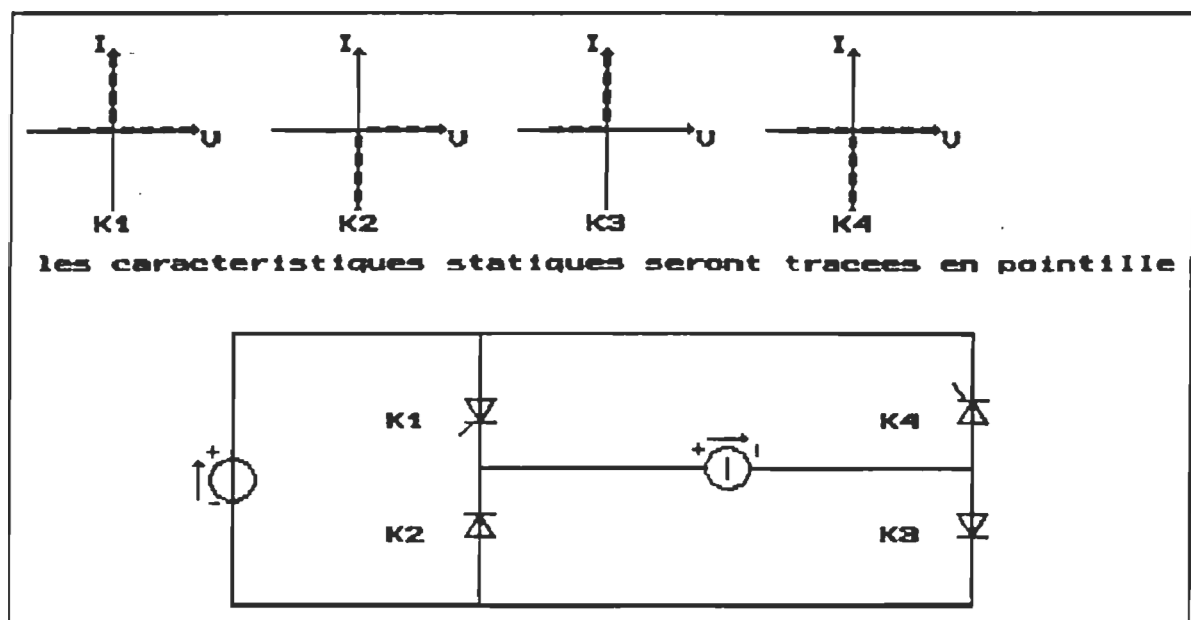


Fig. VI.8 (suite)

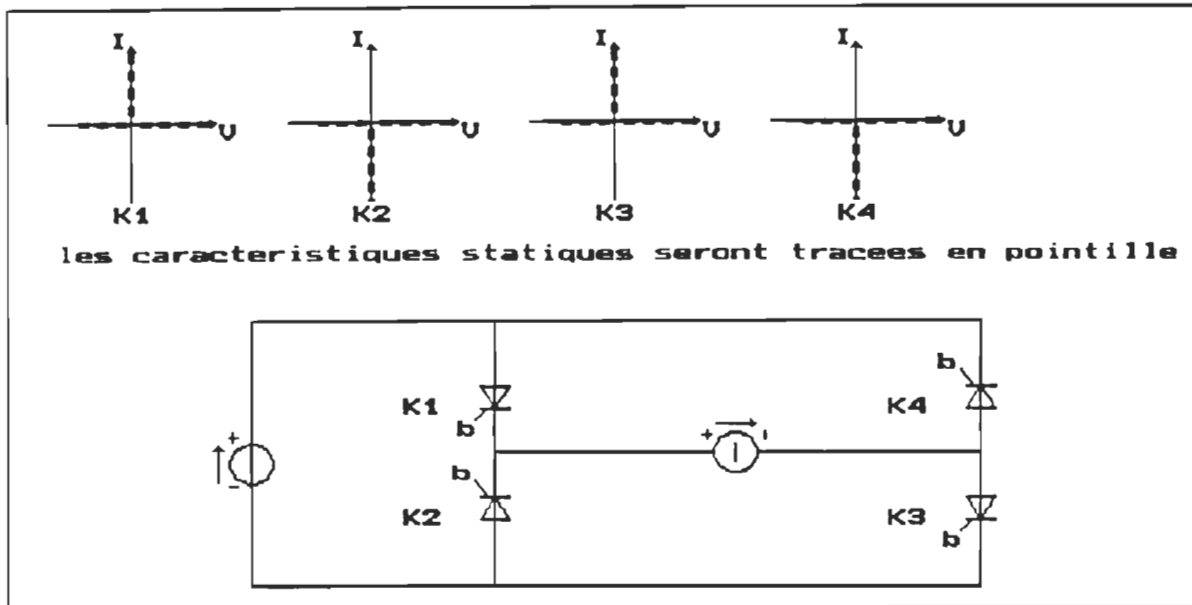


Fig. VI.9 Redresseurs à thyristors-diodes-duaux ( $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "5"$ )

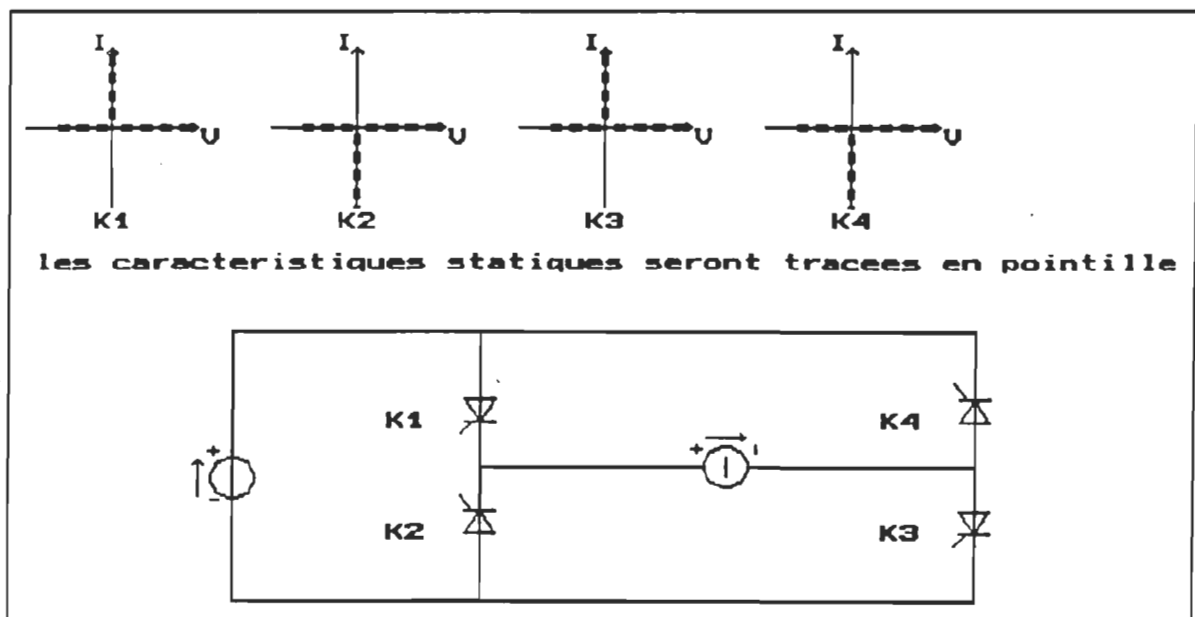
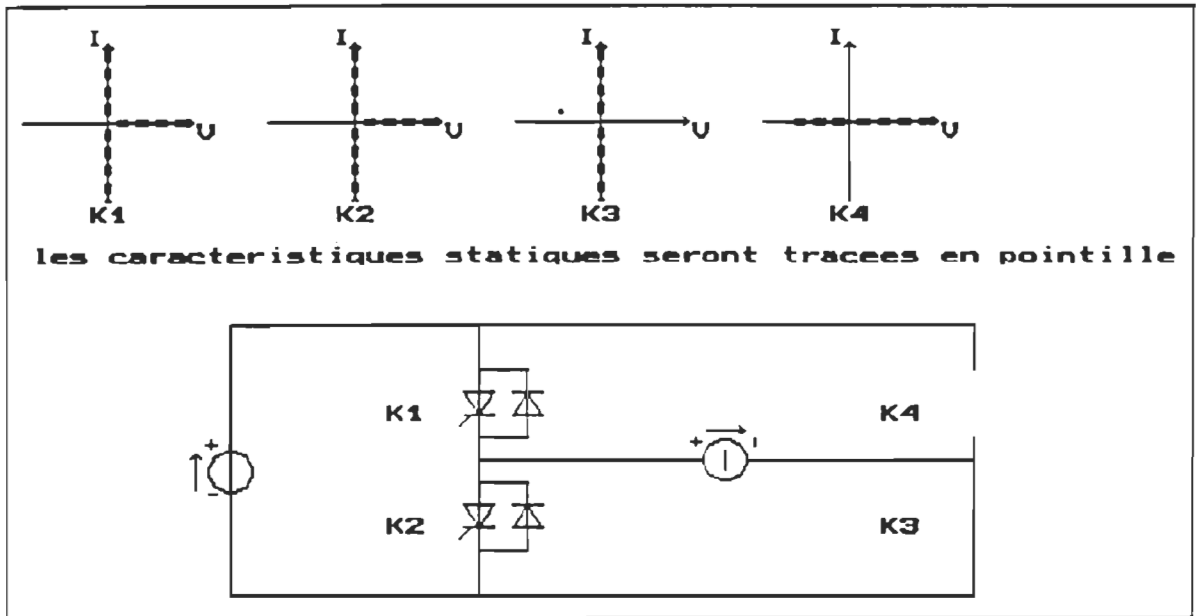
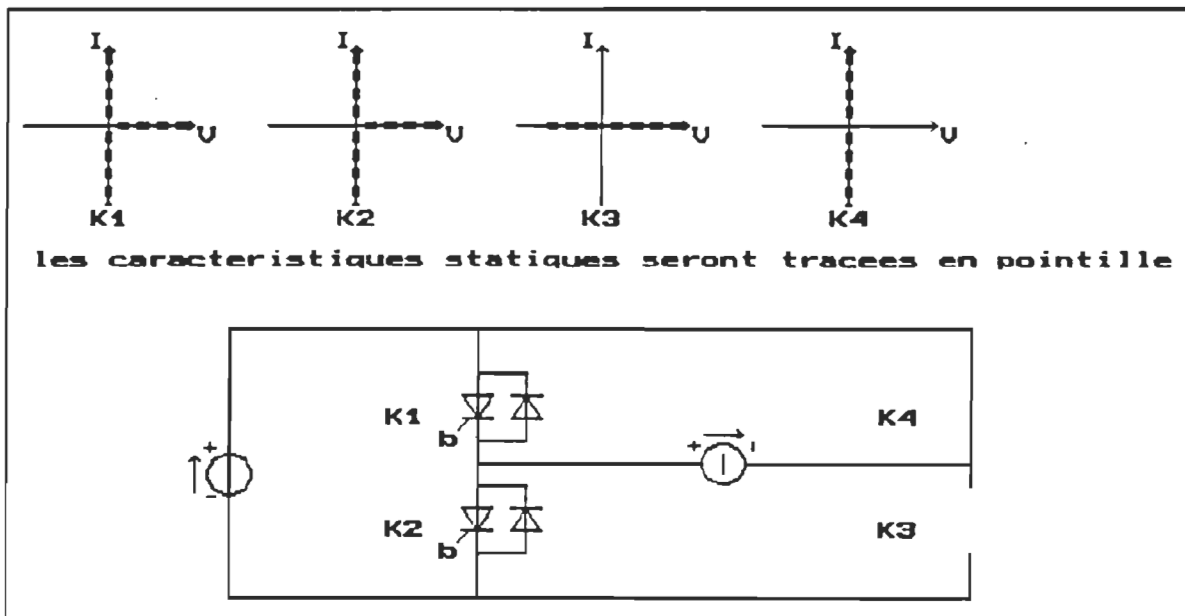
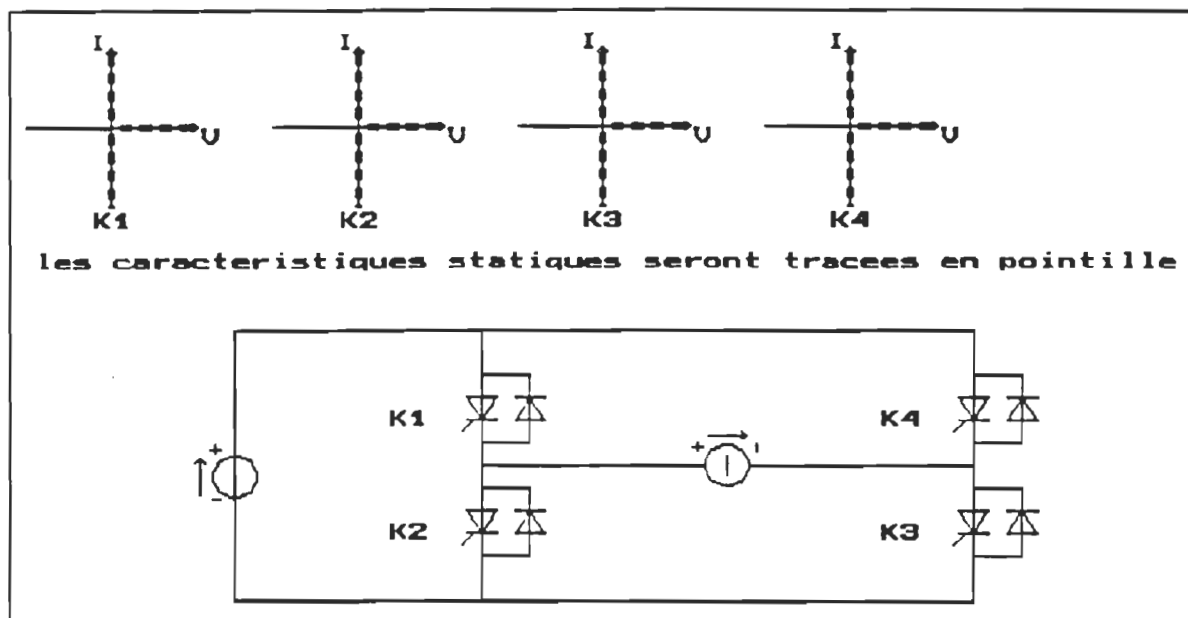
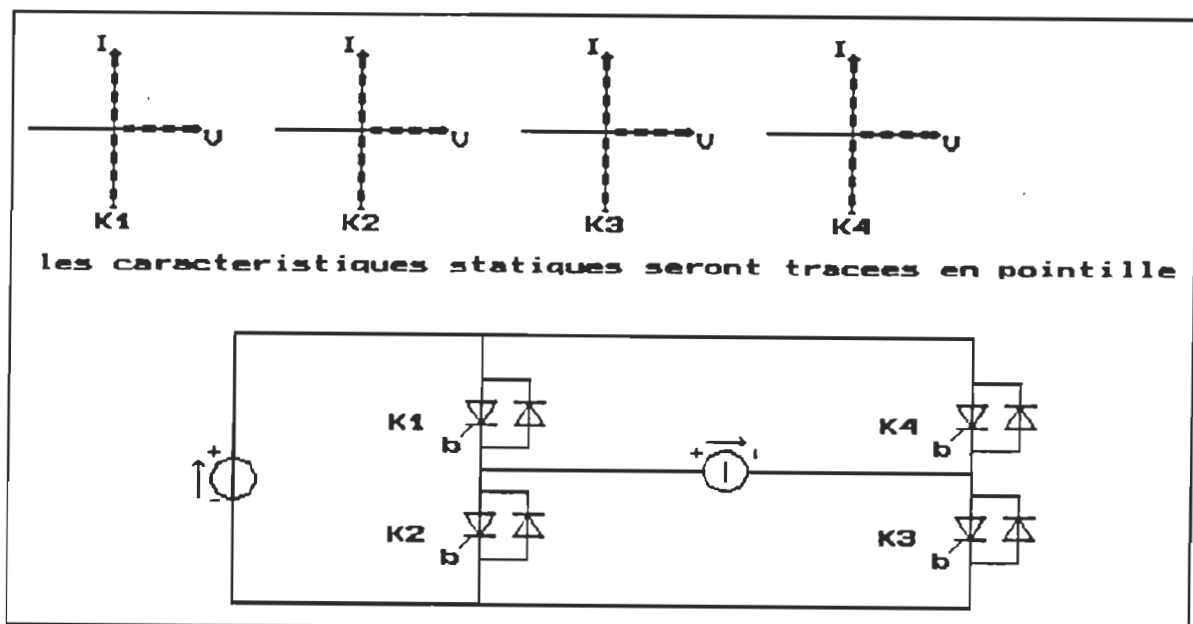


Fig. VI.10 Redresseurs à thyristors ( $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "6"$ )

Fig. VI.11 Onduleur à thyristors-diodes ( $v_e = "1"$ ,  $i_s = "5"$  et  $v_s = "3"$ )Fig. VI.12 Onduleur à thyristors-duaux ( $v_e = "1"$ ,  $i_s = "5"$  et  $v_s = "4"$ )



Fig. VI.13 Onduleur à thyristors-diodes ( $v_e = "1"$ ,  $i_s = "5"$  et  $v_s = "5"$  ou  $"6"$ )Fig. VI.14 Onduleur à thyristors-duaux ( $v_e = "1"$ ,  $i_s = "6"$  et  $v_s = "5"$  ou  $"6"$ )

#### VI.4 CONCLUSION

Notre logiciel nous a permis de retrouver tous les montages connus et de synthétiser également d'autres qui le sont moins. Nous retrouvons donc bien les deux utilisations que nous avons entrevues au départ: l'aspect éducatif et l'aspect recherche. En effet notre logiciel démontre de façon simple que les convertisseurs statiques sont issus d'un raisonnement logique. Ce dernier peut être appliqué pour améliorer les performances de ce logiciel afin de synthétiser les convertisseurs directs courant-tension ainsi que les convertisseurs indirects tension-tension et courant-courant.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans les trois premiers chapitres nous avons présenté les principales techniques aboutissant à la connaissance d'une méthode de synthèse automatique de convertisseurs statiques.

La notion de cellule de commutation, devenue maintenant courante, et son utilisation ont été exposées pour l'étude des aspects local et système du processus de commutation. Nous avons montré comment nous pouvons utiliser cette notion à l'aide d'une méthode de synthèse qui analyse les formes d'ondes des sources d'entrée et de sortie du convertisseur dont on cherche la topologie.

Le logiciel obtenu "CAGECT" élabore la solution en utilisant les règles de la synthèse, établies et écrites en TURBO C au sein du programme, et les données concernant les propriétés des sources et des interrupteurs. Le dialogue est ici convivial avec affichage des résultats sous forme graphique. Ce logiciel tente de regrouper les résultats obtenus au cours de plusieurs décennies d'expérience dans le domaine des convertisseurs statiques. Il nous permet de trouver de façon systématique les structures de convertisseurs connues mais aussi des topologies moins connues. Nous avons donné au chapitre VI quelques exemples de ces topologies, générés à l'aide du "CAGECT".

Cela ne signifie bien évidemment pas que toutes les structures ainsi synthétisées soient plus performantes que certaines des structures plus utilisées mais cela représente en tous cas un vaste champ d'investigation pour la recherche en matière de convertisseurs statiques.

La méthode proposée ne remplace pas l'ingénieur de conception car elle ne prétend pas être absolue, le cahier de charge est simplifié et de nombreux aspects dont notamment l'aspect économique n'interviennent pas dans cette synthèse.

Le logiciel "CAGECT" est un logiciel ouvert, dont le champ d'application pourra être facilement étendu en ajoutant des règles et des données pour la synthèse des topologies des convertisseurs indirects tension-tension, courant-courant, des convertisseurs triphasés ou la prise en compte des propriétés intrinsèques des interrupteurs par exemple.

Ce travail pourrait aussi être intégré dans un environnement plus général de système expert pour la conception, la simulation et l'étude de fonctionnement en régimes anormaux (par exemple des défauts électriques) dans les convertisseurs statiques.

## RÉFÉRENCES

- [1] H. Foch et al., Méthode d'études des convertisseurs statiques. Réf. 78005, Ed. Mentor, 12 avenue du plan de l'église 78960 Voisins-les-Bretonneux, France.
- [2] Y. Mopty, Méthode de synthèse automatique des convertisseurs statiques. Application à la recherche de nouveaux convertisseurs, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP Toulouse, 1982.
- [3] Y. Cheron, La commutation douce dans la conversion statique de l'énergie électrique, TEC&DOC Lavoisier, ISBN2-85206-530-4.
- [4] H. Foch, et al., "Électronique de puissance", Extrait de "Les techniques de l'Ingénieur", 1989.
- [5] C. Desoer et E. Kuth, Basic Circuit Theory, New York, McGraw-Hill, 1969.
- [6] J. Lagasse, Étude des circuits électriques. Ed. Eyrolles, Tome 1, 1965.
- [7] S. Freeland, "Techniques for the Practical Application of Duality to Power Circuits," IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1989, pp. 114-123.
- [8] S. Cuk, "General Topological Properties of Switching Structures," IEEE Power Electronics Specialists Conference, June, 1979, pp. 109-130.
- [9] Y. Cheron, H. Foch et J. Roux, "Étude d'une nouvelle utilisation des transistors de puissance dans les convertisseurs haute tension à fréquence élevée," Revue Physique Appliquée, Juin 1981, pp. 333-342.
- [10] Y. Cheron, "Analyse des contraintes subies par les interrupteurs pendant les commutations. Recherche des règles de leur utilisation optimale dans les convertisseurs," Journées GRECO, Toulouse, 1987.

- [11] M. Metz, Y. Cheron, F. Oms, S. Bendoual, "Commutation douce: une façon de réduire les EMI et RFI," *Électronique de Puissance*, No 31, février 1989, pp. 38-44.
- [12] Y. Cheron, Application des règles de la dualité à la conception de nouveaux convertisseurs à transistors de puissance. Synthèse du thyristor dual. Domaine d'application. Thèse de Docteur-Ingénieur, INP Toulouse, 1982.
- [13] A. Courteix, Y. Cheron, H. Foch et Metz, "Application à un convertisseur continu-alternatif complexe d'une méthode systématique de synthèse," *Revue Physique Appliquée*, No 6, Juin 1986, pp. 357-364.
- [14] D. Maksimovic and S. Cuk, "General Properties and Synthesis of PWM DC-to-DC Converters," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1989, pp. 515-524.
- [15] A.K.S. Bhat and F.D. Tan, "A Unified Approach to Characterization of PWM and Quasi-PWM Switching Converters: Topological Constraints, Classification and Synthesis," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1989, pp. 760-767.
- [16] M. Saad, Synthèse des convertisseurs statiques directs, Rapport de stage, Toulouse, 1991.
- [17] S. Cuk and R. D. Middlebrook, "A New Optimum Topologie Switching DC-to-DC Converter," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1977 Record, pp. 160-179.
- [18] T. Meynard, Commutation douce appliquée aux alimentations à découpage, Thèse de Docteur, INP Toulouse, France, 1988.
- [19] D. Maksimovic and S. Cuk, "A General Approach to Synthesis and Analysis of Quasi-Resonant Converters," *IEEE PESC*, 1989 Record, pp. 713-727.

## **ANNEXE I**

**GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL "CAGECT"**

Une disquette 3"1/2 compatible IBM contient l'exécutable du programme "CAGECT.EXE" et des fichiers (\*.BGI) pour adapter l'écran dans le cas où il s'agit d'écrans CGA, EGA, etc. Pour activer le logiciel "CAGECT", on procède comme suit:

- insérer la disquette qui contient le logiciel "CAGECT" dans un lecteur (lecteur A ou B selon le cas);
- changer le répertoire dans lequel se trouve la disquette (par exemple, si vous êtes dans le répertoire D et la disquette "CAGECT" se trouve dans B, changer pour le repertoire B en tapant (B: suivi par RETURN):

```
D:\> B:
```

Remarque: Pour connaître les fichiers qui existent dans la disquette "CAGECT", taper (DIR suivi par RETURN):

```
D:\> B: dir
```

- Pour commencer la conception taper le nom du programme CAGECT suivi d'un RETURN:

```
B:\> cagect
```

- (étape 1) Une page de présentation du programme est affichée indiquant le nom du programme, le lieu et la date de conception du programme. Pour continuer appuyer sur une touche du clavier.

Les questions apparaissent toujours dans une fenêtre en bas de l'écran.

- (étape 2) La première question est (Fig. A.I.2):

```
L'entrée est-elle une source de tension (O/N)??
```

Le programme ne fait pas de différence pour les caractères majuscules ou minuscules, donc vous pouvez utiliser l'un des deux au choix.

Pour répondre à la question posée, tapez la lettre: **O**



- (étape 3) Le programme affiche la structure générale des convertisseurs tension-courant ainsi que les axes pour les caractéristiques statiques des interrupteurs (Fig. A.I.3).
- (étape 4) Le logiciel demande les formes d'onde des sources en commençant par la forme d'onde de la tension d'entrée (Fig. A.I.3). Vous pouvez choisir une forme d'onde parmi les huit formes données par la librairie des formes d'onde (Fig. A.I.1). Tapez un chiffre entre un (1) et huit (8).

**Forme d'onde de la tension d'entrée (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) ??**

- (étape 5) La troisième question concernant la forme d'onde du courant de la source de sortie (source de courant) est posée (Fig. A.I.4). Vous pouvez choisir une forme d'onde parmi les mêmes huit formes données par la librairie des formes d'onde (Fig. A.I.1). Tapez un chiffre entre un (1) et huit (8).

**Forme d'onde du courant de la sortie (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) ??**

- (étape 6) Puis le logiciel demande la forme d'onde de la tension de la source de sortie (source de courant) (Fig. A.I.5). Tapez un chiffre entre un (1) et huit (8).

**Forme d'onde de la tension de la sortie (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) ??**

- (étape 7) Le programme affiche automatiquement après cette dernière question la structure synthétisée ainsi que les caractéristiques statiques des interrupteurs proposés (en pointillé sur les axes prévus à cet effet).

Si plusieurs solutions sont possibles, le programme demande à l'utilisateur s'il veut voir la deuxième structure (Fig. A.I.6):

**Voulez-vous voir la 2ème structure ?? (O/N)**

- (étape 8) Si la réponse est O, le programme affiche la deuxième structure puis passe à l'étape 10. Sinon, c.à.d. N qui a été tapé, il passe directement à l'étape 10.
- (étape 9) Si la solution est unique, le programme passe directement à l'étape 10.

- (étape 10) À cet étape, le programme demande à l'utilisateur s'il veut continuer ou arrêter la conception (Fig. A.I.7):

**Voulez-vous faire une autre synthèse ?? (O/N)**

- (étape 11) Si la réponse est **O**, le programme recommence à nouveau à poser les questions précédentes. Par contre, si la réponse est **N**, la synthèse est terminée et le programme demande à l'utilisateur de taper **ESC** pour quitter totalement le logiciel. La fin du programme est atteinte (Fig. A.I.8).

Deux exemples de synthèse sont donnés: le premier ayant plusieurs solutions et correspond à  $v_e = 1$ ,  $i_s = 1$  et  $v_s = 3$  (Fig. A.I.9 et Fig. A.I.10); le deuxième correspond à  $v_e = 1$ ,  $i_s = 1$  et  $v_s = 5$  et est à solution unique (Fig. A.I.11).

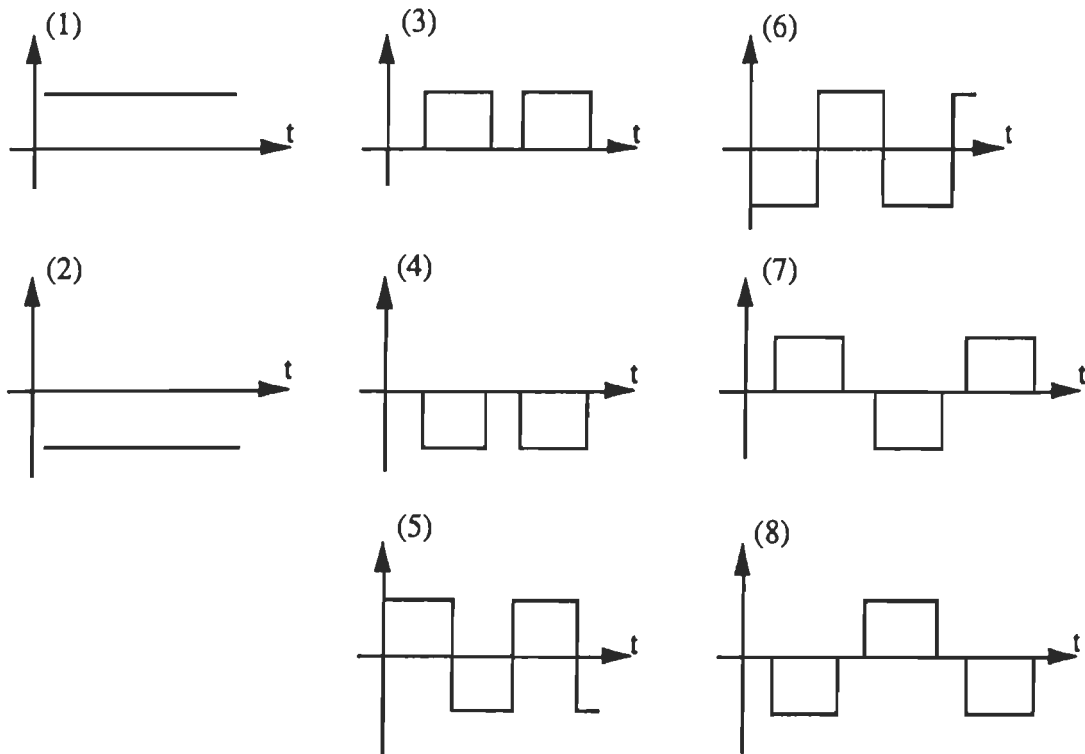


Fig. A.I.1

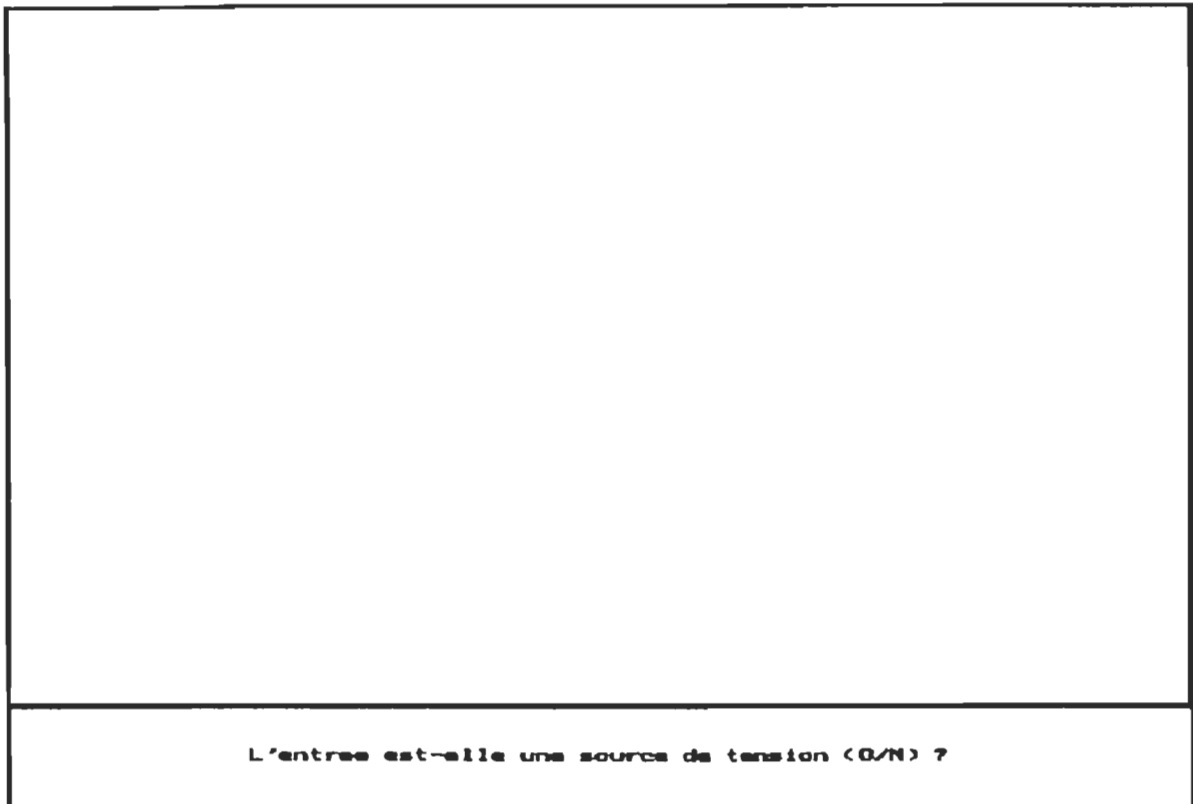


Fig. A.I.2

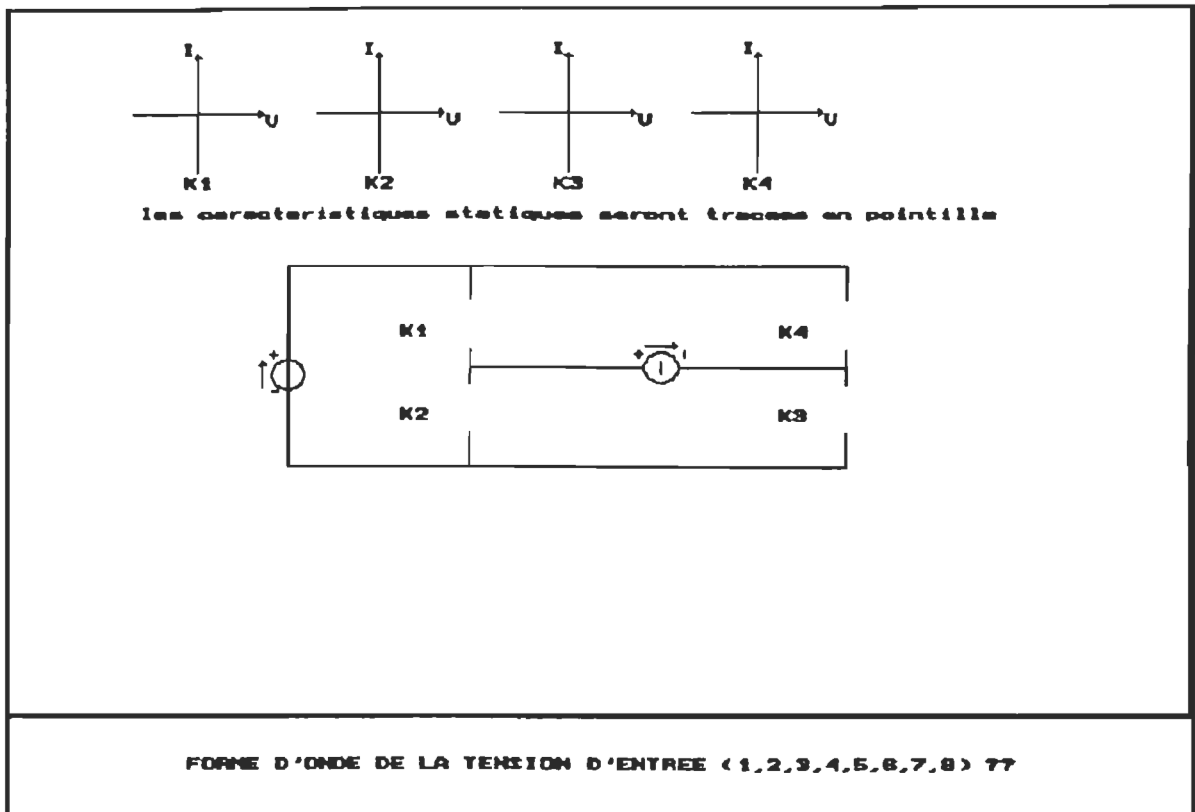


Fig. A.I.3

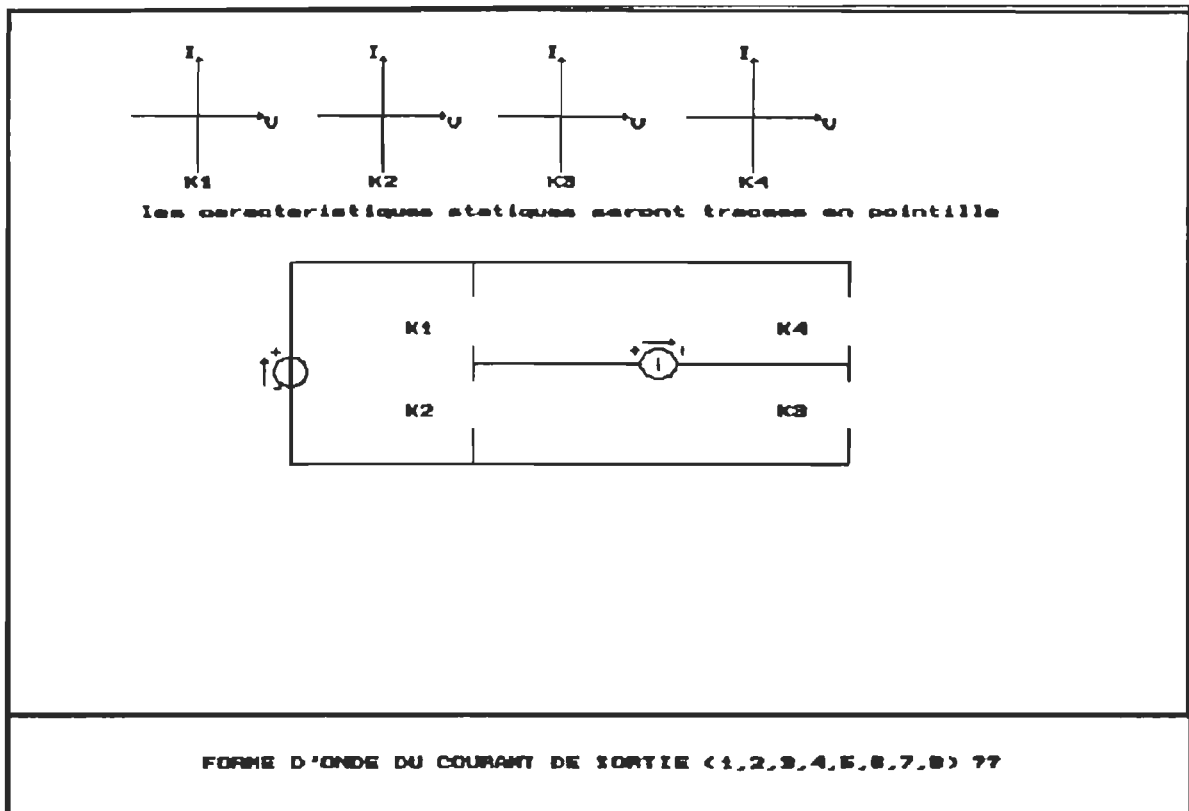


Fig. A.I.4

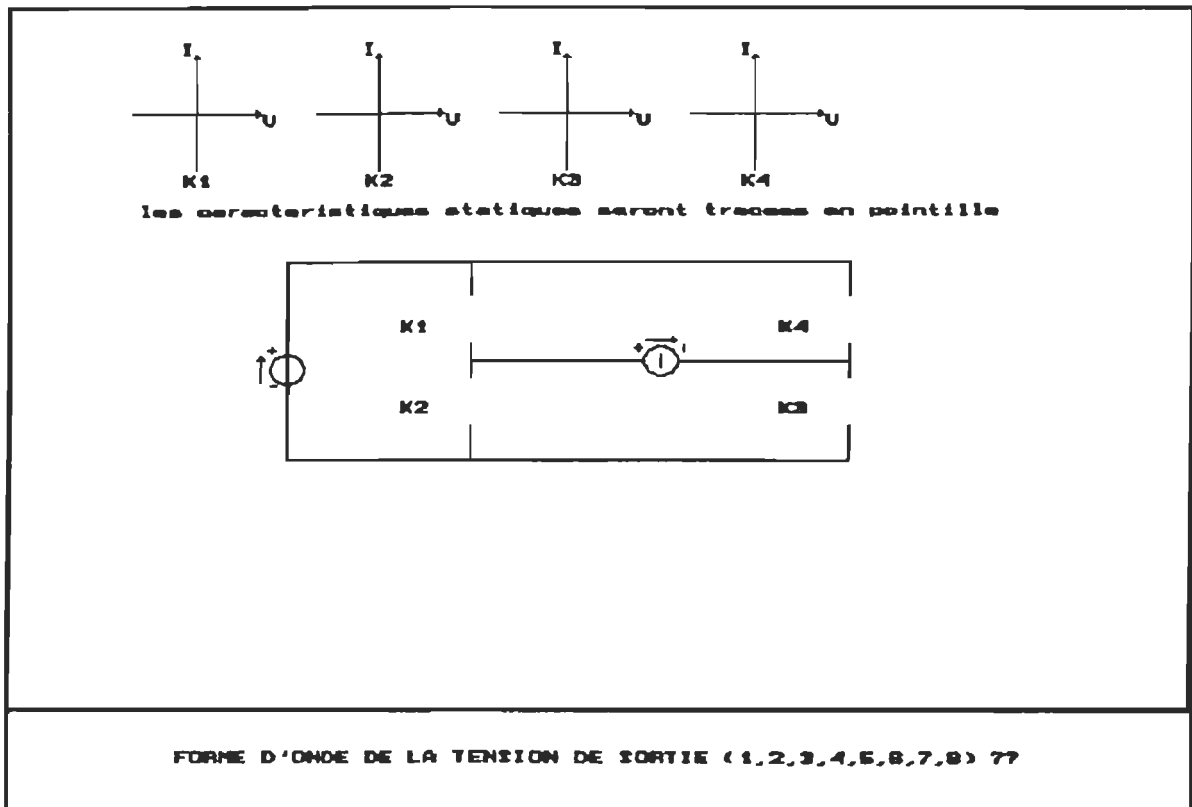


Fig. A.I.5

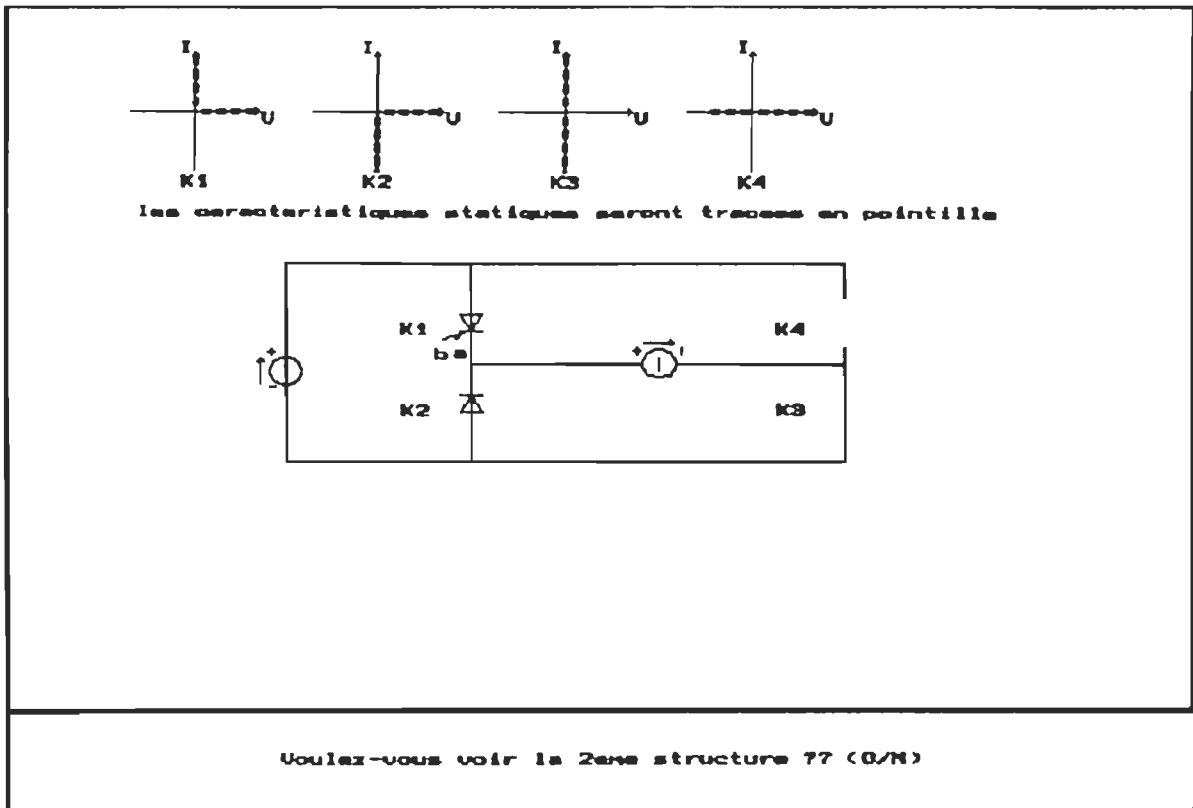
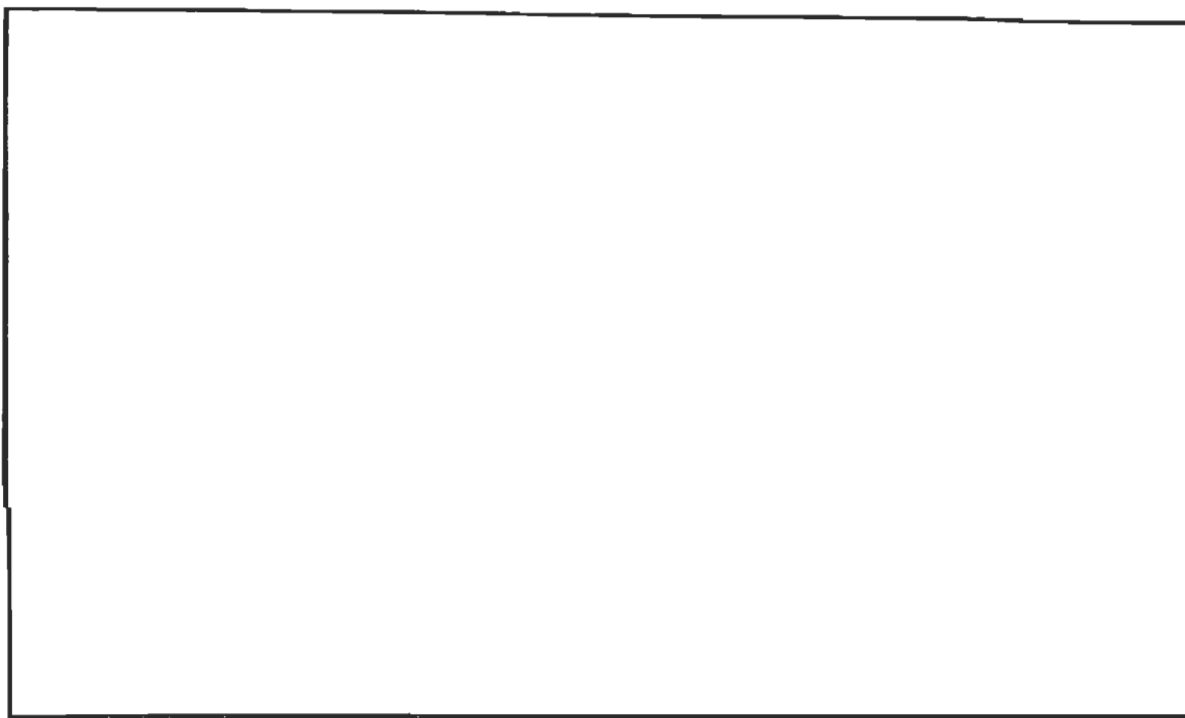


Fig. A.I.6





Voulez-vous faire une autre synthèse ? <O/N>

Fig. A.I.7

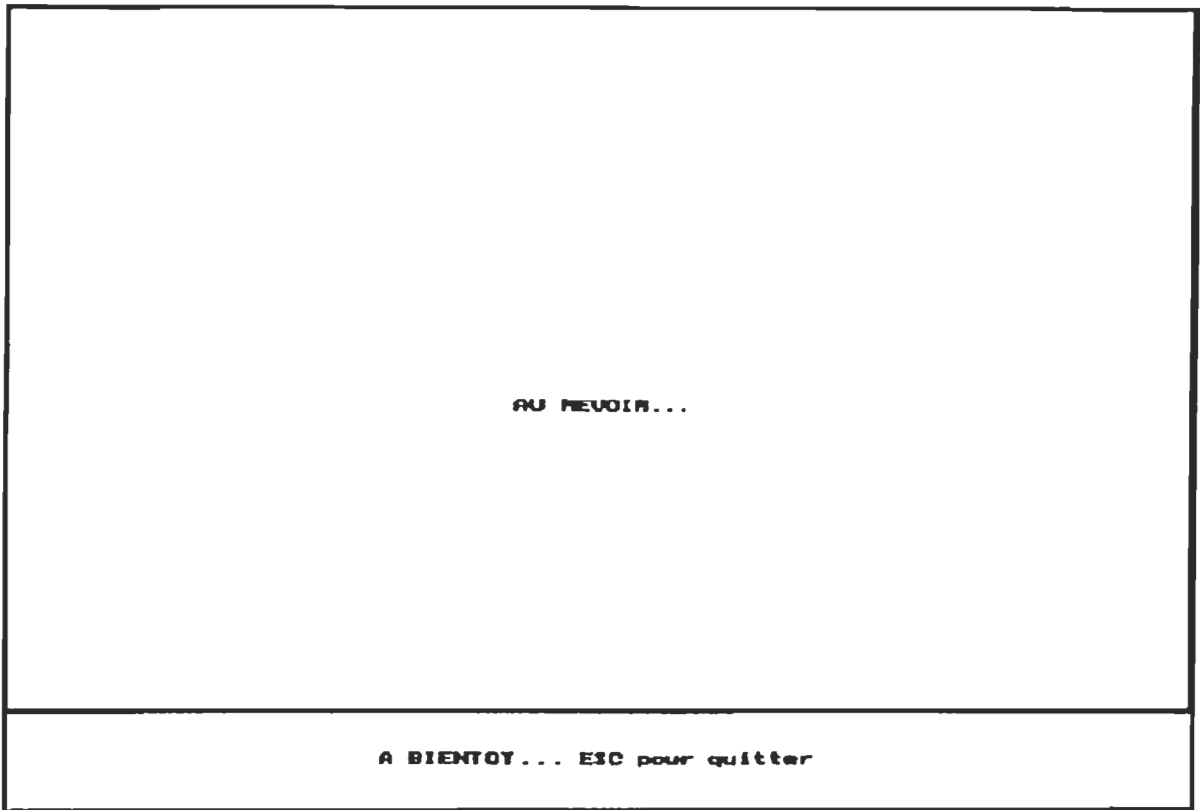


Fig. A.I.8

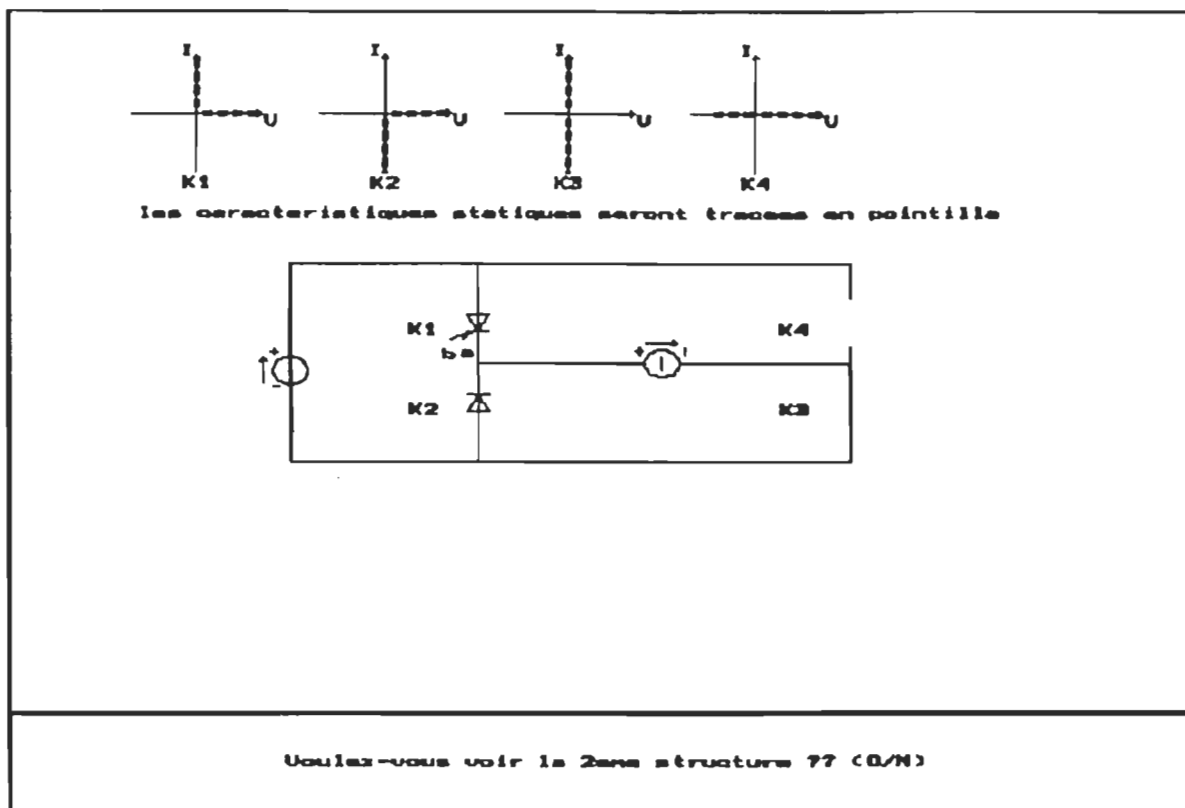


Fig. A.I.9

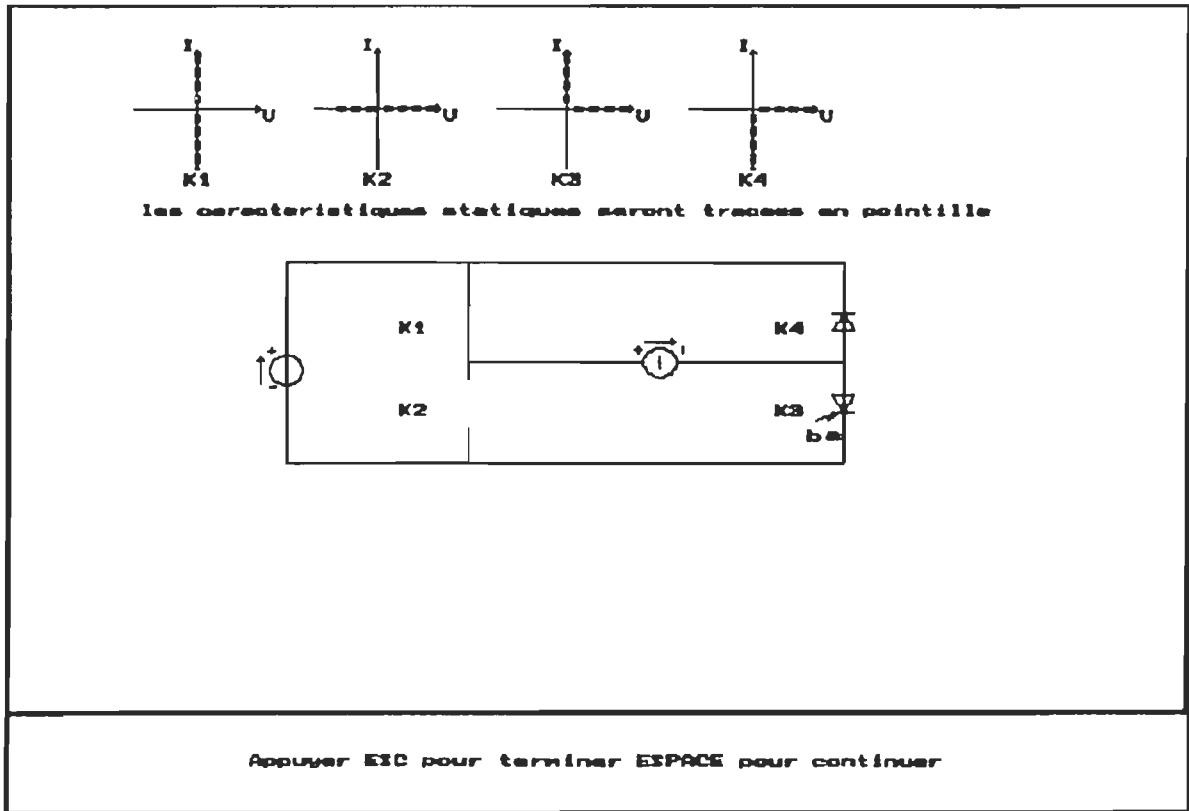


Fig. A.I.10

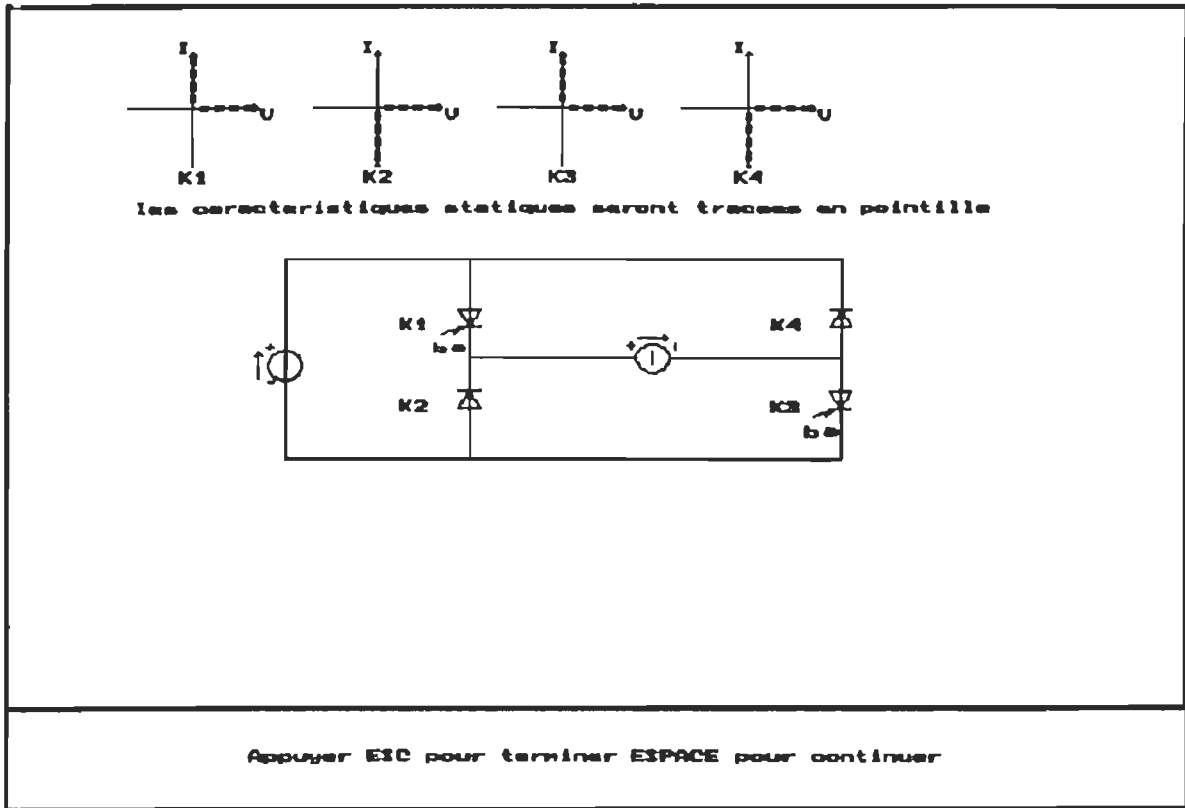


Fig. A.I.11

## ANNEXE II

CONCEPTION ASSISTÉ PAR ORDINATEURS DES CONVERTISSEURS  
STATIQUES DIRECTS

ARTICLE A PARAÎTRE DANS  
LA REVUE CANADIENNE EN GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

# Conception assistée par ordinateur des convertisseurs statiques directs

M.Saad, T. Rafesthain et V. Rajagopalan,  
Université du Québec à Trois-Rivières,  
Groupe de recherche en électronique industrielle  
C.P. 500 Trois-Rivières, Québec G9A 5H7

K. Al-Haddad  
Ecole de Technologie Supérieure (ETS)  
Montréal, Québec, Canada

La notion de cellule de commutation a été introduite et utilisée pour étudier les aspects local et système du processus de commutation tels que les modes de fonctionnements d'un interrupteur et le mécanisme de commutation. Le but de cet article est de montrer que cette notion peut aussi être un outil d'étude et de synthèse, au sein d'un programme de conception, des topologies de convertisseurs statiques. Dans cet optique, les lois et les règles générales d'électronique de commutation sont définies. Leur application au sein de la cellule élémentaire de commutation permet une analyse graphique des formes d'onde des sources d'entrée et de sortie.

## Introduction

La recherche de structures de convertisseurs statiques adaptées aux problèmes spécifiques à résoudre a suscité de nombreuses études tant dans les domaines de pointe que dans les domaines industriels<sup>1-3</sup>. C'est pourquoi la structure des convertisseurs devient de plus en plus le fruit d'un raisonnement construit.

Les approches actuelles de synthèse des convertisseurs sont généralement basées sur la nature de la conversion d'énergie, continu-continu<sup>3-4</sup>, continu-alternatif<sup>2</sup>, etc. D'autres, sont fondées sur l'analyse de toutes les séquences possibles de fonctionnement d'un convertisseur<sup>1</sup> en se basant sur les réversibilités en tension et/ou en courant des sources d'entrée et de sortie. Mais cela nécessite la connaissance de ces séquences et de leur enchaînement.

L'objet de cet article est d'exposer une nouvelle méthode de synthèse des topologies de convertisseurs statiques directs (sans éléments de stockage inductif ou capacitif). La structure adoptée est la structure en pont à quatre interrupteurs<sup>1</sup> (figure 1).

En première approche, à cause de leur très grande diversité, il paraît nécessaire d'effectuer une analyse des phénomènes de commutation dans les différents circuits d'électronique de puissance. Cependant, une approche beaucoup plus synthétique peut être réalisée en utilisant la notion de la cellule de commutation. Au sein de cette cellule, en fonction de la nature des commutations existantes, commandées à l'amorçage ou au blocage, nous allons analyser qualitativement les tensions et les courants des sources pour déterminer les réversibilités des interrupteurs, leurs commutations et leurs commandes.

### **La cellule de commutation**

Un convertisseur d'énergie électrique doit:

1. transférer l'énergie d'une source à une autre
2. avec un minimum de pertes
3. de manière contrôlée.

En ce qui concerne les sources, on devra distinguer: les sources de tension qui imposent leur tension au circuit extérieur et les sources de courant qui imposent leur courant au circuit extérieur.

Le fonctionnement d'un convertisseur statique se décompose en une succession de séquences élémentaires. À chaque séquence correspond un réseau électrique maillé différent du précédent, obtenu par la modification de l'interconnexion des différentes branches actives.

Ce processus de modifications successives du réseau fait appel à un dispositif statique réalisé par un groupement en étoile d'interrupteurs électriques (figure 2). Les branches du circuit reliées à ce dispositif statique sont soumises aux règles d'interconnexions des sources. Il en résulte que<sup>6</sup>:



- chaque interrupteur est connecté à une branche tension sinon l'ouverture d'un interrupteur provoquerait l'ouverture d'une source de courant,
- le nœud de l'étoile est connecté à une branche courant car une source de tension ne peut être connectée qu'à une source de courant par l'intermédiaire d'un interrupteur contrôlé,
- à chaque instant, un et un seul interrupteur est passant afin de ne pas connecter deux sources de tension entre elles et de ne pas ouvrir la source de courant.

Le dispositif qui permet de passer d'une séquence à une autre est en fait le sous circuit qui est la base de tous les convertisseurs fonctionnant en régime de commutation (figure 3), le nombre d'interrupteurs du dispositif statique n'intervient pas.

La source de tension symbolise la différence de tension  $V_1-V_2$  imposée entre les points A1 et A2 par les branches tension qui leurs sont associés. La source de courant I est représentative du courant maillon qui parcourt la branche connectée au point C. Elle est reliée en étoile avec les interrupteurs K1 et K2 concernés par la commutation.

La figure 4 met en évidence la présence de la cellule de commutation dans divers convertisseurs.

La commutation est fondamentalement liée au fonctionnement de deux interrupteurs de la cellule de commutation. Elle présente deux aspects: un aspect local et un aspect système.

### **Aspect local de la commutation**

L'aspect local est relatif aux modes de fonctionnement d'un interrupteur et à la manière dont son basculement peut ou doit s'effectuer. Un interrupteur est défini par sa caractéristique statique à deux, trois ou quatre segments et par ses aptitudes éventuelles à être commandé à la fermeture et/ou à l'ouverture. La figure 5 représente les caractéristiques statiques idéalisées et les caractéristiques dynamiques de certains interrupteurs et montre les relations de dualité entre eux (diode et transistor sont duaux d'eux mêmes).

Remarquons que dans une commutation commandée, à l'ouverture ou à la fermeture, l'interrupteur agit et le circuit extérieur réagit et, qu'inversement, dans une commutation

naturelle c'est le circuit extérieur qui agit et l'interrupteur qui réagit. Cette remarque entraîne les règles suivantes:

(R1) • une commutation spontanée n'est possible que si les points de fonctionnement imposés par la séquence précédant la commutation et la séquence suivante se trouvent sur deux demi-axes de signes contraires.

(R2) • une commutation commandée n'est possible que si les points de fonctionnement imposés par la séquence précédant la commutation et la séquence suivante se trouvent sur deux demi-axes de mêmes signes.

### Aspect système de la commutation

L'aspect local de la commutation se limite à l'étude des caractéristiques propres d'un interrupteur au blocage et à l'amorçage. L'aspect système concerne la manière dont doivent effectivement fonctionner les deux interrupteurs associés dans une même cellule élémentaire pour que la commutation s'effectue correctement, compte tenu des contraintes électriques imposées par le circuit du convertisseur.

On peut écrire en permanence pour la cellule de commutation de la figure 6

$$v_{k1} + v_{k2} = V_1 - V_2 = V \quad (1)$$

$$i_{k1} - i_{k2} = I \quad (2)$$

$V$  et  $I$  sont des grandeurs invariables à l'échelle de la durée de la commutation.

Avant et après la commutation, les états des interrupteurs sont complémentaires, on a:

- avant (figure 6a): K1 passant, K2 bloqué

$$v_{k1} = 0; i_{k1} = I$$

$$v_{k2} = V; i_{k2} = 0$$

- après (figure 6b): K1 bloqué, K2 passant

$$v_{k1} = V; i_{k1} = 0$$

$$v_{k2} = 0; i_{k2} = -I$$

Cela défini sur les caractéristiques, les points de fonctionnement correspondants, représentés sur la figure 7, en supposant  $V > 0$ ,  $I > 0$ .

Pendant la commutation, le point de fonctionnement de chaque interrupteur doit se déplacer sur sa propre caractéristique dynamique, d'une manière simultanée, de façon que les relations (1) et (2) soient continuellement vérifiées. En effet, la figure 7 montre que les caractéristiques statiques se situent dans deux quadrants adjacents et cela quels que soient les signes respectifs de  $V$  et de  $I$ , d'où:

- l'interrupteur K1 doit obéir à un mode de commutation de type commandé (règle R2)
- l'interrupteur K2 doit obéir à un mode de commutation de type spontané (règle R1).

D'où la loi fondamentale de la commutation:

Dans une cellule élémentaire de commutation d'un convertisseur statique, la commutation est provoquée par le changement d'état commandé de l'un des interrupteurs (amorçage ou blocage selon le cas), entraînant le changement d'état spontané de l'autre.

### **Modes de commutation**

L'originalité de ce travail réside dans la nouvelle méthode d'analyse des formes d'onde . Dans ce but, une librairie de formes d'onde (figure 8) que peuvent avoir les deux sources est proposée à l'utilisateur qui choisit directement et visuellement la tension de la source d'entrée (ou le courant d'entrée), le courant et la tension de la source de sortie pour la recherche de la structure d'un convertisseur direct tension-courant (ou courant-tension). Les formes d'onde déterminent en effet, d'une part, le signe du courant  $I$  et, d'autre part, le potentiel du nœud de commutation  $C$  considéré (figure 9):

- lorsque la commutation entraîne un accroissement du potentiel du point  $C$ , on parle d'une commutation positive;
- dans le cas contraire, on parle d'une commutation négative.

Il en découle les règles suivantes:

(R3) • si la commutation et le courant  $I$  sont de mêmes signes, il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué;

(R4) • si la commutation et le courant  $I$  sont de signes contraires, il y a commutation par commande au blocage de l'interrupteur passant.

### **Application au cas où le sens du courant change de signe entre deux commutations**

Dans ce cas, la tension  $V$  est unidirectionnelle et la source de courant est bidirectionnelle. Elle change de signe deux fois par période.

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

Supposons que la première commutation soit positive, si le courant est positif (figure 8a), il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué  $K1$  (règle R3). Si par contre le courant est négatif (figure.8b), il y a commutation par commande au blocage de l'interrupteur passant  $K2$  (règle R4).

On peut citer, comme exemples d'applications, les onduleurs de tension et l'onduleur série.

### **Les diverses cellules de commutation**

Hormis certains cas particuliers dans lesquels une commutation commandée est remplacée par une commutation spontanée, les interrupteurs d'une même cellule de commutation ont des caractéristiques statiques ayant le même nombre de segments en tension et en courant et fonctionnent de manière complémentaire. On en déduit immédiatement que si l'un des interrupteurs possède et exploite la double commande de blocage et d'amorçage (transistor), l'autre à ses deux commutations spontanées (diode). Dans tous les autres cas les deux interrupteurs doivent posséder les mêmes mécanismes de commutation: ils sont commandés uniquement à l'amorçage (ou au blocage), l'autre commutation étant spontanée. On distingue cinq cellules de commutation:

- la cellule de type hacheur de la figure 10a,
- les cellules de type onduleur de tension (figure 9) dans lesquelles la source de tension est unidirectionnelle et la source de courant à la sortie est bidirectionnelle,
- les cellules de type commutateur de courant (figure 11) dans lesquelles la source de courant à la sortie est unidirectionnelle et la source de tension change de signe à chaque commutation.

On peut également indiquer la cellule constituer par la juxtaposition de deux cellules de type hacheur (onduleur à MLI) représentée à la figure 9b.

Dans les figures 9, 10 et 11 un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage est représenté par un "thyristor double gâchette" à priori bidirectionnel en tension et unidirectionnel en courant. Si l'une de ces commutations est rendue spontanée, l'électrode correspondante est éliminée et on obtient le symbole du thyristor avec une seule gâchette.

### **Synthèse des convertisseurs statiques directs**

Les règles déjà établies (R1, R2, R3, R4) permettent, pour une commutation donnée, connaissant le signe de la tension  $v$  et le sens du courant  $i$  de déterminer lequel des deux interrupteurs doit être commandé et comment il doit être commandé (à l'amorçage ou au blocage). Ces règles, ajoutées à d'autres règles qui déterminent les caractéristiques statiques des interrupteurs, leurs états (fermé ou ouvert avant et après chaque commutation), les signes de la commutation et du courant correspondant dans la source de sortie, sont regroupées dans trois modules écrits en TURBO C au sein du programme CAGECT ("Computer Aided GEneration of Converter Topologies") servant à la conception automatique de convertisseurs statiques directs en mode interactif. Réaliser un logiciel permettant grâce à un questionnaire interactif de synthétiser un convertisseur statique direct, et cela dans un très grand nombre de cas, est la preuve que la méthode utilisée ne fait pas appel à l'intuition, mais simplement à la logique. Il ne s'agit pas d'une reconnaissance de cas mémorisés au préalable (bibliothèque) mais bien d'un cheminement logique conduisant à la détermination de la structure comme un

système expert. La seule bibliothèque existante contient seulement les différents interrupteurs: diode, transistor, thyristor, etc.

En considérant les huit formes d'onde proposées (figure 8), nous dénombrons 356 cas synthétisables par notre logiciel (figure 12). Ce dernier donne toutes les solutions pour un cahier des charges donné à partir de l'organigramme présenté à la figure 13. La figure 14 présente la structure générale des convertisseurs directs tension-courant générée par le logiciel CAGECT. Les figures 15 et 16 présentent les résultats des études de synthèse. La première (figure 15) correspond aux structures de redresseurs pour  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "3"$  où le symbole "5" signifie la forme d'onde est de type "5" (figure 8). La deuxième (figure 16) donne les structures des convertisseurs de fréquence pour  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "5"$  et  $v_s = "3"$ .

### Conclusion

Après avoir exposé la notion de cellule de commutation et son utilisation (devenue maintenant courante) pour l'étude des aspects local et système du processus de commutation, nous avons montré comment nous pouvions utiliser cette notion au travers d'une nouvelle méthode de synthèse.

L'originalité de ce travail consiste à analyser les formes d'onde des sources d'entrée et de sortie du convertisseur dont on cherche la topologie. Les règles permettant de déterminer la structure des convertisseurs directs sont énoncées et écrites en TURBO C au sein du programme "CAGECT". Il est relativement aisé d'étendre ce travail aux topologies des convertisseurs indirects en ajoutant les règles adéquates. Ce travail peut aussi être intégré dans un environnement plus général de système expert pour la génération de nouvelles structures de convertisseurs avec ou sans éléments de stockage. L'aspect pédagogique n'est pas à négliger non plus, puisqu'à partir d'un tel logiciel il est facile d'initier des étudiants à l'électronique de puissance et plus particulièrement à la synthèse des topologies des convertisseurs.

## Remerciements

Ce projet a été subventionné par les fonds du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Science du Québec (bourse de la francophonie), du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada et par la bourse de stage post-doctoral de la région Rhône-Alpes en France.

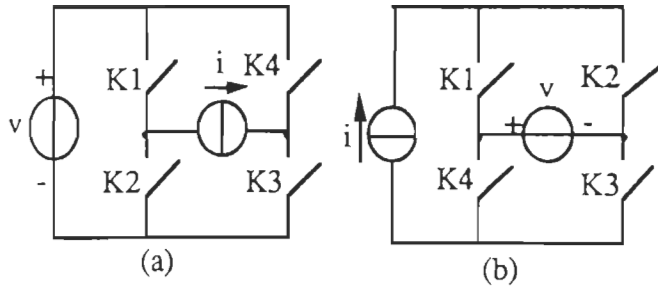
## RÉFÉRENCES

- [1] Y. Mopty, Méthode de synthèse automatique des convertisseurs statiques. Application à la recherche de nouveaux convertisseurs, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP Toulouse, 1982.
- [2] A. Courteix, Y. Cheron, H. Foch et M. Metz, "Application à un convertisseur continu-alternatif complexe d'une méthode systématique de synthèse," *Revue Physique Appliquée*, No.6, juin 1986, pp. 357-364.
- [3] A.K.S. Bhat and F.D. Tan, "A Unified Approach to Characterization of PWM and Quasi-PWM Switching Converters: Topological Constraints, Classification and Synthesis," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1989, pp. 760-767.
- [4] D. Maksimovic and S. Cuk, "General Properties and Synthesis of PWM DC-to-DC Converters," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1989, pp. 515-524.
- [5] H. Foch et al., "Electronique de puissance", Extrait de la collection "Les Techniques de l'Ingénieur", pp. D 3 150-1 - D 3 158-7, 1989.
- [6] T.A. Meynard, K. Al-Haddad et V. Rajagopalan, "Hacheurs à commutation douce: étude par la méthode de la cellule de commutation équivalente," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 15 No. 4, 1990, pp. 158-166.

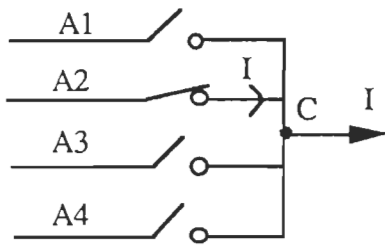
## Liste des figures

- Figure 1: Structures des convertisseurs statiques directs
- Figure 2: Dispositif de commutation
- Figure 3: Cellule de commutation
- Figure 4: Mise en évidence de la cellule de commutation
- Figure 5: Relation de dualité entre les interrupteurs
- Figure 6: Cellule de commutation avant et après la commutation
- Figure 7: Caractéristiques statique et dynamique de deux interrupteurs
- Figure 8: Librairie de formes d'onde
- Figure 9: Cellules de commutation avec source de courant bidirectionnelle en courant.
- Figure 10: Cellules hacheurs
- Figure 11: Cellules de commutation avec source de tension bidirectionnelle en tension.
- Figure 12: Possibilités des structures des convertisseurs statiques
- Figure 13: Organigramme du logiciel "CAGECT"
- Figure 14: Structure des convertisseurs statiques directs tension-courant
- Figure 15: Structures de redresseurs  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "3"$
- Figure 16: Structures de convertisseurs de fréquence  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "5"$  et  $v_s = "3"$

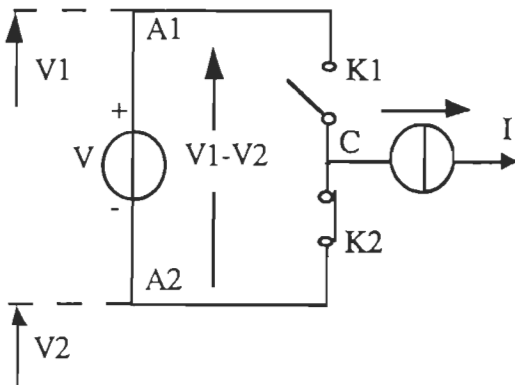




**Figure 1:** Structures des convertisseurs statiques directs  
 a) tension-courant      b) courant-tension



**Figure 2:** Dispositif de commutation



**Figure 3:** Cellule de commutation

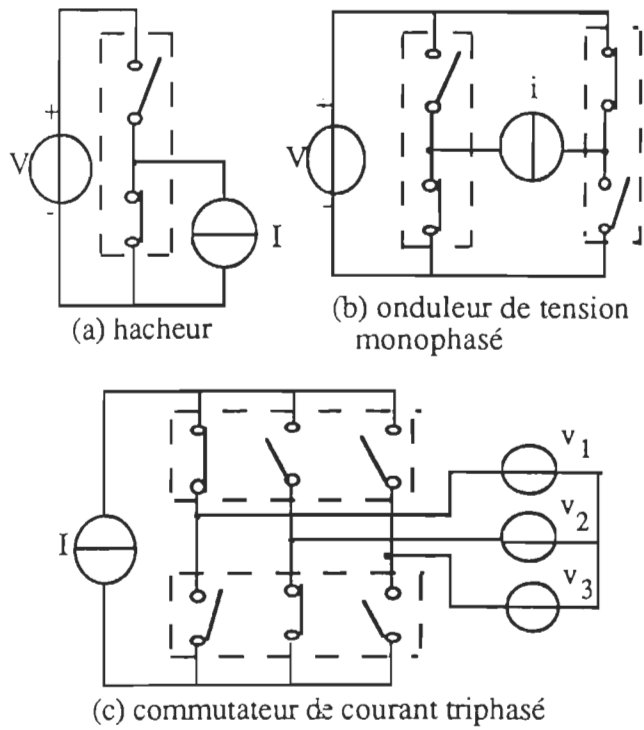


Figure 4: Mise en évidence de la cellule de commutation

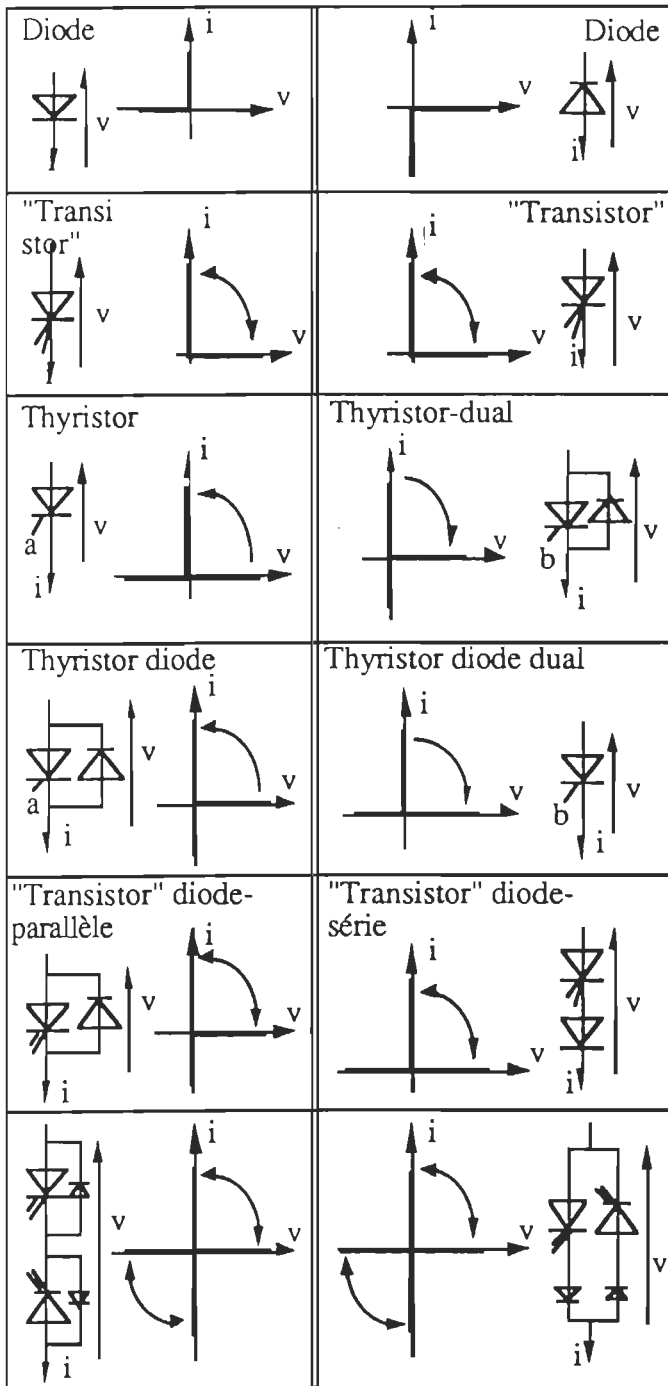


Figure 5: Relation de dualité entre les interrupteurs

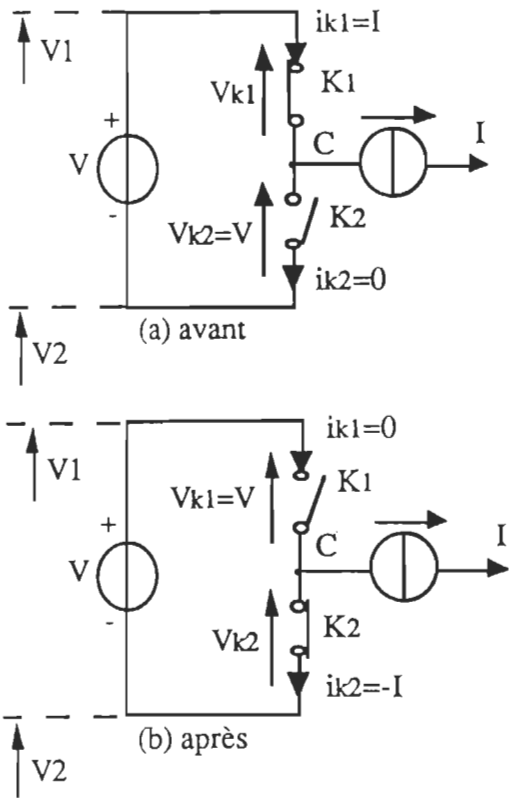


Figure 6: Cellule de commutation avant et après la commutation

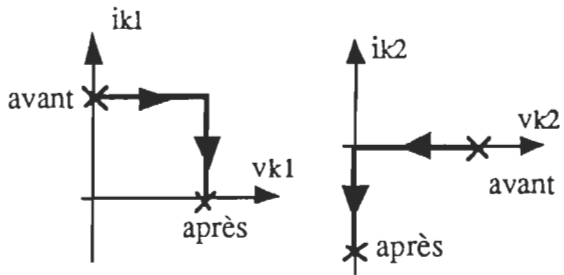


Figure 7: Caractéristiques statique et dynamique de deux interrupteurs

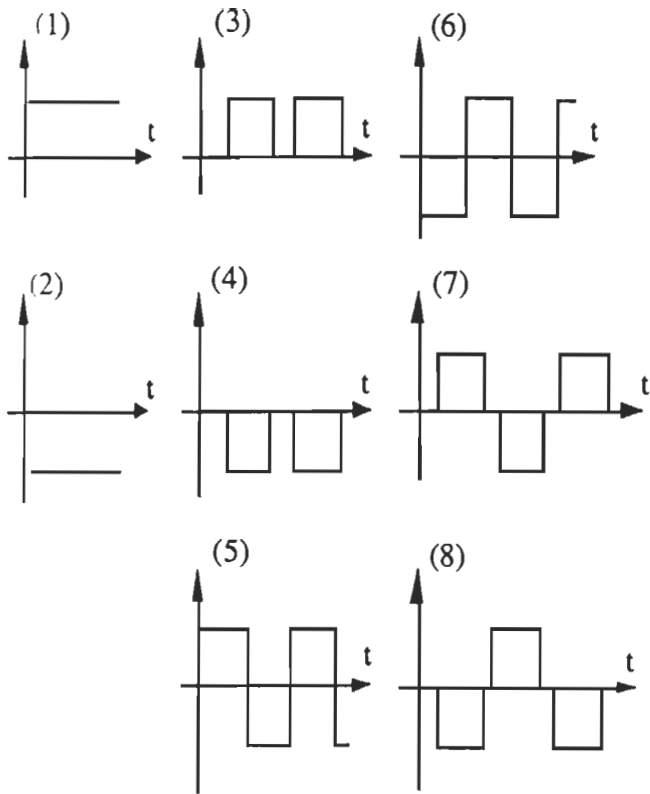


Figure 8: Librairie de formes d'onde

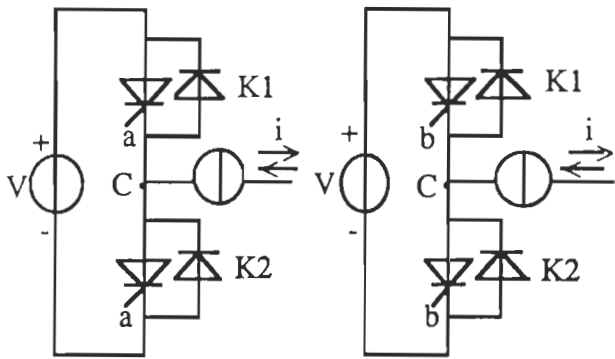
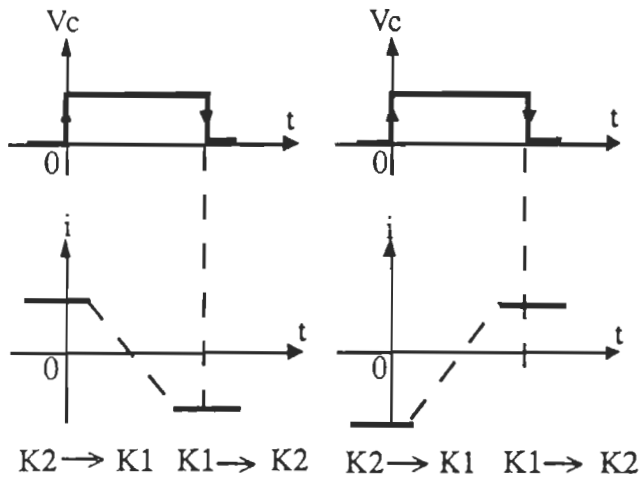


Figure 9: Cellules de commutation avec source de courant bidirectionnelle en courant.

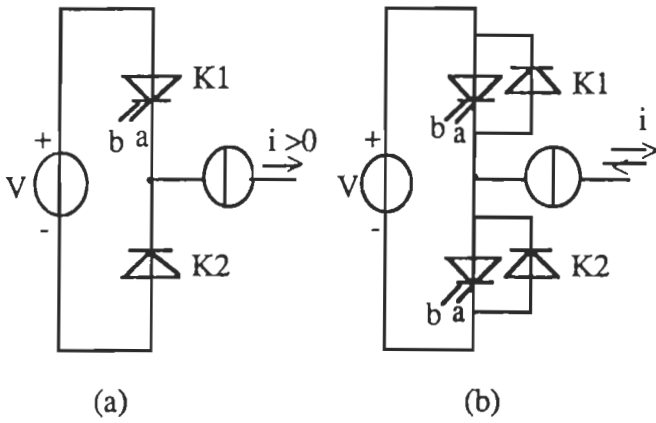


Figure 10: Cellules hacheurs

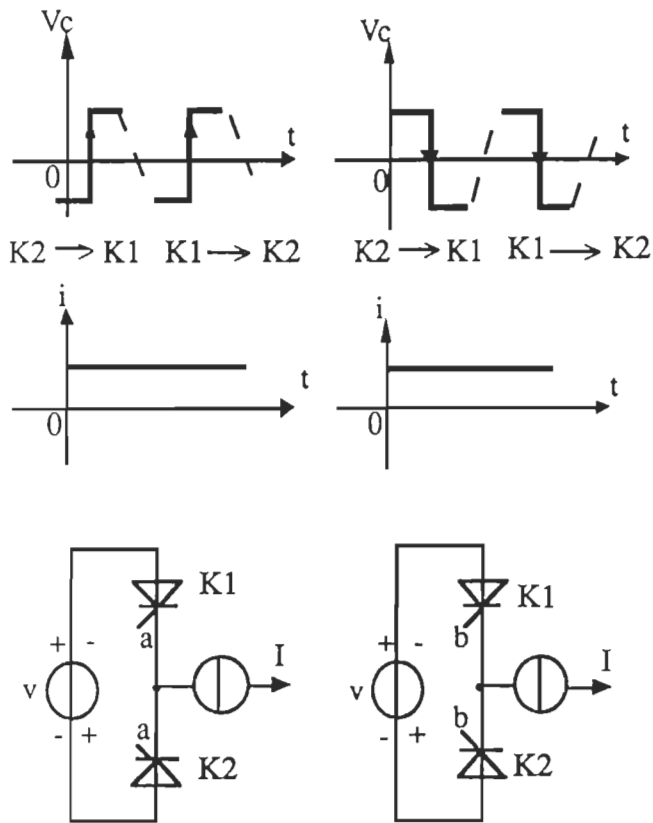


Figure 11: Cellules de commutation avec source de tension bidirectionnelle en tension.

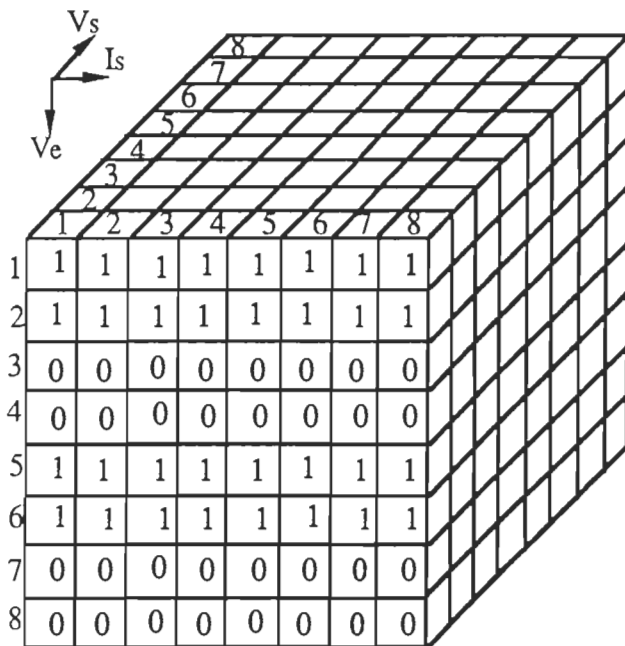


Figure 12: Possibilités des structures des convertisseurs statiques

"1": une structure

"0": pas de solution

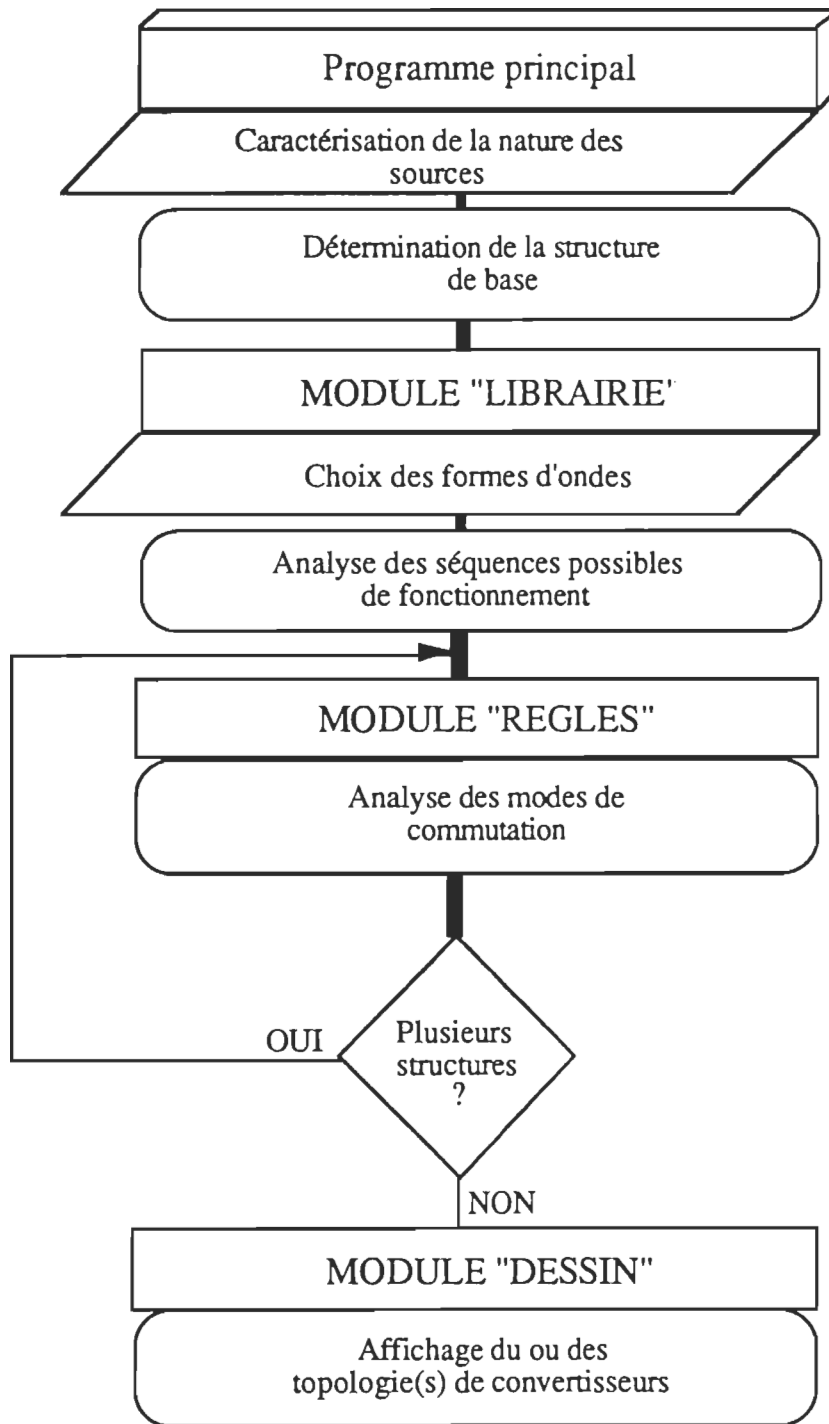


Figure 13: Organigramme du logiciel "CAGECT"



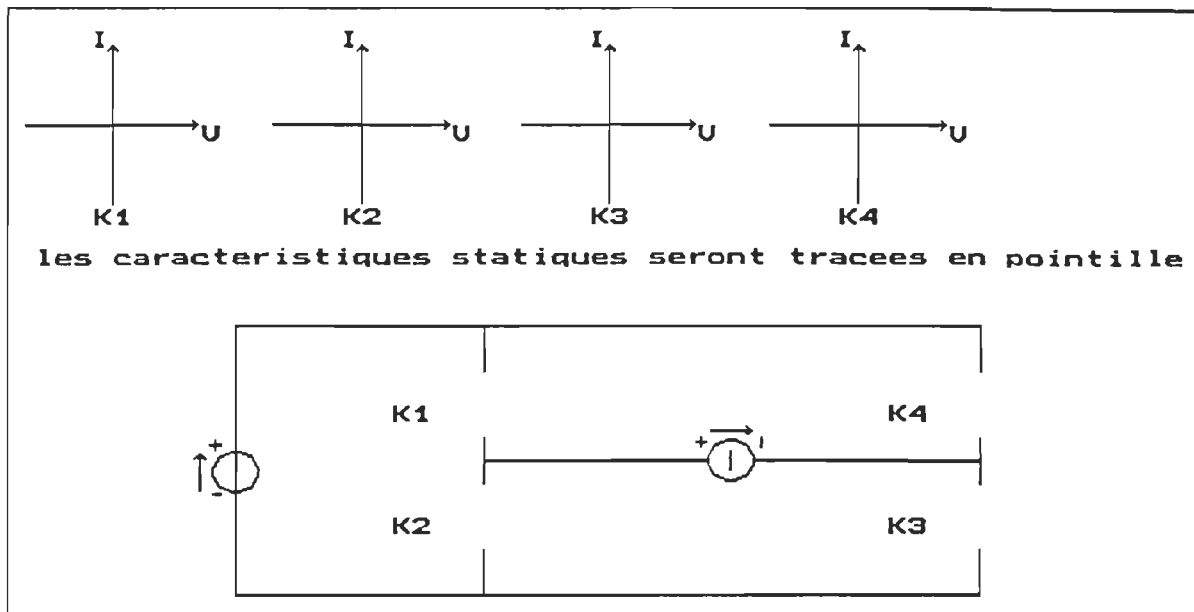


Figure 14: Structure des convertisseurs statiques directs tension-courant

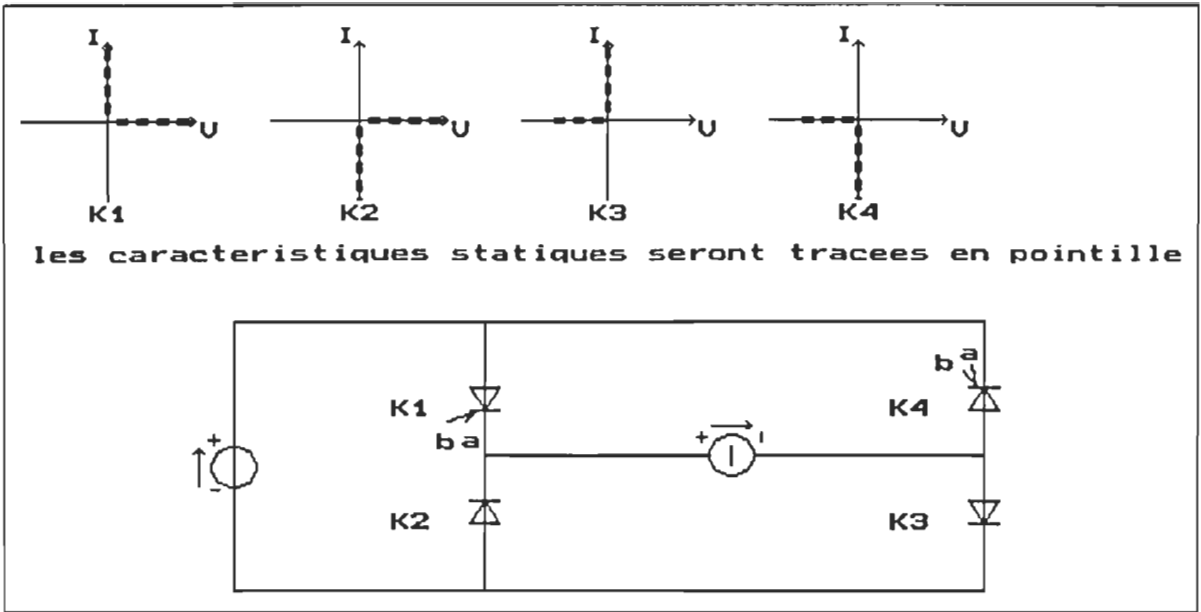


Figure 15 (a)

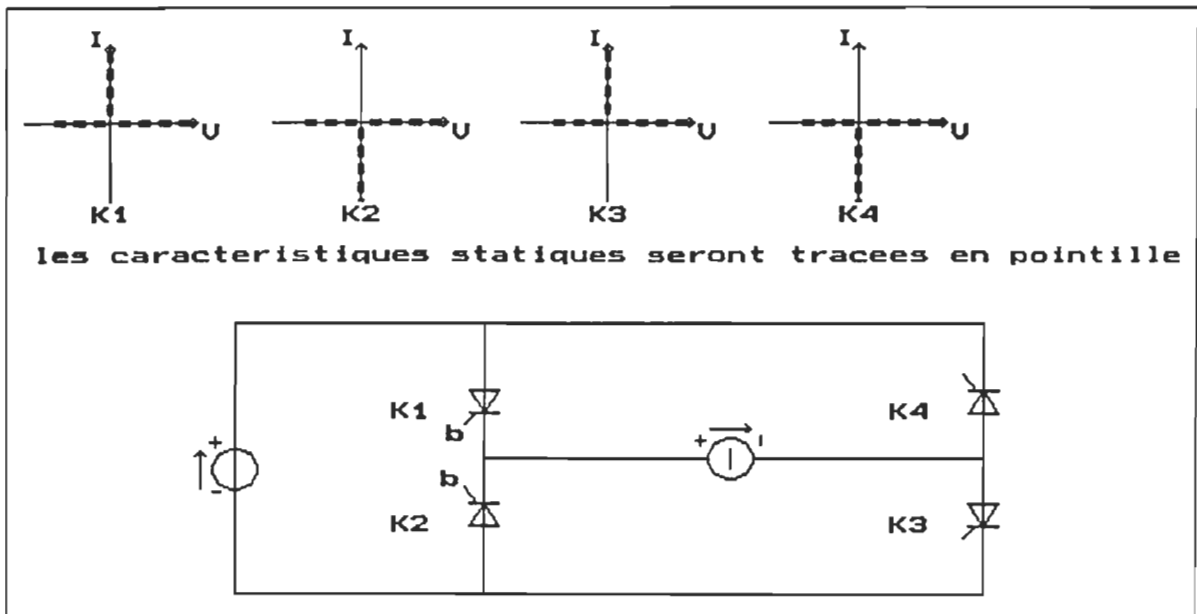


Figure 15 (b)

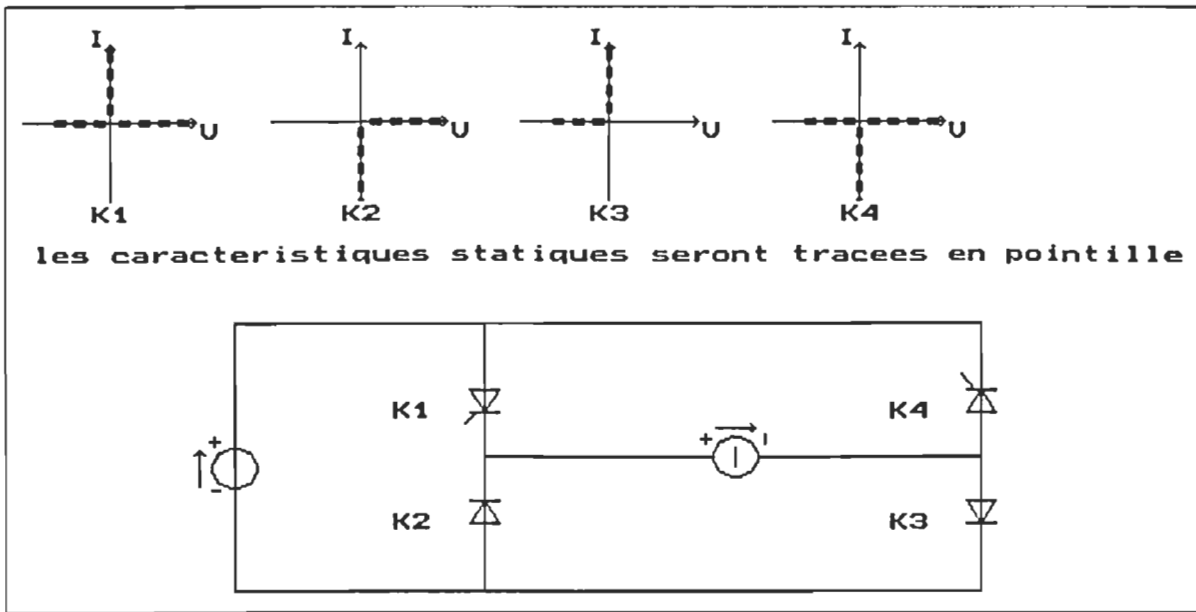


Figure 15 (c)

(c)

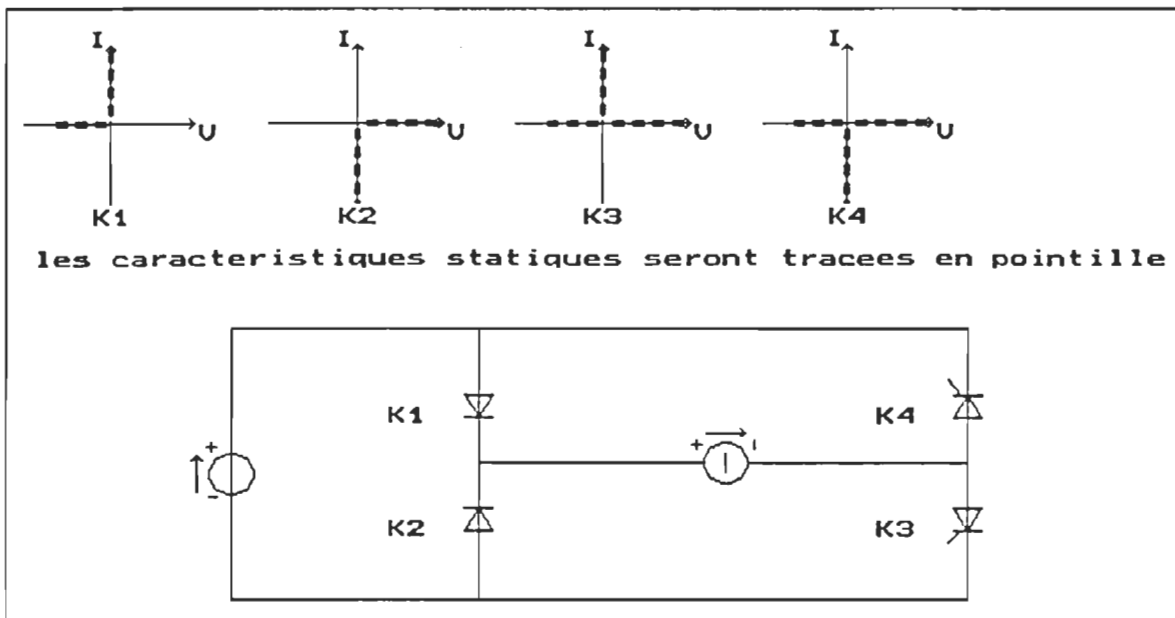


Figure 15 (d)

Figure 15: Structures de redresseurs  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "1"$  et  $v_s = "3"$

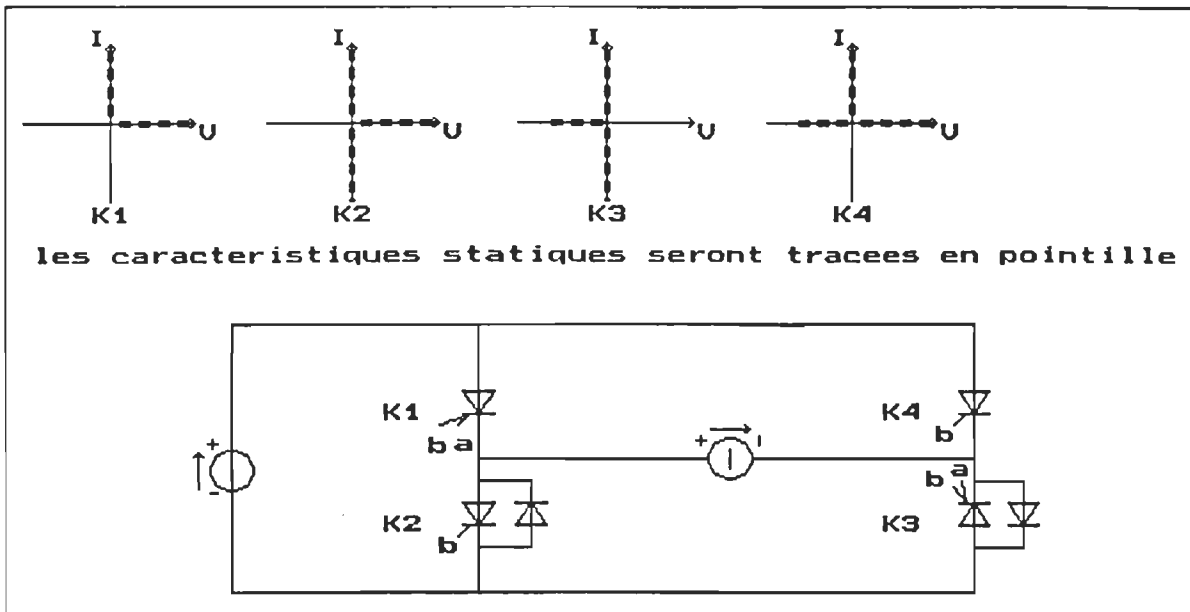


Figure 16 (a)

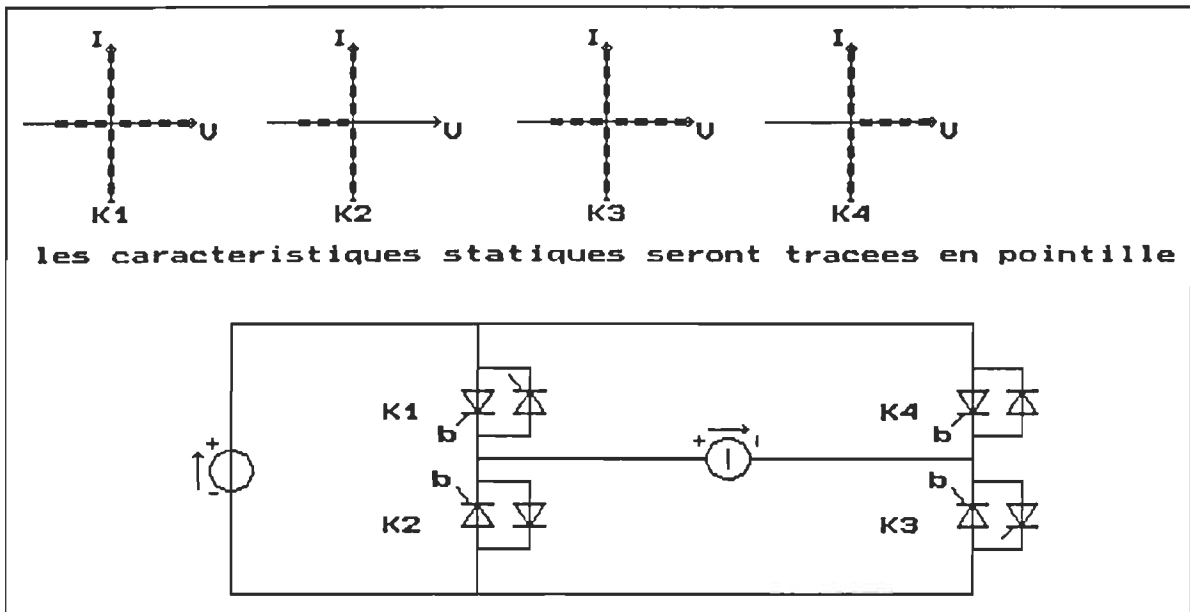


Figure 16 (b)

Figure 16: Structures de convertisseurs de fréquence  $v_e = "5"$ ,  $i_s = "5"$  et  $v_s = "3"$