

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine Electrique

Réf: ǔ ǔ ǔ ǔ

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Etude et simulation d'un onduleur multi niveaux alimenté
par une pile à combustible**

**Présenté par :
CHOUABIA SAAD EDDINE
Soutenu le : 06 Juin 2013**

Devant le jury composé de :

Mr. MOUSSI AMMAR

Professeur

Président

Mr. ABOUBOU A.NACER

Professeur

Encadreur

Mr .DENDOUGA ABDELHAKIM

MCB

Grade

Examineur

Année universitaire : 2012 / 2013

Remerciements

*Je remercie tout d'abord « Allah » le tout puissant, de nous
avoir donné le courage et la patience, Et de nous
amener jusqu'à ici.*

*Je tiens d'abord à remercier sincèrement mon Directeur
de mémoire le Professeur ABOUBOU A.NACER pour
avoir dirigé mes travaux.*

*C'est un agréable plaisir pour moi d'exprimer mes remerciements
à Mme : SAADI AICHA*

Quelle chaleureusité nous faudra ?

*Rien n'exprimera nos gratitudes pour vos conseils et votre
aide ũ ũ ũ ũ merci infiniment*

*Je tiens à remercier également Monsieur : SAADI RAMZI
Pour leur disponibilité et leurs précieux conseils.*

*Nous tenons à remercier également tous nos amis qui nous ont
Représentés que du bien.*

*Je voudrais transmettre aux membres du jury,
nos sincères considérations.*

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie,
le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon
bonheur et ma réussite, à ma mère*

*A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre
durant toutes les années des études, et qui a veillé
tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide
et à me protéger.*

Que dieu les garde et les protège.

A mes adorables sœurs et ma belle-sœur.

A mon frère Fathi.

A mes amies.

A tous ceux qui me sont chères Toufik , nour edine ,

Abdou, TiiKa ,imen et aicha.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

A vous .

SAAD CHOUABIA

SOMMAIRE

Chapitre II : Etude d'un onduleur multi-niveau

II.1	Introduction	18
II.2	Principe de l'onduleur multi-niveaux	19
II.3	Principales topologies d'onduleurs multi-niveaux	19
II.3.1	La Topologie à potentiel distribué (NPC)	20
II.3.2	Topologie à cellules imbriquées	25
II.3.3	Topologie basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés	26
II.4	Autres topologies	28
II.5	Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multi-niveaux	29
II.6	Synthèse des stratégies de commande des convertisseurs multi-niveaux	30
II.6.1	Commande par paliers ou par gradins	31
II.6.2	Commande par modulation de largeur d'impulsions	32
II.7	Les avantages de multi-niveaux	33
II.8	Quelques possibilités d'application	34
II.8.1	Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine	34
II.8.2	Application dans le domaine des réseaux électriques	35
II.8.3	Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques	35
I.9	CONCLUSION	36

Chapitre III : Modélisation et Simulation de l'ensemble : PAC + Convertisseur

III.1	Introduction	37
III.2	Modélisation De système	37
III.2.1	Modèle de pile PEM	37
III.2.1.1	Pertes d'activation	38
III.2.1.2	Pertes ohmiques	39
III.2.1.3	Pertes de concentration	39
III.2.2	hacheur parallèle	39
III.2.3	Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC	40
III.2.3.1	Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC	40
III.2.3.2	Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux	41
III.2.3.3	Les différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux	42
III.2.3.4	Hypothèse	45
III.2.3.5	Commande complémentaire pour l'onduleur à trois niveaux	45
III.2.3.5.1	Fonction de connexion	45
III.2.3.5.2	Modélisation aux valeurs instantanées	45
III.2.3.5.3	Modèle de connaissance	46
III.3	Simulation et résultats de système	48
III.3.1	Simulation du l'ensemble PAC + Hacheur élévateur	48
III.3.2	simulation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC	55

Liste de figures

- Figure I.1 :** Sir William Grove, inventeur historique de la Pile à Combustible ... 3
- Figure I.2 :** La Pile à Combustible de W. Grove ... 3
- Figure I.3 :** Répartition des coûts de réalisation d'une PEMFC ... 6
- Figure I.4 :** Pile Ballard Mark 90 embarqué dans le véhicule Ford FCV (85kW)... 8
- Figure I.5 :** Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004) , autonomie = 20h,
poids=900g ... 9
- Figure.I.6 :** Les différences type de pile à combustible ... 10
- Figure.I.7 :** Principe de fonctionnement d'une Pile à Combustible de type PEMFC... 12
- Figure.I.8 :** Empilement type d'une cellule de pile Membrane Du Pont ... 13
- Figure.I.9 :** Plaque bipolaire en composite organique obtenue par thermo
compression ... 14
- Figure.I.10 :** Plaque bipolaire en tôle métallique ... 16
- Figure.II.1 :** Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c) . 19
- Figure.II.2 :** Différentes topologies des convertisseurs multiniveaux... 20
- Figure.II.3 :** Structure triphasée d'un convertisseur multi-niveau à potentiel distribué... 21
- Figure.II.4 :** Topologie à potentiel distribué : Principe et exemples de mécanisme de
commutation ... 21
- Figure II.5 :** Structure pyramidale de la topologie à potentiel distribué ... 23
- Figure.II.6 :** Autres variantes de la topologie à potentiel distribué ... 25

- Figure.III.14** : La fonction MLI 52
- Figure.III.16** : Tension V et V_{ref} . 53
- Figure.III.15** : le courant i_L et i_L ref en fonction de temps 53
- Figure.III.17** : Tension V_{pac} 54
- Figure.III.18** : Point de fonctionnement de la pile a combustible 54
- Figure.III.19** : Schéma block de la simulation de l'onduleur multiniveaux (NPC) 55
- Figure.III.20** : schéma block de la commande MLI de l'onduleur 56
- Figure.III.21** : schéma équivalent de simulation de la commande MLI 56
- Figure.III.22** : signal deux porteuse décalée 57
- Figure.III.23** : Tension composé de la sortie de l'onduleur 57
- Figure.III.24** : Tension simple de la sortie de l'onduleur 58
- Figure III.25**: le tension simple après le filtrage 58
- Figure.III.26** : Spectre harmonique de tension V_a 59



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière :Electrotechnique
Option :Machine Electrique

Thème :

Etude et simulation d'un onduleur multi niveaux alimenté par une pile à combustible

Proposé par : ABOUBOU ABDENNACER

Dirigé par : ABOUBOU ABDENNACER

RESUME

Ces travaux concernent essentiellement le traitement de l'énergie pour les sources non conventionnelles (piles à combustible, générateurs photovoltaïques, alimentations sans interruption) ainsi que les convertisseurs pour les réseaux embarqués (avionique et ferroviaire). Pour cela il faudra des onduleurs électroniques avancés pour répondre aux exigences de haute puissance requise. Les onduleurs multi niveaux sont particulièrement adaptés pour cette application en raison de leur capacité de travailler en haute puissance et grandes tensions élevées avec faibles harmoniques.

ملخص

العمل الذي يقوم ضمن هذا المحور , تصميم الهدف العام من محولات ثابتة .ينبغي هذه الأعمال تتضمن معايير عديدة متزايدة تفرضها البيئة .هذه المعايير هي من نوعين من التوافق البيئي، الطاقة الكهربائية و الحرارية، والرغبة في تصغير التي تفرض زيادة كثافة الطاقة.

تعلق هذه الدراسة أساسا بمعالجة مصادر الطاقة غير التقليدية (خلايا الوقود والمولدات الكهربائية الضوئية، إمدادات الطاقة غير المنقطعة) والمحولات للأنظمة المدمجة(الالكترونيات الطيران والسكك الحديدية). وهذا يتطلب المحولات الالكترونية المتقدمة لتلبية مطالب متطلبات الطاقة العالية .المحولات متعددة المستويات هي مناسبة خاصة لهذا التطبيق .بسبب قدرتهم على العمل في الطاقة العالية والفولتية العالية كبير مع التوافقيات منخفضة.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, la crise énergétique et l'augmentation du niveau de pollution sont des problèmes majeurs à travers le monde. Des sources d'énergies nouvelles, renouvelables et propres doivent donc être considérées. Une nouvelle source possible est la pile à combustible (en Anglais : Fuel Cell, FC), dont le principe a été découvert par Sir William Grove en 1839.

[THO 05]

Une pile à combustible utilise l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité, sans pollution. Les autres produits sont simplement de l'eau pure et de la chaleur. Les scientifiques ont déjà et continuent à développer différents types de piles à combustible, caractérisés par la nature des gaz et de l'électrolyte utilisé, déterminant ainsi ses caractéristiques de fonctionnement. Un type prometteur, léger et facile à construire, est la pile à membrane électrolyte polymère (PEMFC), utilisée par la NASA dans les années 1960 dans le programme spatial Gemini

La première pile à combustible de type PEM, conçue par la compagnie General Electric, a été utilisée par la NASA. A cette époque, le centre d'étude spatiale a réalisé une analyse des sources d'énergie possible pour le programme spatial Gemini. Deux principales sources d'énergie ont été envisagées : les piles à combustible et les cellules photovoltaïques. Si ces deux technologies exigeaient d'importants travaux de conception et de mise au point, la pile à combustible de type PEM semblait offrir de nombreux avantages par rapport aux cellules photovoltaïques ou aux autres types de pile à combustible, tels que la simplicité, le poids et la compatibilité avec les conditions de fonctionnement imposées par le programme Gemini .**[ALI 09]**

Pour une utilisation meilleure et plus efficace de la pile à combustible, une connaissance détaillée du fonctionnement est nécessaire. L'utilisation de ce dispositif est particulièrement compliquée, car on a un grand nombre de paramètres à contrôler en même temps (les flux des gaz, la température de fonctionnement et l'humidification des membranes). L'influence de tous les paramètres intérieurs et extérieurs de la pile, rend la modélisation complexe. Une modélisation de la pile dépend en général de l'objectif visé. Dans le présent travail, le modèle obtenu doit permettre d'analyser le comportement de la pile dans un environnement d'électronique de puissance.

Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible et difficilement exploitable malgré d'importants efforts pour empiler en série le plus grand nombre de cellules élémentaires. Donc nécessite un convertisseur entre la pile et la charge électrique dont le premier rôle est d'élever la tension délivrée par la pile cet étage de conversion est, en outre, indispensable en raison de la variation de la tension délivrée en fonction de la charge qui peut atteindre au moins 20 % de la tension nominale.

Pour la conversion de tension de la pile du continue vers alternatif en utilisant un convertisseur statique de puissance tel que onduleur multi-niveaux. Grâce à leur topologie, les onduleurs multi-niveaux permettent une association série de plusieurs cellules de commutation, ce qui permet une augmentation du niveau de tension appliqué et également la puissance transitée. Cette structure permet aussi d'avoir une tension de sortie proche de la sinusoïde; grâce aux plusieurs niveaux de tension fournis par ce convertisseur.

Ce travail est composé de quatre chapitres rappelant la démarche présentée ci-dessus.

Le premier chapitre se veut une introduction aux piles à combustibles. Après un rappel historique de leur évolution depuis leur découverte à ce jour, on présente ainsi leur avantages et inconvénients ainsi que leur champs d'applications , on présente les différentes Technologies de piles à combustible disponibles. On s'intéresse ensuite tout particulièrement à la filière des piles à membrane échangeuse de protons dites PEMFC. On présente alors le principe de fonctionnement et sont Eléments structuraux .

Nous présentent dans le deuxième chapitre les principaux types d'onduleurs multi-niveaux ainsi que leur principe de fonctionnement . Outre l'éventail de ces structures, les différents modes de commande seront détaillés afin de bien comprendre le contrôle de ces structures. Leurs propriétés seront analysées de manière à délimiter leurs champs d'applications respectifs, pour aboutir à l'intérêt des structures Neutral Point Clamped(NPC)

La dernière partie de ce mémoire est dédiée à l'étude, la modalisation et la simulation de notre système , nous présentent aussi les résultats de notre projet .

Nous terminons à la fin par une conclusion générale, qui est la synthèse de notre mémoire .

Chapitre I

Généralités sur
les Piles à
Combustibles

I.1.Introduction

Il y a 150 ans, en 1839, la première pile à combustible a été inventée par Sir William Robert Grove, un professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres. Depuis, il est connu comme « le Père de la pile à combustible ». Ses expériences sur l'électrolyse - l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène - ont mené à la première mention d'un dispositif qui plus tard se nommera pile à combustible. Il a pensé qu'il était possible de renverser le procédé d'électrolyse et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. Pour vérifier cette théorie il a enfermé deux bandes de platines dans des bouteilles séparées, l'une contenant de l'hydrogène l'autre de l'oxygène. Quand ces récipients ont été immergés dans de l'acide sulfurique dilué un courant a commencé à s'établir entre les deux électrodes et de l'eau s'est formée dans les bouteilles de gaz. Pour augmenter la tension produite, il a placé plusieurs de ces dispositifs en série et a produit ce qu'il a appelé une « batterie à gaz », le précurseur de la pile à combustible moderne. [THO 05]



Figure I.1: Sir William Grove, inventeur historique de la Pile à Combustible

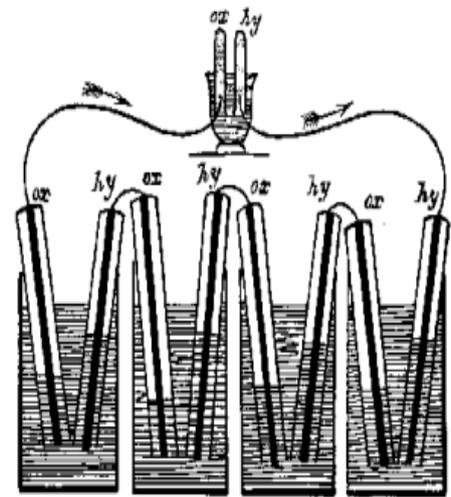


Figure I.2 : La Pile à Combustible de W. Grove [THO 05]

La pile à combustible a connu une renaissance au début des années 60 lorsqu'un nouvel organisme gouvernemental des USA - the National Aeronautics and Space Administration (NASA) - rechercha comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La NASA avait déjà éliminé les batteries car elles étaient trop lourdes, l'énergie solaire car source trop chère et l'énergie nucléaire car trop risquée, et cherchait une source alternative. La pile à combustible est apparue comme une solution possible, et la NASA a attribué un

certain nombre de contrats de recherche pour développer cette solution. Cette recherche a mené au développement de la première membrane échangeuse de protons ou « membrane d'électrolyte polymère » .[ALI 09]

Les piles à combustibles apparaissent comme l'un des moyens de production d'énergie pour le futur, en parallèle des énergies renouvelables, parce qu'elles ne produisent pas de polluants lorsqu'elles sont alimentées par l'hydrogène pur . Leur application est multiple autant dans le domaine automobile que le domaine stationnaire et portable .

I.2 Atouts et inconvénients de la Pile à Combustible

Souvent présentées comme la solution de l'avenir dans la production énergétique, les piles à combustible suscitent un engouement scientifique indissociable des préoccupations actuelles en terme d'écologie ou de nuisances sonores. Malgré cela, un certain nombre de verrous technologiques reste à lever pour faire de la PAC une alternative énergétique viable et financièrement accessible au grand public.

(a) Avantages des piles à combustible

Un haut rendement énergétique :

La technologie PAC s'inscrit bien dans la tendance actuelle d'économie d'énergie. Outre le rendement électrique net honorable (de 40 à 70%), une des spécificités importantes est que celui-ci ne diminue pas voire augmente à charge partielle même si sa valeur chute, à très faible charge, en raison de la consommation des périphériques. De plus, à la différence des installations conventionnelles (turbines à gaz), l'efficacité des systèmes n'est pas conditionnée par l'effet de taille ce qui laisse entrevoir de nombreuses applications potentielles dans une large gamme de puissance, du watt au mégawatt [Gui 04] .

En ce qui concerne les applications de type transport, la comparaison aux moteurs thermiques traditionnels est frappante. Sur un parcours type (parcours européen) :

- le rendement expérimental d'un moteur thermique (du réservoir à la roue) se situe entre 21 et 24% (essence ou diesel), ces rendements étant susceptibles d'être améliorés (23 à 27%),
- le rendement d'une PEMFC est de 33% par reformage de l'essence, de 38 % dans le cas d'un reformage du méthanol et jusque 50% dans le cas de l'utilisation

d'hydrogène gazeux. En considérant en plus le moteur électrique, on obtient un rendement du réservoir à la roue variant de 22 à plus de 33% selon le carburant.

Pour les applications stationnaires, la mise en œuvre d'un cycle de cogénération (récupération de la chaleur issue de la réaction exothermique), permet d'atteindre des rendements globaux de 85 à 90%.

La protection de l'air :

Dans un contexte actuel soucieux de la limitation des gaz à effet de serre (Conférence de Kyoto COP3, 1997), la PAC se démarque des modes de production énergétique existants par son faible niveau d'émission. Dans le cas d'une pile fonctionnant à l'hydrogène pur ou au méthane, les émissions d'oxydes de soufre (SOX), de particules toxiques ou de poussières sont nulles. Dans le cas des autres piles, les émissions de dioxyde de carbone sont malgré tout 30% inférieures à celle d'un groupe électrogène thermique. Enfin, et ce pour toutes les technologies de PAC, les émissions de monoxyde de carbone (CO) et d'oxydes d'azote (NOX) sont cinquante fois inférieures aux systèmes thermiques de production à base d'hydrocarbures.

La limitation des nuisances sonores :

Lors de leur fonctionnement, les piles sont silencieuses : dans les systèmes PAC, seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes et le système de ventilation produisent un léger bruit. C'est un avantage majeur pour l'insertion des piles en milieu urbain [Dan06] .

Un fonctionnement possible à basse température :

L'utilisation possible de PAC basse température revêt un double intérêt :

- l'intégration possible de la filière PAC dans les applications portables ou mobiles,
- la possibilité d'un rendement plus élevé que les piles hautes températures hors cogénération.

(b) Inconvénients des piles à combustible

Le coût global :

Actuellement, les piles ne sont pas fabriquées en grande série ce qui draine des coûts de fabrication élevés. Dans les applications automobiles, le prix des piles est cent fois supérieur à celui assurant la compétitivité (60B/kW) et 20 à 50% trop élevé pour les

applications stationnaires. Dans le cas d'une pile PEMFC, le coût se répartit entre la membrane, les électrodes, le catalyseur et les plaques bipolaires selon les données du Tableau I-1. Pour exemple, le prix du platine recouvrant les électrodes est voisin de 17B/g sachant qu'environ 6g/kW sont nécessaires.

Le coût rationnel le plus important est induit par les plaques bipolaires qui coûtent près de 500 B/m² (50% du coût de la pile). De nombreux progrès ont déjà été faits en terme de teneur en platine puisque la quantité usitée a été divisée par 20 en 30 ans . [ENG 13]

Eléments/Matériau	Prix /kW
EME (0,6m ² /kW)	3840 B/Kw
<ul style="list-style-type: none"> • Electrodes • Membrane 	3200 B/kW
Catalyseur Platiné (6g/kW)	540 B/kW
Plaques bipolaires gravées	100 B/kW
Eléments structuraux	90 B/kW
Total Stack	7000 B/kW

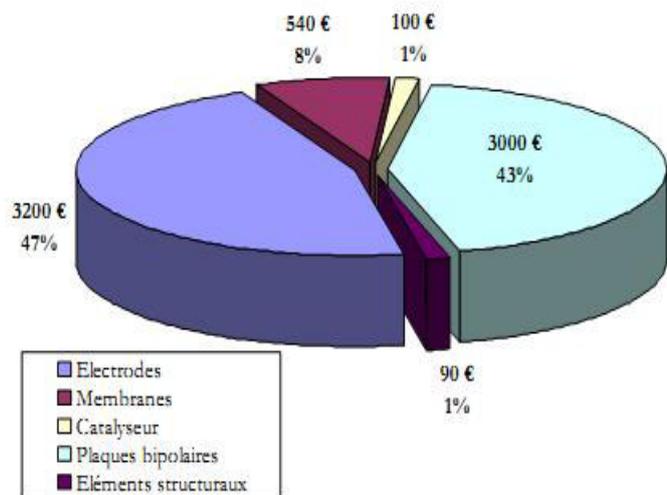


Tableau I.1 : Récapitulatif des prix en de B au kW pour une PAC de type PEMFC [Gui 04]

Figure I.3 : Répartition des coûts de réalisation d'une PEMFC

La fiabilité du système :

Peu de renseignements sont disponibles sur la fiabilité des piles, la plupart d'entre elles étant encore en phase de développement. On peut cependant remarquer que, du fait des diverses technologies employées et du type de fonctionnement, les contraintes requises diffèrent en fonction des applications :

- quelques milliers d'heures de durée de vie pour les applications de transport,
- au moins 5 ans pour le stationnaire (objectif visé : 100000 heures).

La fiabilité reste un point clé à améliorer, la durée de vie étant relativement courte et les frais de maintenance élevés (notamment en cas de changement de cellules du fait du prix) .[Gui 04]

La logistique de production du carburant :

L'hydrogène ne se trouve que rarement sous sa forme gazeuse (dihydrogène) même si l'élément chimique est présent dans l'intégralité des composés organiques (eau, hydrocarbures).

Le dihydrogène est typiquement obtenu par vapocraquage du pétrole (Steam Vapor Cracking à 400°C).

Processus chimique industriellement éprouvé, le principal défaut du vapocraquage réside dans la production conjointe de dioxyde de carbone (GES : gaz à effet de serre). Parallèlement se pose encore le problème de la qualité du dihydrogène : la pile est fort exigeante quant à la qualité du combustible, trop d'impuretés rendant le catalyseur inopérant. Le combustible ne peut contenir plus d'1 cm³ de CO par m³ d'hydrogène. Si le vapocraquage reste la filière privilégiée de production, d'autres alternatives sont possibles : utilisation de biogaz, reformage de méthanol.

Dans le cas de l'industrie automobile par exemple, deux méthodes privilégiées sont utilisées pour l'alimentation de la pile : stockage de dihydrogène embarqué ou reformage.

Le stockage de l'hydrogène dans un véhicule soulève des problèmes technologiques complexes. Les techniques actuelles mises en œuvre sont les suivantes :

- stockage sous forme liquide à basse température (-252 °C), ce qui nécessite un réservoir thermiquement bien isolé (cryogénique),
- stockage sous pression de l'hydrogène gazeux (400 à 700 Bars) dans des réservoirs appropriés. Dans la technique du reformage, l'hydrogène est synthétisé in situ par oxydation du méthanol en présence de vapeur d'eau (300°C) :



Le méthanol est normalement produit à partir de gaz naturel mais peut également être fabriqué à l'aide de biomasse (déchets de bois ou ménagers) ou de charbon. L'hydrogène est extrait directement du méthanol à l'aide d'un reformeur installé à bord du véhicule. Le principal problème, outre le matériel supplémentaire embarqué, est la manipulation délicate du méthanol (toxicité élevée).

L'alimentation en oxygène :

Malgré la grande facilité d'obtention du comburant, il existe deux inconvénients majeurs. Le dioxygène est à la même pression que l'atmosphère et sa compression (jusqu'à 4

Bars) requiert 10 à 30% de la puissance fournie. Enfin, la purification à l'entrée de la pile est volumineuse et coûteuse.

I.3 Les applications envisageables pour la PAC

On distingue trois grands types d'applications :

- stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt),
- transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts),
- portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts).

I.3.1 Applications stationnaires

Les applications stationnaires de la PAC, viennent d'abord les applications domestiques avec des puissances de l'ordre de 1 à 5 kW. En France, le projet EPACOP de GDF a permis l'installation de cinq piles PEMFC (2 à Dunkerque, Nancy, Sophia-Antipolis et Limoges) pour la caractérisation de leur performances dans des conditions réelles de fonctionnement.

Ces piles utilisées en stationnaire comme source d'énergie sont alimentées en gaz de ville qui est réformé en hydrogène avant sa consommation dans la pile. La puissance électrique nette produite est de 4 kW (pouvant supporter des pics de 10 kW pendant 15 minutes) pour une puissance thermique de 5.6 kW.

Des installations plus importantes, en cogénération, peuvent atteindre des puissances allant jusqu' à 1 MW. Toutefois, les applications de cette taille en test (250 kW à Berlin) ne permettent pas d'avoir un recul suffisant. [JIL 05]

I.3.2 Applications de type transport

Historiquement, les premières PAC furent développées dans ce contexte, notamment par la NASA mais aussi dans les sous-marins de l'US Navy. C'est actuellement la voie qui engage le plus de moyens techniques et financiers sous l'importante pression des pouvoirs publics. La cible privilégiée de cette application concerne les véhicules particuliers dont le marché mondial croît d'environ 2,5% par an.

Parmi les produits les plus aboutis, il convient de citer le projet Nekar , fruit de la collaboration entre les firmes Daimler-Benz et Ballard. Basée sur une architecture de Mercedes Classe A, la voiture fonctionne au méthanol, l'hydrogène étant produit par

reformage. La PAC de 75 kW (100 Ch.DIN) autorise 600 kilomètres d'autonomie à une vitesse de 150 km/heure.

Tous ces constructeurs prévoient des préséries à partir de 2004-2005 : Ford (FCV), Opel (Zafira HydroGen3), Honda (FCX).



Figure I.4 : Pile Ballard Mark 90 embarqué dans le véhicule Ford FCV (85kW) [Gui04]

I.3.3 Applications portables

Le marché des appareils électroniques portatifs (téléphones, ordinateurs, caméscopes , agendas électroniques...) en constante croissance peut également être conquis par les piles à combustibles. Ces appareils, d'une gamme de puissance comprise entre 0.1 et 10 W, souffrent actuellement de leur faible autonomie. En revanche, avec une pile à combustible, l'autonomie ne dépend que de la taille du réservoir de carburant (hydrogène ou méthanol) [JUL 05] .

La pile à combustible est plus intéressante que les batteries actuelles compte tenu de son autonomie, mais aussi parce qu'aucun système de recharge n'est requis. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C).



Figure I.5 : Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004) , autonomie = 20h, poids = 900g

I.4 Technologies de piles à combustible disponibles

En règle générale c'est l'électrolyte utilisé qui différencie les piles à combustible et qui donne leur nom aux grandes familles de piles. La température de fonctionnement est aussi un facteur de différenciation et l'on parle de piles à combustible basse température ou haute température. En pratique plus la température de fonctionnement est basse, plus le système est simple à utiliser. Mais en contrepartie plus les catalyseurs sont onéreux et plus le carburant doit être riche en hydrogène. [SAD 06]

les principaux types de pile à combustible sont les suivants :

- Les piles alcalines : AFC (Alcalin Fuel Cell)
- Les piles à membrane polymère : PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- Les pile à méthanol direct : DMFC (en Anglais Direct Methanol Fuel Cell)
- Les piles à acide phosphorique : PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Les piles à carbonates fondus : MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)
- Les piles à électrolyte solide : SOFC (Solid Oxyd Fuel Cell)

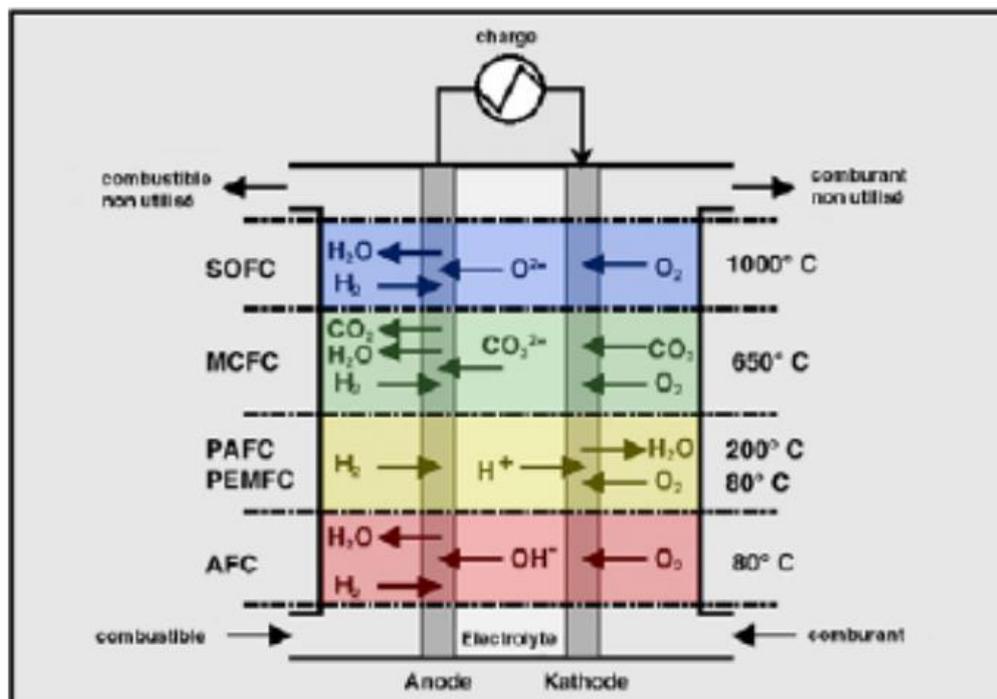


Figure I.6 : Les différences type de pile à combustible

Le tableau I.1 présente les différentes technologies de piles à combustible et leurs principales caractéristiques.

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Solution KOH	Membrane échangeuse de protons	Membrane échangeuse de protons	Acide phosphorique	Mélange de Li ₂ CO ₃ et de KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	Oxyde de zircon stabilisé à l'yttrium
Ion utilisé	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Température de fonctionnement (en °C)	<100	60-100	60-100	160-220	600-700	800-1100
Combustible	H ₂	H ₂	Méthanol	H ₂	H ₂ produit à partir d'hydrocarbure	H ₂ et CO produit à partir d'hydrocarbure
Oxydant	O ₂	Air/ O ₂	Air/ O ₂	Air/ O ₂	Air/ O ₂	Air/ O ₂
Rendement électrique pile en (%)	35 - 40	60 - 70	50	65	45 – 65	20 - 30
Champs d'applications	Applicatons spatiales	automobile, cogénération	Applications mobiles	cogénération	Cogénération	Cogénération

Tableau I.2: Différentes technologies de piles à combustibles .[TOU 05],[SAD 06]

I.5 Pile à Combustible de type PEMFC

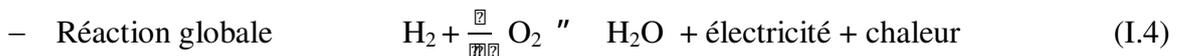
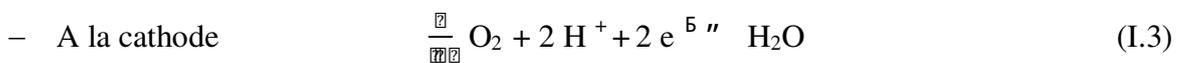
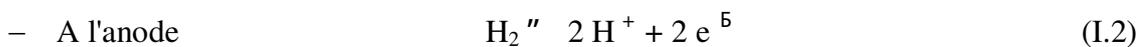
La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisée dans la majorité des prototypes construits. Dans cette mémoire , nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible.

I.5.1 principe de fonctionnement

Quelle que soit la technologie employée pour la PAC, le principe chimique reste le même puisqu'il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction, l'oxygène étant l'espèce réduite. La réaction qui sera développée décrit rigoureusement le principe inverse de l'électrolyse de l'eau.

Les deux électrodes sont isolées par une membrane solide qui assure le rôle d'électrolyte en permettant le transfert des protons au cœur de la pile ainsi qu'en isolant les réactifs de chaque demi pile comme cela est montré dans la Figure n° I-8. Les faces de chaque électrode sont recouvertes d'un matériau catalytique conducteur, le plus souvent du platine dispersé sur charbon actif.

L'oxydation électrochimique de l'hydrogène est réalisée au niveau de l'anode, à partir de laquelle on observe une désertion d'électrons. L'anode constitue dès lors le pôle négatif de la pile, dans le cadre des conventions prises pour le sens du courant. L'oxygène est réduit au niveau de la cathode [Gui] .



La Figure I.6 ci-dessous récapitule succinctement les phénomènes mis en jeu dans une cellule élémentaire (Cell) de pile à combustible.

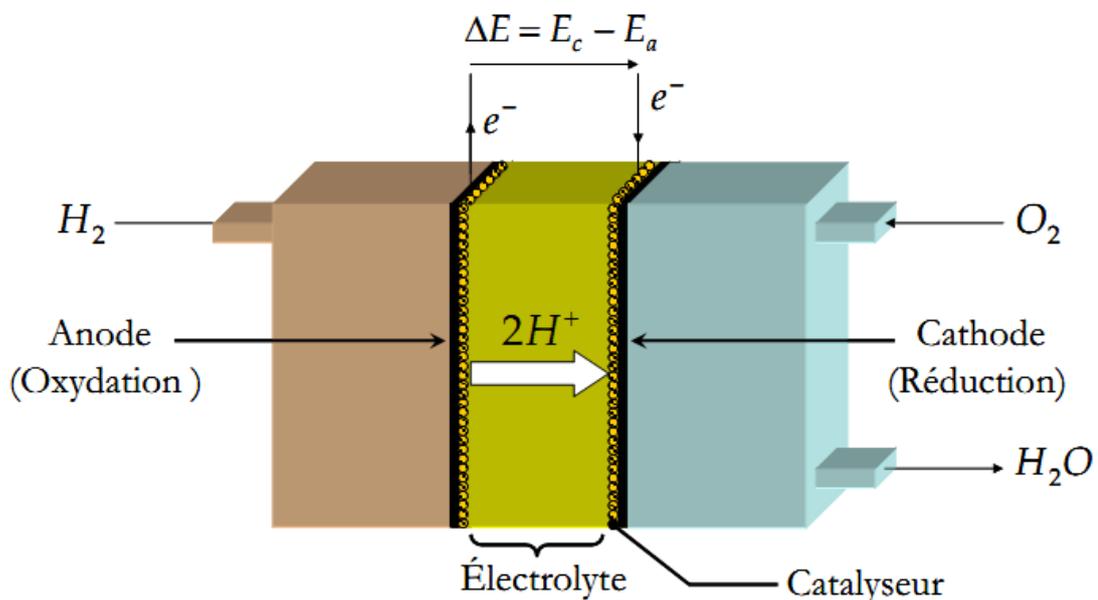


Figure I.7: Principe de fonctionnement d'une Pile à Combustible de type PEMFC

I.6 Eléments structuraux d'une cellule élémentaire

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME) . [JER 04]

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement

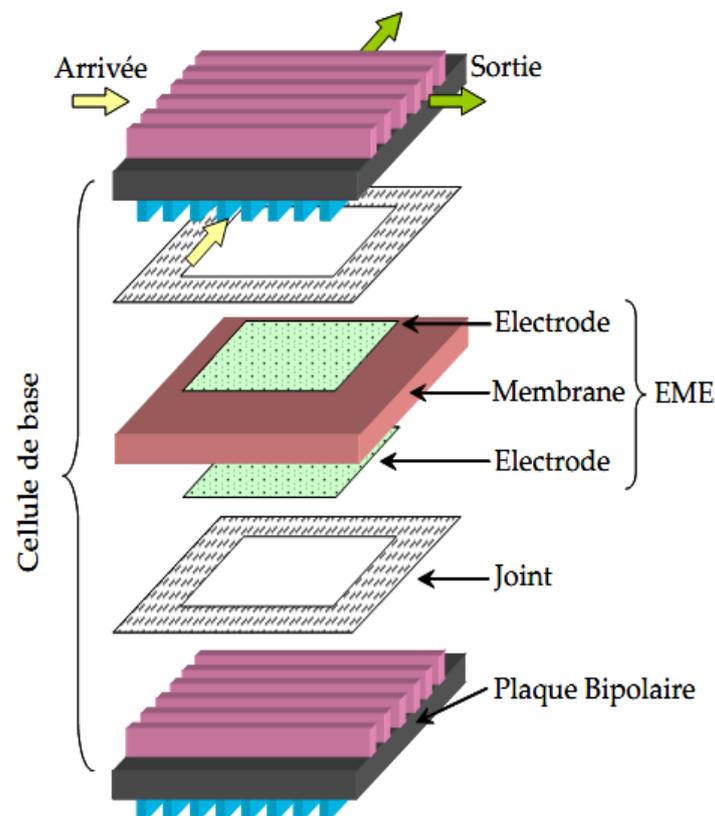


Figure I.8: Empilement type d'une cellule de pile

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule : la membrane (l'électrolyte), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques. Ces éléments vont être présentés plus en détail dans les trois parties suivantes.

I.6.1 La membrane électrolytique

La membrane en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. La membrane mince d'une épaisseur de 50 à 175 μm . Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène, les ions d'hydrogène se déplaçant ainsi que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. La proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour 1. Pour cette raison, les gaz en contact avec une membrane doivent être saturés en eau pour assurer un fonctionnement efficace.

Les membranes doivent être conductrices pour les protons, isolantes pour les électrons et imperméables aux gaz. De plus elles doivent avoir une bonne tenue mécanique et être stables. L'intégration dans un assemblage membrane-électrodes leur apporte une structure facilitant leur intégration dans les cellules. Un certain nombre de membranes commerciales sont disponibles comme le Nafion, produit par Dupont (figure I.9). En outre, certains fabricants de piles à combustible comme Ballard ont développé leurs propres membranes.[THO 05]

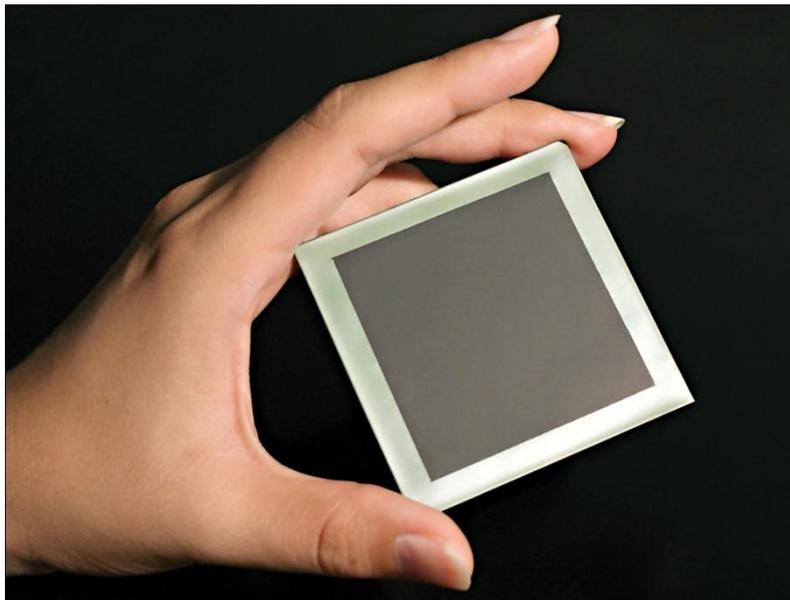


Figure I.9: Membrane DuPont [ENG 13] .

I.6.2 Les Electrodes

Les électrodes sont le lieu des réactions d'oxydoréduction. Les électrodes doivent donc offrir la plus grande surface d'échange possible avec les gaz. Elles sont constituées d'un feutre ou d'un papier de carbone (100 à 300 μm d'épaisseur) dont la face en contact avec l'électrolyte est enduite d'une pâte contenant du carbone platiné, d'un polymère hydrophobe : du poly tétrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon). Les électrodes sont constituées de deux couches : la couche de diffusion (3, 9) et la couche d'activation (5, 7).

- Couche de diffusion :

Cette zone a pour objet de diffuser les gaz amenés par les canaux des plaques bipolaires en zone active où la réaction se produit .Elle assure donc l'approvisionnement de la zone active en gaz réactif hydraté, la conduction électrique entre la zone active et les plaques amenant le courant ainsi qu'une bonne évacuation de l'eau produite par la réaction.

L'alimentation en gaz doit être la plus uniforme possible sur la surface de l'électrode afin d'assurer l'alimentation de la plus grande partie possible du catalyseur (platine) en réactifs et d'éviter ainsi les points chauds dus au caractère exothermique de la réaction électrochimique.

- Couche d'activation :

La zone active est le lieu des réactions électrochimiques. Elle correspond à la zone de couplage entre les phénomènes électriques, chimiques et le transfert de masse. Elle doit à la fois assurer le transport des pièces dissoutes en solution par diffusion, la migration des protons et le transfert électronique par le biais du carbone. La grande difficulté avec laquelle se réalisent les différents processus de diffusion et de réaction se traduit par les pertes d'activation à la cathode et à l'anode. C'est pour cela que l'utilisation du platine est nécessaire afin d'augmenter les vitesses ou cinétiques des réactions chimiques à l'interface électrolyte - catalyseur. Ces vitesses peuvent être 10 fois plus rapides en présence du platine . [DAN 06]

I.6.3 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires marquent la frontière entre deux cellules (interconnexions) et contribuent à la cohésion mécanique de l'ensemble. En dehors des extrémités de pile où seule une espèce chimique est disponible (plaque monopolaire ou terminale), les plaques bipolaires doivent présenter une forte imperméabilité pour assurer la séparation des réactifs entre deux cellules élémentaires consécutives. De plus, la collecte du courant leur impose une conductivité électrique supérieure à 10 S/cm. Outre ces contraintes, une bonne stabilité chimique est requise, notamment pour éviter la corrosion en présence d'eau ou d'acides.

Les plaques les plus couramment utilisées sont en graphite ou en métal sur lesquelles des canaux de distribution ($\approx 500 \mu\text{m}$) sont gravés par usinage. Le prix élevé, étroitement lié au processus de gravure, occupe près de la moitié du prix total d'une pile. Pour les raisons évoquées, de nouveaux développements voient le jour comme les composites organiques ou les tôles métalliques . [KOS 13]

Le principe des plaques bipolaires à base de composites organiques repose sur l'utilisation de charges (carbone, graphite) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges autorisent la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant, et le liant polymère la bonne tenue mécanique.

L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des matières de base, et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par le simple moulage du polymère chargé sur une empreinte. Le développement actuel de cette filière technologique fait apparaître des comportements comparables aux plaques traditionnelles en graphite sur plusieurs centaines d'heures.

Parallèlement aux composites organiques, les métaux, et plus particulièrement les aciers inoxydables, sont des matériaux potentiellement adaptés à la réalisation de plaques. Leurs bonnes propriétés mécaniques (mise en forme aisée, tenue mécanique), électriques et thermiques sont le fer de lance des plaques bipolaires en tôles métalliques. Utilisées sous forme de feuilles minces embouties, elles permettent une réduction de l'épaisseur et de fait, une diminution de la masse ainsi qu'une baisse des coûts d'un facteur 3. Le choix de l'alliage est un point clé de cette technologie si l'on souhaite éviter d'éventuels problèmes de corrosion susceptibles d'obstruer les canaux ou d'altérer l'étanchéité. [DAN 06]

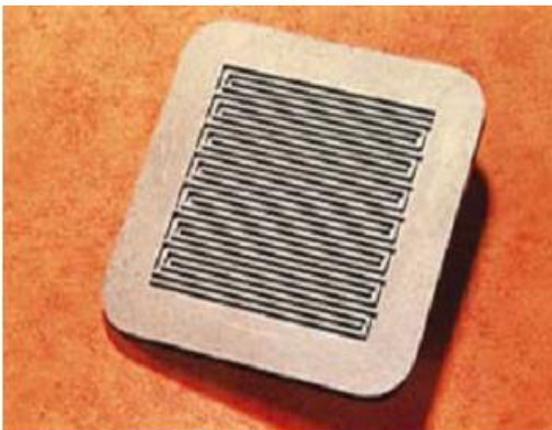


Figure I.10: Plaque bipolaire en composite organique obtenue par thermo compression (Source CEA)

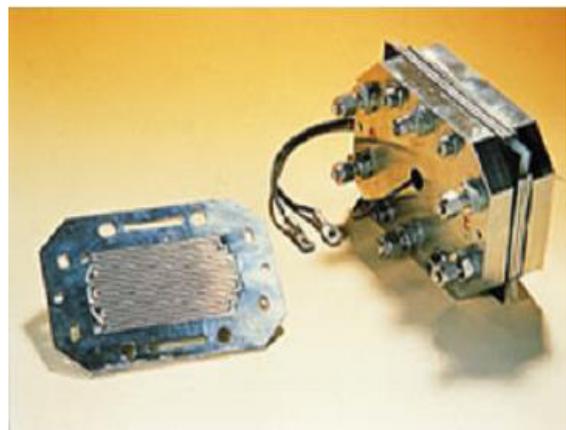


Figure I.11: Plaque bipolaire en tôle métallique (Source CEA)

I.7 Architecture du stack PEM

La tension théorique à vide d'une cellule élémentaire de pile à combustible idéale est de 1,23V aux conditions standard [Lar 00]. Dans une pile à combustible réelle, la tension mesurée à vide est de l'ordre de 1 V. Celle-ci est de l'ordre de 0,5 à 0,7 V à pleine charge. Pour obtenir une tension élevée, il est donc nécessaire de mettre en série plusieurs cellules en formant un stack. Aujourd'hui on rencontre des stacks comportant jusqu'à 100 à 120 cellules et donc des tensions nominales comprises

entre 60 et 80 V. Le courant débité est directement lié à la surface active des cellules et est aujourd'hui de l'ordre de 0,5 A.cm⁻².

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEMFC. Les différents points abordés concernaient quelques rappels historiques du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement, l'architecture des systèmes, les principaux fabricants actuels en Europe et en Amérique du Nord.

Chapitre II

Etude d'un
onduleur
multi-niveau

II.1 Introduction

Avant de commencer l'exploration de nouvelles topologies de convertisseur, il est nécessaire de présenter les structures de conversion multi-niveaux les plus classiques. L'histoire de la conversion multi-niveaux commence dans les années 60 . La première structure décrite est une mise en série de pont en H. Puis dans la fin des années 70 est apparu le convertisseur clampé par le neutre (NPC) . Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multi-niveaux pour des applications de moyennes puissances. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure.

Dans les années 90, les recherches vers de nouvelles structures se sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série , aussi connu dans la littérature sous le nom de Flying Capacitor (FC). Et c'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série.

Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multi-niveaux. Beaucoup de propriétés de ces structures sont communes avec les nouvelles structures, c'est pour cela que dans un premier temps, ces structures de base seront présentées [ALEX 11] .

En électronique de puissance moderne, la technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important, recherche liée également à des tensions plus élevées, au-delà de celles compatibles avec les tensions de blocage des dispositifs à semi-conducteurs de puissance. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire qui présentent un contenu harmonique réduit [ALF 06].

Dans ce chapitre, nous décrirons les principales topologies d'onduleurs multi-niveaux. Nous déduirons leurs champs d'applications.

II.2 principe de l'onduleur multi-niveaux :

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement Multi-niveaux. La figure II.1 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs Multi-niveaux . Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure II.1.a, dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou V_{dc1} . Sur la figure 3.1.b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, V_{dc1} ou $V_{dc1} + V_{dc2}$, [KHA 09] .

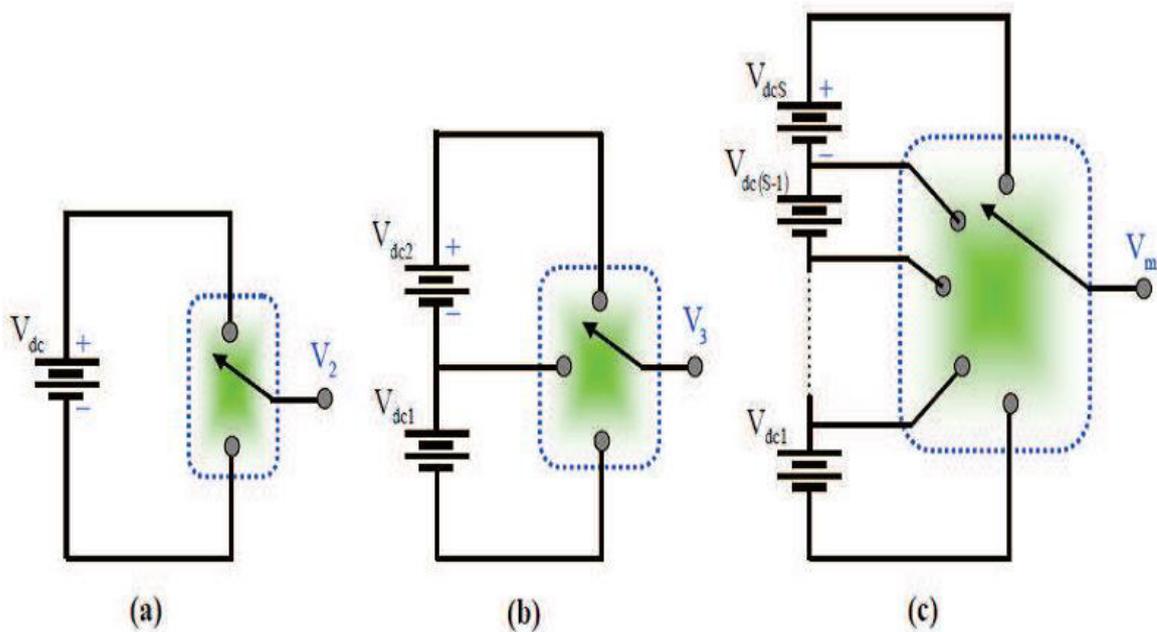


Figure II.1 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)

En général, les convertisseurs multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée à partir de plusieurs niveaux de tension discrets

II.3 Principales topologies d'onduleurs multi-niveaux

La figure 3.2 représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes

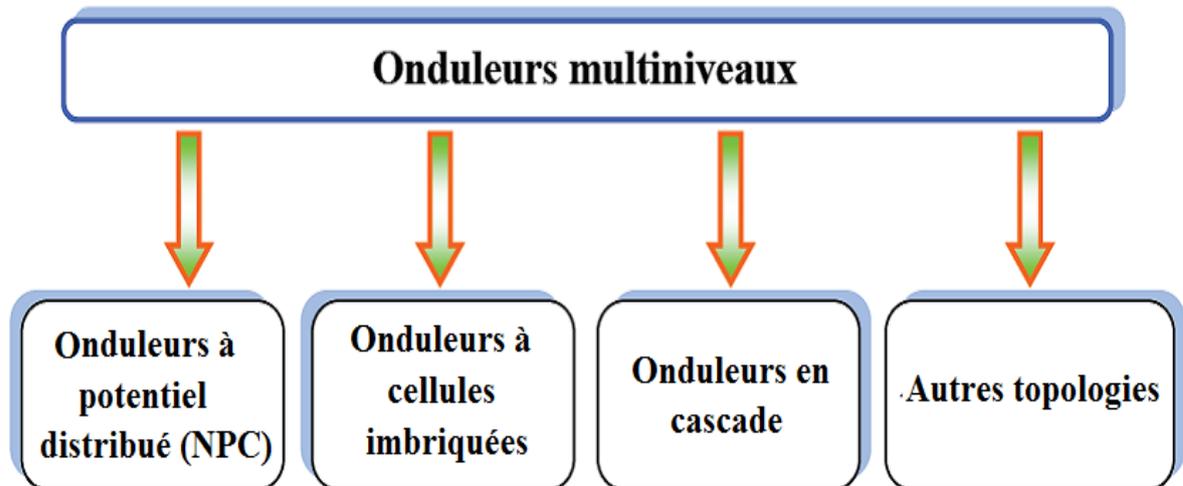


Figure II.2 : Principales topologies d'onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs multi-niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites de semi-conducteur, il y a trois directions principales pour réaliser un onduleur multi-niveaux, ou l'on considère les trois topologies les plus connues.

II.3.1 La Topologie à potentiel distribué (NPC)

Cette structure d'onduleur multi-niveau a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 dans [JEA 05]. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur.

La figure II.1 représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans laquelle les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence O. Pour l'obtention d'une tension de N-niveaux, $N - 1$ capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $E/(N-1)$, E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteurs (S_{xy}, S'_{xy}) forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire [MAN 04].

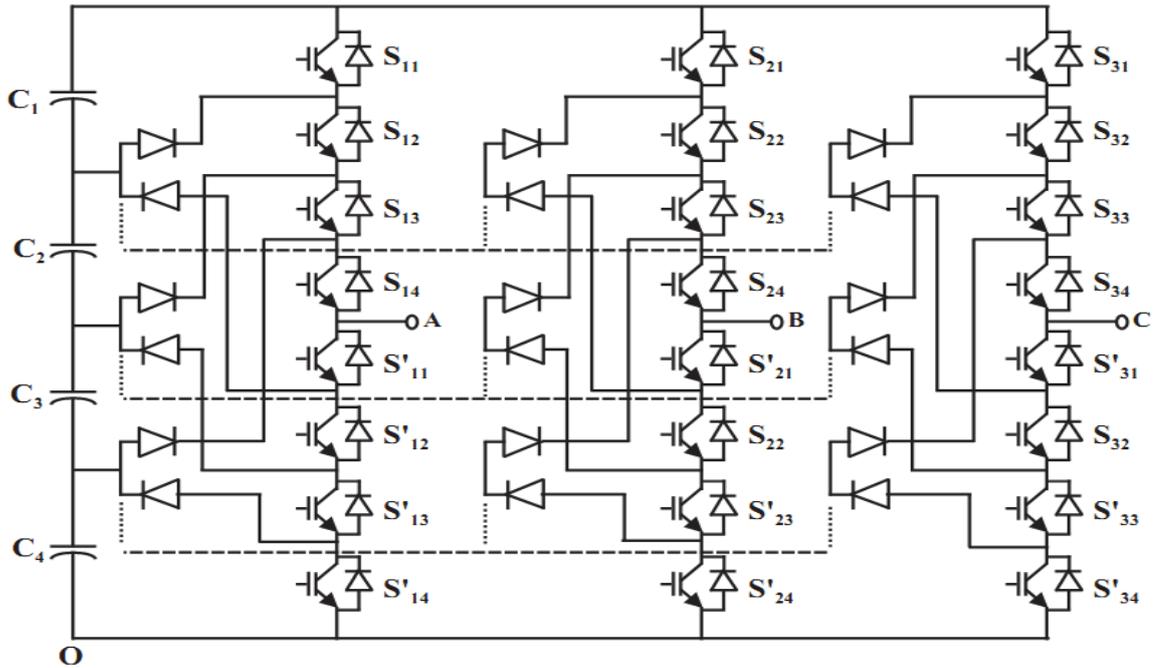


Figure II.3: Structure triphasée d'un convertisseur multi-niveau à potentiel distribué

Chaque branche du convertisseur est vue comme un commutateur dont les positions permettent de modifier le potentiel du point A. Comme le montre la figure II.2-a, ce point est connecté à chaque fois à l'une des tensions aux bornes des condensateurs, qui, des fois sont mis en série. Un exemple de configuration des commutations est montré aux Figure.II.2-b et Figure.II.2-c. Les interrupteurs en traits discontinus sont ouverts

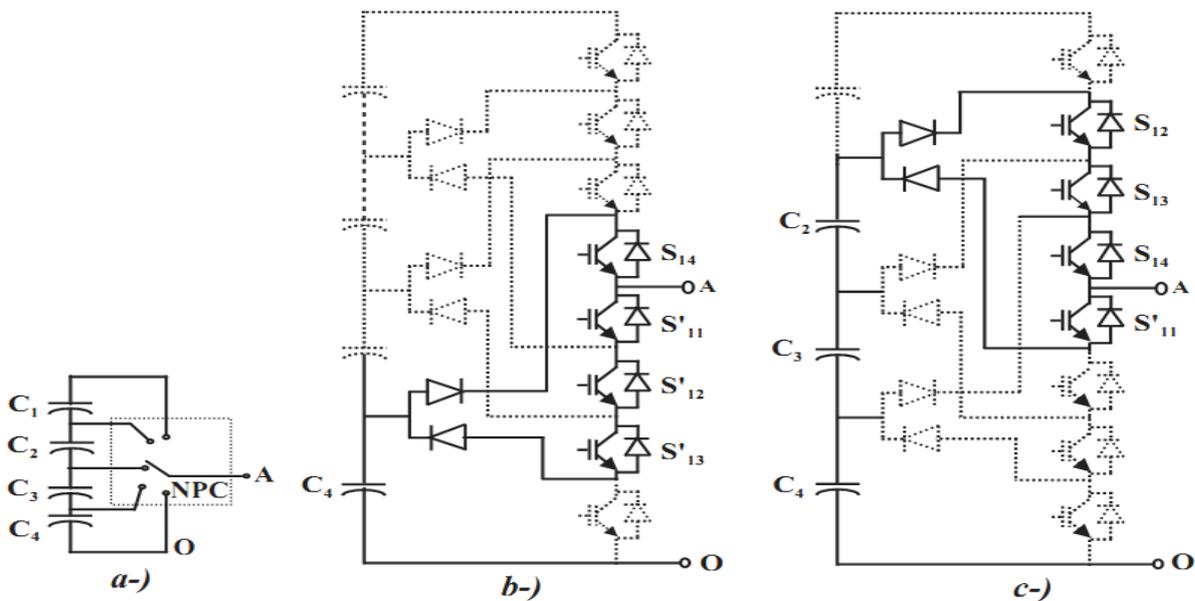


Figure II.4 : Topologie à potentiel distribué : Principe et exemples de mécanisme de commutation a-) Schéma de principe ; b-) Génération de $VA0 = Vc4 = E/4$ b-) Génération de $VA0 = Vc4 + Vc3 + Vc2 = 3E/4$

Cette topologie a été initialement proposée par A. Nabae et H. Akagi en 1981 , pour la génération de trois niveaux de tension (Neutral Point Clamped), et présente plusieurs avantages dont quelques un sont énumérés ci-dessous :

- La forme d'onde de trois niveaux résultante a une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les Eltres passifs peu volumineux, voire inexistant.
- Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur ; celle-ci est donnée par $E/(N - 1)$.

La topologie à potentiel distribué : Tension continue quelconque à la sortie d'un redresseur présente également plusieurs limitations, parmi lesquelles :

- Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe, voire impossible, car il est intimement lié au facteur de puissance de la charge à l'indice de modulation ;
- l'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes ;
- l'inégalité de commutations entre interrupteurs situés à l'extérieur de la structure par rapport aux autres ;
- le déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lors de leur mise en série.

En effet, la tension bloquée par chaque diode dépend de sa position dans le montage. Pour un convertisseur à N-niveaux, on trouve deux diodes dont la tension à bloquer est donnée par la relation suivante :

$$V_{D_{2k-1}} = \frac{E}{N-1} \left(\frac{2k-1}{N-1} \right), \quad k = 1 \dots \frac{N-1}{2}$$

Une résolution de ce problème consiste à insérer un nombre élevé de diodes en série. En supposant que la tension inverse des diodes est la même, le nombre de diodes requises augmente très rapidement en fonction du nombre de niveaux, ce qui complique l'implémentation du circuit et le rend par la même occasion peu Eable. En fonction de l'application, on est amené à insérer plus de diodes en série dans la partie du circuit nécessitant le blockage des tensions élevées ; si bien qu'il est possible de trouver pour deux niveaux de tension donnés, un nombre différents de diodes mises en série, aEn de respecter leur tension de blocage. La Eigure.II.3 montre la structure pyramidale proposée par I. Barbi .et qui permet une connection systématique des diodes, quelque soit le niveau désiré. En fonction du niveau de

tension désiré, les diodes se connectent mutuellement en série aEn que chacune d'entre elles bloque la même tension, $E/(N - 1)$.

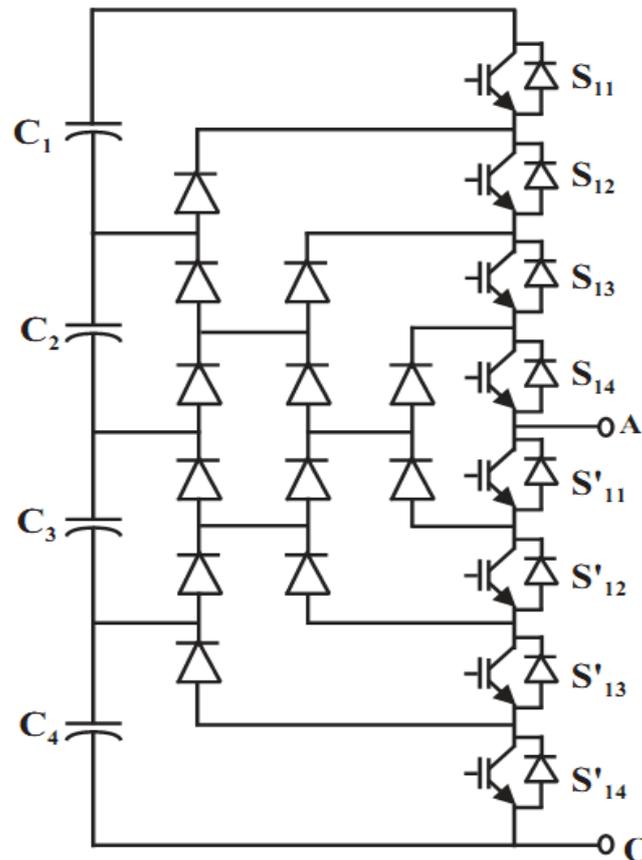


Figure II.5 : Structure pyramidale de la topologie à potentiel distribué

Les interrupteurs situés aux extrémités extérieures de chaque branche (S_{x1} et leurs compléments (S'_{x1} $x = 1..3$ subissent peu de commutations, tandis que ceux situés au tour du point A (à l'intérieur de la branche) en subissent plus. Si le convertisseur est conçu pour être utilisé avec un rapport cyclique moyen identique pour tous les interrupteurs de puissance, on est donc amené à sur-dimensionner ceux situés à l'intérieur de la branche, afin qu'ils puissent supporter la cadence de commutation .

Compte tenu de l'inégalité de la durée de conduction des interrupteurs, la durée de charge ou de décharge des condensateurs s'en trouve affectée. L'onde de tension en subit une modification à cause de la non uniformité de sa valeur entre deux niveaux consécutifs, ainsi qu'une augmentation du dV/dt . Cette topologie nécessite donc un contrôle rigoureux de l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs .Plusieurs stratégies permettant d'équilibrer ces tensions ont été proposées

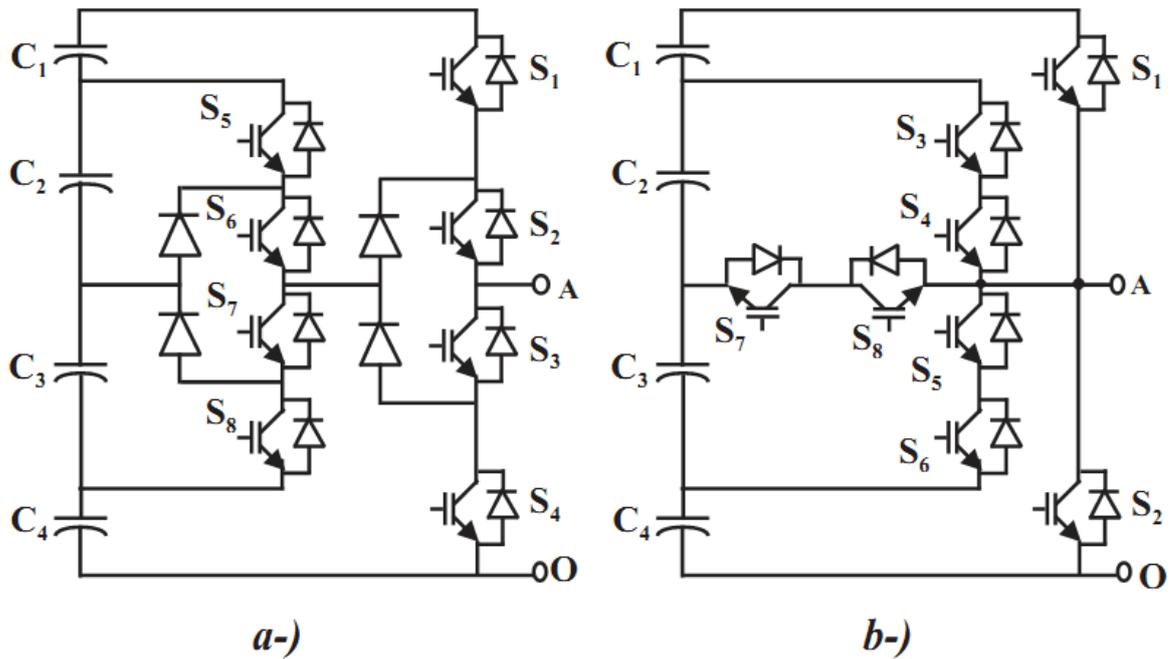


Figure II.6 : Autres variantes de la topologie à potentiel distribué a- connection en cascade de deux convertisseurs de type NPC sur un même bras ; b-Enchevêtrement de convertisseurs avec interrupteurs bidirectionnels

D'autres variantes de la topologie à potentiel distribué

Il existe plusieurs variantes de convertisseurs multi-niveaux dont la configuration est une modification de la topologie NPC de base. Celles-ci permettent par exemple de repousser certaines limitations de la structure de base, comme l'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes (voir Figure.II.3). La Figure.II.4 représente d'autres variantes de la topologie NPC. La Figure.II.4-a montre une connection en cascade de deux convertisseurs de type NPC, et permet l'obtention d'une tension ayant cinq valeurs différentes (celle de la structure de base a trois valeurs), mais ne résout pas le problème de l'inégalité des tensions de blocage que doivent supporter les interrupteurs. Cette variante est mieux adaptée à des applications de faible puissance. La variante proposée à la Figure.II.4-b ; elle a le même nombre d'interrupteurs que la topologie NPC de base à cinq niveaux, mais l'accès au point neutre se fait à travers des interrupteurs bidirectionnels et les interrupteurs ne supportent pas la même tension. Cette variante est aussi mieux adaptée pour des applications de faible puissance .

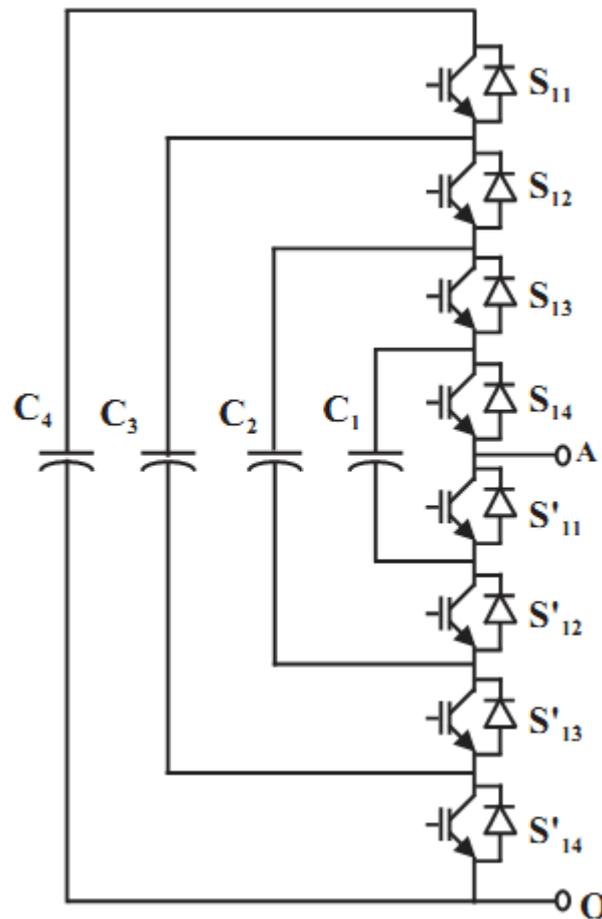


Figure II.7 : Topologie multi-niveau à cellules imbriquées

II.3.2 Topologie à cellules imbriquées [JEA 05]

Dans un convertisseur à deux niveaux de tension, chaque phase est constituée d'une paire d'interrupteurs de puissance montée en parallèle aux bornes d'un condensateur. Ils sont souvent commandés de façon complémentaire, si bien que la tension de sortie de la branche est reliée soit à la borne positive, soit à la borne négative de ce condensateur. Dans la topologie multi-niveau proposée par T. Meynard et H. Foch, plusieurs cellules « condensateur et paire d'interrupteurs » sont imbriquées les unes dans les autres comme l'illustre la Figure II.5 ($V_{c2} = 2V_{c1}$, $V_{c3} = 3V_{c1}$, $V_{c4} = 4V_{c1}$, ..., $V_{cN} = NV_{c1}$).

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Elle présente plusieurs avantages, notamment :

- La tension de blocage des interrupteurs est partout la même ;

- le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs (continu-continu, continu-alternatif, alternatif-alternatif), aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que birectionnel ;
- sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux ;
- les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

Le principal désavantage de cette topologie réside dans le nombre requis de condensateurs, ce qui peut représenter un volume prohibitif. En plus, si l'application dans laquelle le convertisseur est utilisé exige des tensions initiales non nulles aux bornes des condensateurs, il faut associer à la stratégie de commande une stratégie de pré-charge adéquate.

II.3.3 Topologie basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés [JOS 04].

La figure.II.6 représente la structure d'un convertisseur multi-niveau basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle).

Les cellules y sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle. Chaque cellule partielle est alimentée par une source de tension continue. Elles ont toutes la même valeur et doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série.

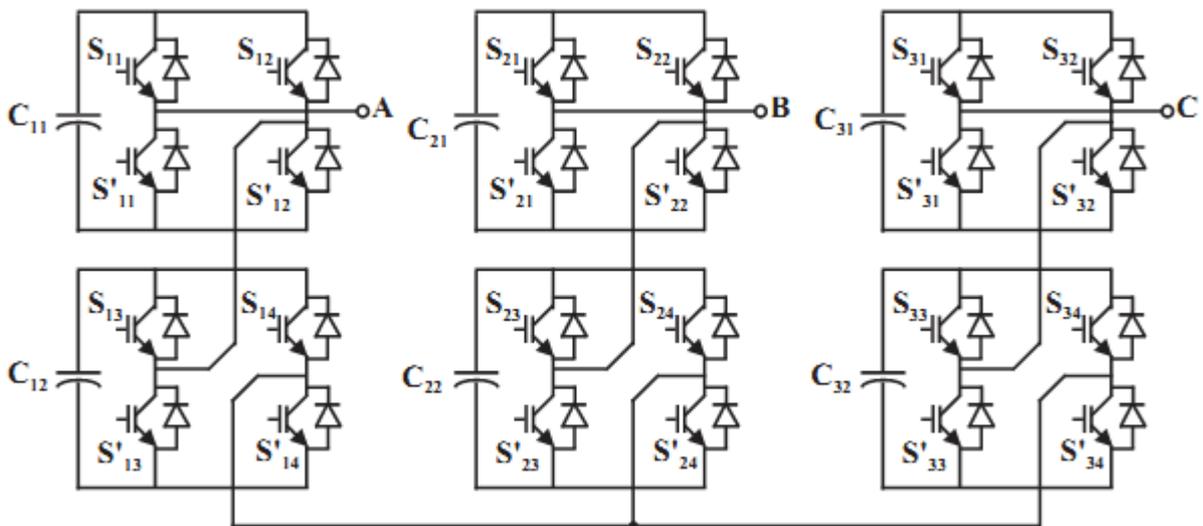


Figure II.8 : Mise en série de deux onduleurs monophasés par phase

La Egre.II.7 illustre un exemple de possibilité de commutation permettant d'obtenir la tension V_{AO} . Sur la Egre.II.7-a , la première cellule génère une tension de 1V , et la deuxième une tension de 0V qui pourrait aussi s'obtenir en activant les deux interrupteurs inférieurs (S'_{13} et S'_{14}). La tension résultante est la somme des tensions des cellules partielles.

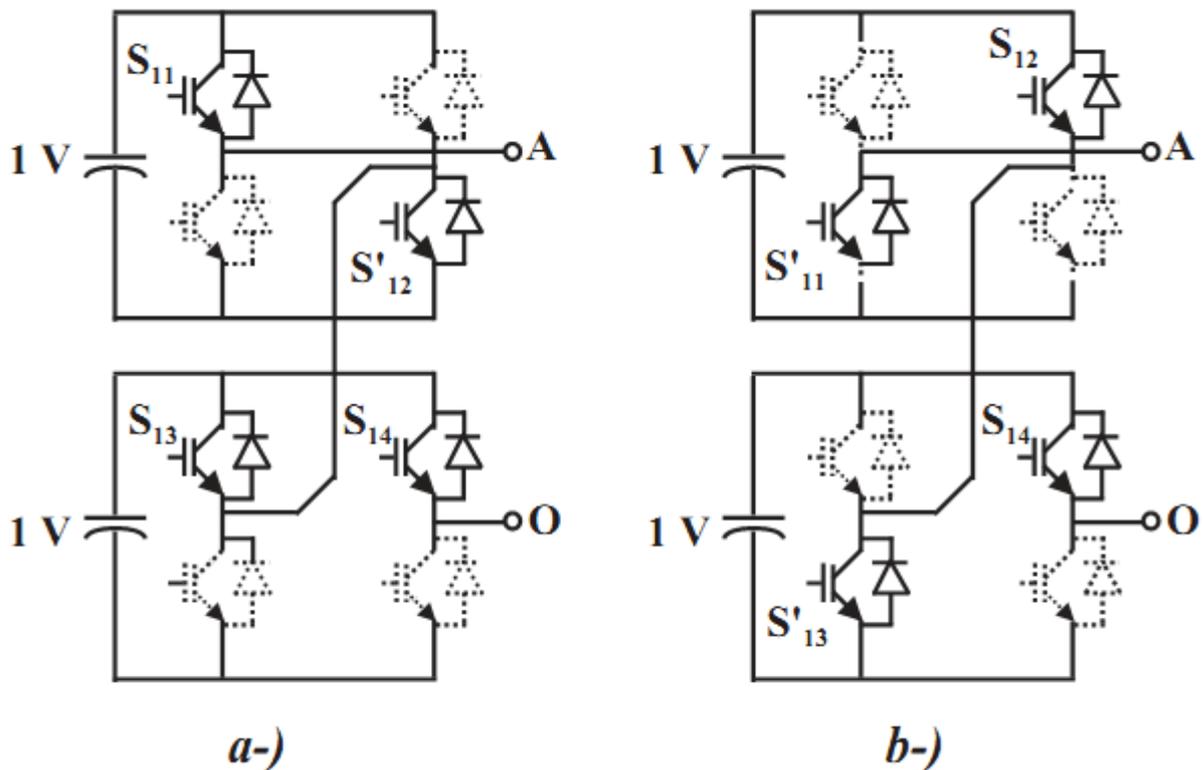


Figure II.9: Mise en série de deux onduleurs monophasés par phase : exemples de possibilités de commutation a-) $V_{AO} = +1V$, b-) $V_{AO} = 0V$

Les multiples possibilités permettant de générer la même tension à la sortie de chaque cellule peuvent être exploitées afin d'optimiser les performances du convertisseur (élimination des harmoniques, réduction des pertes par commutation ou par conduction) . Cette topologie présente plusieurs avantages, parmi lesquels :

- La modularité de sa structure permet facilement son extension à un nombre élevé de cellules sur chaque phase, sans complexité supplémentaire ;
- L'équilibrage naturel des tensions est réalisé, si bien que la commande des interrupteurs en devient aisée;
- Les interrupteurs supportent la même tension de blocage ;

- Il devient possible d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension (par exemple dans le cas d'une énergie éolienne).

Dans des applications comme l'alimentation des véhicules électriques, ou les applications de petite puissance, les tensions continues sont disponibles (piles à combustibles, batteries, cellules photovoltaïques...). Par contre dans d'autres applications mobiles (comme dans la traction ferroviaire, et dans la propulsion maritime), la nécessité de disposer d'autant de sources de tensions isolées que de cellules partielles rend cette topologie volumineuse et coûteuse.

Dans des applications industrielles comme l'alimentation des compresseurs de forte puissance (plusieurs dizaines de mégawatts) pour le pompage du pétrole et du gaz par exemple, le réseau d'alimentation est souvent à tension élevée (33 KV, 270 KV...). La présence d'un transformateur basse fréquence devient quasiment incontournable, pour adapter la tension du réseau à celle des machines (généralement 3.3 KV ou 6.6 KV), compte tenu de la limitation en tension de blocage des semi-conducteurs actuels. Le transformateur dans ce cas, facilite l'obtention des sources de tensions galvaniquement isolées. Son encombrement, son coût et sa maintenance (notamment le refroidissement) ne posent forcément plus un problème, puisqu'il s'agit là d'une application immobile.

Dans les applications triphasées, si la stratégie de commande n'est pas convenablement choisie, on pourrait générer des tensions de mode commun qui pourraient être prohibitives éventuellement pour la charge, mais aussi pour le convertisseur et son alimentation.

II.4 Autres topologies :

Outre les trois topologies de base discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi-niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

- a) Le convertisseur asymétrique hybride,
- b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement,
- c) Le convertisseur avec des topologies multi-niveaux en cascade,
- d) Le convertisseur avec commutation douce,
- e) Les convertisseurs reliés par transformateur,

- f) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC,
- g) Le convertisseur New Diode-Clamped : autre variante de l'onduleur NPC,
- h) Le convertisseur multi-niveaux généralisé . [DIA 12] .

III.5 Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multi-niveaux

On peut trouver dans la littérature des descriptions intéressantes des trois topologies de base, avec leurs avantages et inconvénients, comme celle offerte par Lai et Peng dans ou par Shakwek et Lewis dans. Le tableau 3.1 montre, de manière résumée, les principales caractéristiques des trois topologies multi-niveaux de base pour un convertisseur de m niveaux. La sélection de la topologie multi-niveaux la plus adéquate pour chaque application n'est pas évidente, jusqu'à présent c'est un défi non résolu dans la littérature.

	considère les trois topologies les plus connues .		
Configuration	potentiel distribué (NPC)	A cellules imbriquées	En cascade (serie)
Dispositif principaux de commutation	2 (m-1)	2 (m-1)	2 (m-1)
Diode antiparallèle	2 (m-1)	2 (m-1)	2 (m-1)
Diode de bouclage	(m-1) (m-2)	0	0
Condensateur de bus continue	(m-1)	(m-1)	(m-1)/2
Condensateur d'équilibrage	0	(m-1) (m-2) / 2	0
Total	$m^3 + 2m - 3$	$(m^3 + 8m - 8)/2$	$(9/2) (m-1)$

Tableau.II.1 : Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs Multi-niveaux

Du point de vue du nombre de composants, l'onduleur en cascade paraît être la solution multi-niveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. Dans la suite de notre étude, on utilisera cette topologie.

II.6 Synthèse des stratégies de commande des convertisseurs multi-niveaux

Les stratégies de commande des convertisseurs multi-niveaux sont une adaptation de celles appliquées aux convertisseurs deux niveaux. Dans cette section, nous présentons quelques une d'entre elles.

II.6.1 Commande par paliers ou par gradins [MAR 02]

Dans des applications où l'amplitude et la fréquence de la tension sont relativement fixes, on a pas forcément besoin d'une tension modulée. Dans ce cas, l'onde fondamentale est suffisante pour la génération d'une tension dont la distorsion harmonique est faible.

La méthode de commande par paliers consiste à quantifier cette grandeur de référence (image désirée du fondamental), en un nombre déterminé de paliers, comme l'illustre la Egre.II.8. Cette méthode de commande offre deux degrés de liberté à l'utilisateur :

- Le convertisseur peut être à pas uniforme, dans ce cas $E_1 = E_2 \dots = E$. Les p angles de commutations sur une période ($i = 1..p/2$) peuvent donc être choisis de façon à atteindre certaines performances.
- Le pas de la tension et les angles de commutation peuvent être choisis aEn de pouvoir obtenir la minimisation du taux de distorsion harmonique, la suppression de certaines harmoniques basse fréquence entre autres.

Cette commande est facile à implémenter, et se prête le mieux lorsqu'une analyse simplifiée de la tension à la sortie du convertisseur est nécessaire à la compréhension du système dans lequel est inséré le convertisseur. Les angles de commutation, pour passer d'un niveau à l'autre, peuvent être déterminer à l'avance.

Lorsqu'elle est appliquée à la commande d'un convertisseur multi-niveau avec mise en série d'onduleurs monophasés, on constate que les différentes cellules n'ont pas une même durée de conduction. Il en résulte donc un déséquilibre dans la répartition des pertes par commutation et par conduction. Par une rotation adéquate des commutations, ces pertes peuvent être équilibrées entre les différentes cellules, sans modification de l'onde de tension générée à la sortie du convertisseur.

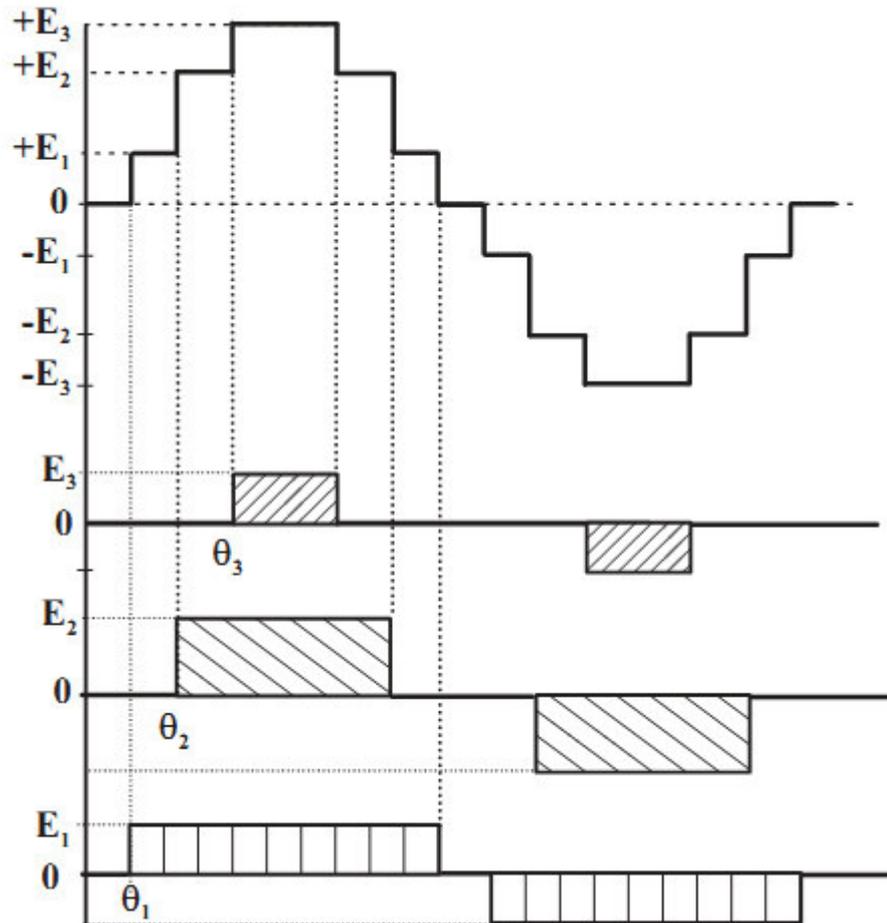


Figure II.10 : Forme d'onde multi-niveau (7 niveaux) générée par une commande par paliers et tensions aux bornes de trois cellules en série sur une phase [MAR 02]

II.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsions [MAN 04]

Commande d'un convertisseur deux niveaux

Pour commuter entre deux niveaux de tension (U_1 et U_2 tels que $U_1 < U_2$), on applique au convertisseur à des instants bien précis, des signaux de commande issus de la comparaison entre un signal de référence U_{ref} et une porteuse U_{por} . Ces instants de commutation correspondent aux instants d'intersection entre ces deux signaux.

Si la référence est inférieure à la porteuse, la tension à la sortie du convertisseur vaut U_1 , si non elle vaut U_2 . Le train d'impulsions successives ainsi formé correspond au signal de sortie modulé en largeur, comme l'illustre la Figure II.9.

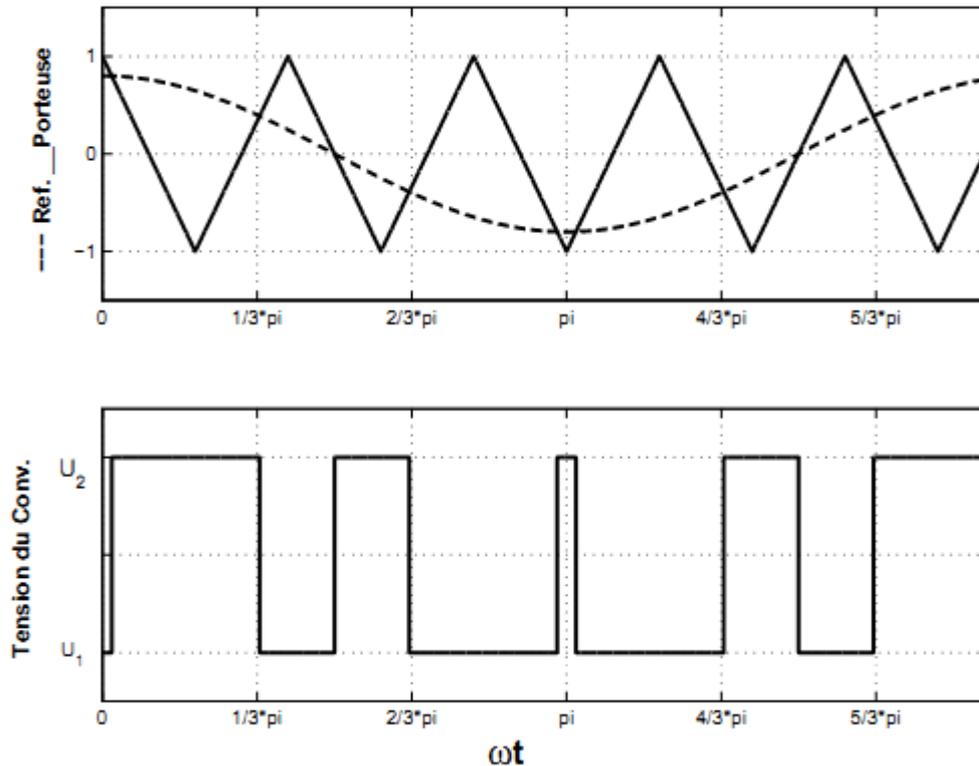


Figure II.11 : Modulation à largeur d'impulsion appliquée à un convertisseur deux niveaux [MAN 04].

II.7 Les avantages de multi-niveaux :

Convertisseurs multi-niveaux présentent de grands avantages par rapport aux classiques et très connu à deux niveaux convertisseurs [ROD 02]. Ces avantages sont fondamentalement axés sur l'amélioration de la qualité du signal de sortie et une augmentation de la puissance nominale du convertisseur. Afin de montrer l'amélioration de la qualité des tensions de sortie d'un convertisseur multi-niveaux, la tension de sortie d'un monophasé à deux niveaux convertisseur est comparé à trois et de neuf au niveau des formes d'onde de tension à plusieurs niveaux dans la figure II.10. Le pouvoir convertir-tension de sortie et améliore la qualité que le nombre de niveaux augmente réduire la distorsion harmonique totale (THD) des formes d'onde de sortie . [LEO 08]

Ces propriétés font de convertisseurs multi-niveaux très attrayant pour l'industrie et, de nos jours, les chercheurs du monde entier passent de grands efforts qui tentent d'améliorer les performances du convertisseur multi-niveaux telles que la simplification de commande , et la performance des algorithmes d'optimisation différents abordera également la améliorer le

THD des signaux de sortie , l'équilibrage de la tension de condensateur DC , et l'ondulation des courants. [MAR 92]

par exemple, de nos jours, les chercheurs se concentrent sur l'élimination des harmoniques à l'aide précalculées fonctions de commutation , atténuation des harmoniques de remplir les codes de réseau spécifiques , le développement de nouvelles topologies de convertisseur multi-niveaux (hybride ou nouveaux) ,et de contrôle de nouvelle stratégies.

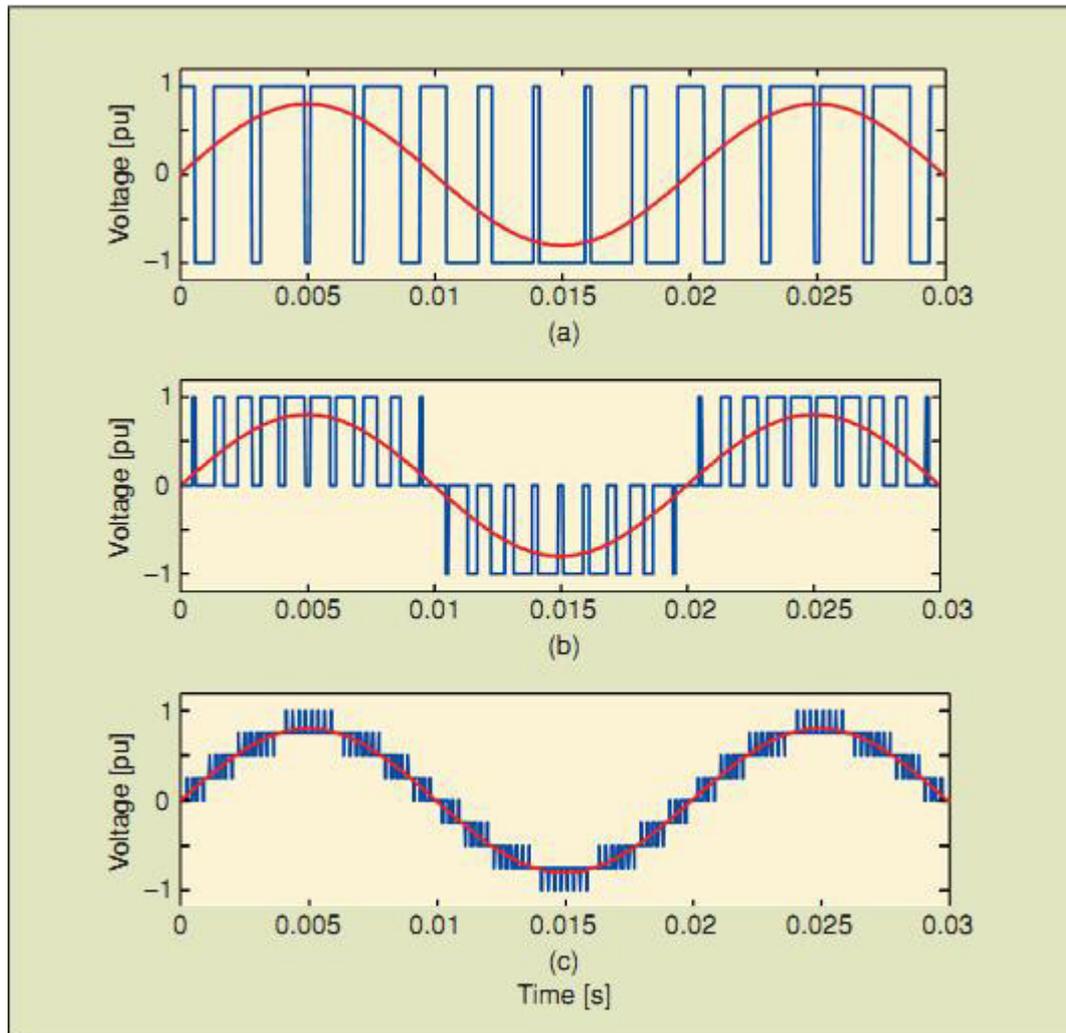


Figure II.12 : Comparaison de la phase de sortie formes d'ondes de tension: (a) onduleur à deux niveaux, (b) onduleur à trois niveaux, et (c) onduleur neuf niveaux. [LEO 08]

II.8 Quelques possibilités d'application :

Convertisseurs multi-niveaux sont considérées aujourd'hui comme une solution très attractive pour les applications moyenne tension de forte puissance. En fait, plusieurs grands fabricants commercialisent des NPC, FC ou CHB topologies avec une grande variété de méthodes de contrôle, chacun dépendant fortement de l'application. En particulier, l'APN a

trouvé un marché important pour des applications plus classiques de haute puissance moteur AC comme les convoyeurs, pompes, fans, et des usines, entre autres, qui offrent des solutions pour les industries y compris le pétrole et le gaz, les métaux, l'énergie, les mines, l'eau, marin, et de la chimie

Les convertisseurs multi-niveaux étaient destinés à la base à résoudre certains problèmes posés par l'utilisation des convertisseurs à deux niveaux de tension, monophasés ou triphasés. Ils sont donc utilisés pour le réglage de la fréquence et de l'amplitude de la tension, mais aussi pour le transfert d'énergie entre une ou plusieurs sources d'alimentation à courant continu ou alternatif et une charge à courant alternatif monophasé ou triphasé. Cette utilisation ouvre plusieurs opportunités d'applications, dont quelques-unes sont citées dans cette section. [LEO 08]

II.8.1 Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine :

Dans la traction ferroviaire par exemple, certains réseaux de transport européens fournissent une alimentation de 15 KV, 16 2/3 Hz. On y utilise un transformateur afin d'adapter cette tension aux convertisseurs statiques qui y sont utilisés.

Dans une locomotive typique de 28 tonnes par exemple, le poids du transformateur représente 8 à 12 tonnes, avec un rendement de 85% à pleine charge, avec 5.5 à 7% de pertes. Le convertisseur représente 2 à 4% de pertes et le moteur 4 à 5%.

A la figure II .11, nous avons représenté un exemple de connexion des convertisseurs multi-niveaux à la caténaire. Ils offrent plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Une connexion directe de la locomotive au réseau haute tension, en utilisant des modules à basse tension. Le transformateur basse fréquence est éliminé, et l'isolation galvanique est assurée par le transformateur moyenne fréquence du convertisseur continu-continu (figure II.11-a).
- Le système est modulaire, donc facilement extensible à un nombre différent de cellules, ce qui permet sa reconfigurabilité en fonction de la ligne sur laquelle la locomotive sera exploitée.
- Ce genre de système possède un meilleur rendement par rapport à un système avec transformateur.

Dans les véhicules tout électriques, l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux est également possible. L'exploitation de la topologie basée sur la mise en série d'onduleurs

partiels, devient relativement aisée, puisque chaque onduleur est alimenté par une batterie de 48v, assurant ainsi l'isolation galvanique requise entre toutes les sources. [MAN 04]

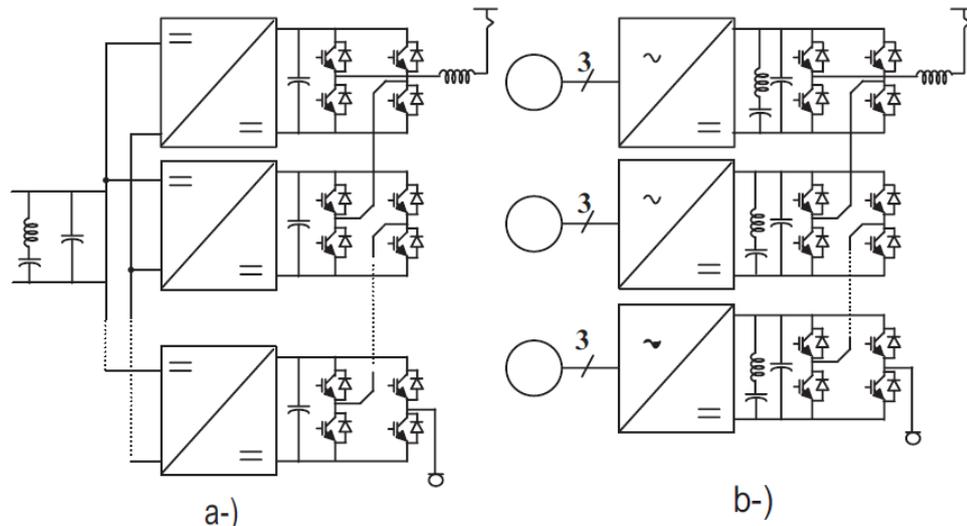


Figure II.13: Convertisseurs multi-niveaux dans la traction ferroviaire

II.8.2 Application dans le domaine des réseaux électriques :

Parce qu'ils peuvent fournir une moyenne ou une haute tension, les convertisseurs multi-niveaux sont aussi adaptés pour l'amélioration de la qualité de la tension des réseaux électriques.

Notamment sur les lignes de transmission de longue distance, il est souvent nécessaire de compenser la puissance réactive. Lorsqu'ils sont contrôlés de façon adéquate, les convertisseurs multi-niveaux offrent dans ce cas, la possibilité de régler l'amplitude de la tension et son déphasage, mais aussi l'impédance de la ligne de transmission. Ils peuvent donc jouer le rôle de compensateurs statiques. [MAN 04]

II.8.3 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques :

Dans les applications industrielles, les machines électriques de moyennes et fortes puissances nécessitent une alimentation à moyenne tension. L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux dans ce cas est aussi mieux adaptée. Dans de tels systèmes, les semi-conducteurs n'y supportent qu'une faible tension, par rapport à celle exigée par la machine. La qualité de la tension en termes d'harmonique est meilleure, réduisant ainsi les effets néfastes sur la durée de vie de la machine et celle du réseau éventuel qui l'alimente. En plus à

partir de cellules de petite tension (comme des batteries, des piles à combustible ou des cellules photovoltaïques), il devient possible d'alimenter une machine à moyenne tension.

[MAN 04]

I.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré qu'il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application bien déterminé.

Nous avons montré aussi les différentes structures de base d'onduleurs multi-niveaux.

Par ailleurs nous avons cité les avantages et les inconvénients de chaque structure d'onduleurs.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'ensemble pile à combustible avec le convertisseur.

Chapitre III

Modélisation et simulation de l'ensemble : PAC + Convertisseur

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter dans la première partie, la modélisation de notre système en se commence avec la modalisation de la pile type PEM ainsi qu'une démarche de simplification du modèle PEM pour pouvoir réaliser la simulation complète, ensuite en présente le modèle de convertisseur utilisé, dernièrement, la structure ainsi que le modèle de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC.

Dans ce chapitre aussi, nous présentons, dans la deuxième partie la simulation et résultats de system.

III.2 Modélisation de système

Le but de toute modélisation de processus est de construire un modèle, c'est-à-dire une représentation mathématique ou comportementale de son fonctionnement. L'objectif poursuivi est la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, ou la conception d'un système automatique pour leur commande. Il existe différentes classifications de modèles en fonction de leur mode de conception ou de leur mode d'utilisation

La structure d'interfaçage retenue associe une PAC, un hacheur élévateur et un onduleur de tension.

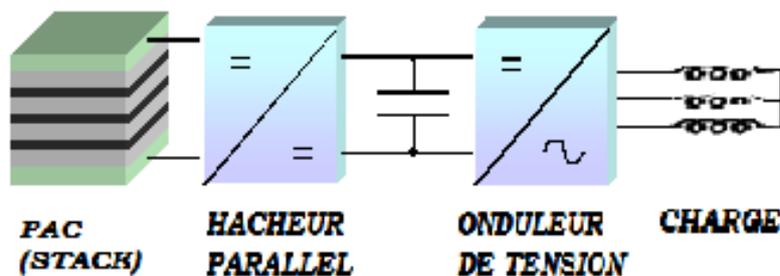


Figure.III.1 : Topologie

III.2.1 Modèle de pile PEM

De nombreux travaux comme par exemple [THO 05] et [SAD 04], proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (figure III.2) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} (ou

chute d'activation de la région 1), la surtension ohmique V_{ohm} (ou chute ohmique de la région 2) et la surtension de concentration V_{conc} (ou chute de concentration de la région 3) :

$$V_{FC} = E_0 - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \tag{III.1}$$

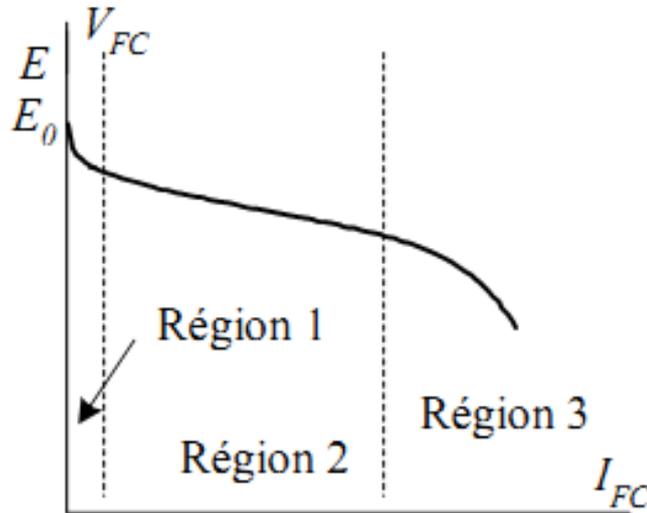


Figure.III.2 : Caractéristique statique de pile PEM.

III.2.1.1 Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$\eta_{act} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_{FC} + i_0}{i_0} \right) \tag{III.2}$$

où i_{FC} est le courant délivré par la pile à combustible, i_0 le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte, i_n le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et la pente de la droite de Tafel.

III.2.1.2 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'oppose les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_{ohm} i + R_{ohm} i^2 \tag{III.3}$$

III.2.1.3 Pertes de concentration

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz.

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse :

$$V_{conc} = -B \ln \left(\frac{i_L - i}{i_L} \right) - \frac{B}{i_L} i \tag{III.4}$$

III.2.2 hacheur parallèle

Le hacheur élévateur non réversible en courant (hacheur parallèle ou « boost chopper ») permet de réaliser l'adaptation de tension entre la tension de PAC ($v_{PAC} = 200 \times v_{PAC_{cell}}$) et le bus continu V_0 .

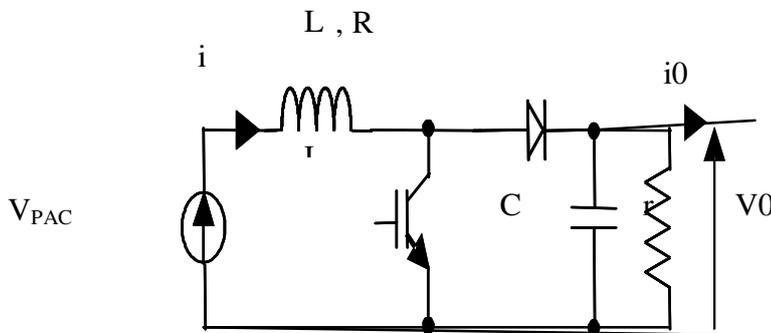


Figure.III.3 : Circuit électrique du hacheur élévateur

Le modèle topologique ou instantané du hacheur est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = \underbrace{v_{PAC} - Ri}_{PAC} - V_0 \cdot (1 - u) \\ C \frac{dV_0}{dt} = i \cdot (1 - u) - \frac{V_0}{r} - i_0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

La fonction de commutation notée u vaut soit 0, quand l'interrupteur est commandé à l'ouverture, soit 1 quand l'interrupteur est commandé à la fermeture. Le modèle moyen du hacheur est obtenu en remplaçant la variable u par le rapport cyclique u , qui prend une valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$.

Le contrôle du courant peut être effectué grâce à un correcteur de type hystérésis. La largeur de bande de ce dernier (4A) et la valeur de l'inductance L (0.00587H) ont été choisies de manière à ce que la fréquence maximale de commutation de l'interrupteur (technologie IGBT) ne dépasse pas 4kHz. Quant à la valeur du condensateur C (0.00049F), elle est choisie de manière à ce que l'ondulation de la tension sur le bus continu ne soit pas trop importante. Une tension de bus V_0 doit être choisie de façon à assurer une poursuite idéale des courants de référence au niveau de l'onduleur. On peut choisir $V_0 = 380$ V.

Le contrôle du courant peut également être effectué grâce à un correcteur PI associé à une MLI (modulation de la largeur d'impulsion). Les coefficients du PI peuvent être déterminés par la méthode de la compensation de pôle .

III.2.3 Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC

III.2.3.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

La structure choisie dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. Plusieurs études sont faites sur les onduleurs à deux niveaux, aussi bien du point de vue modélisation que stratégie de commande. On va essayer surtout d'approfondir les parties concernant les onduleurs multi-niveaux. Et plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à trois niveaux. Nous avons choisi d'étudier la structure NPC

(Neutral Point Clamping), cet onduleur est dit à trois niveaux parce qu'il délivre trois niveaux de tension (+ U_c , 0, - U_c). Cette structure est présentée à la figure (III.4)

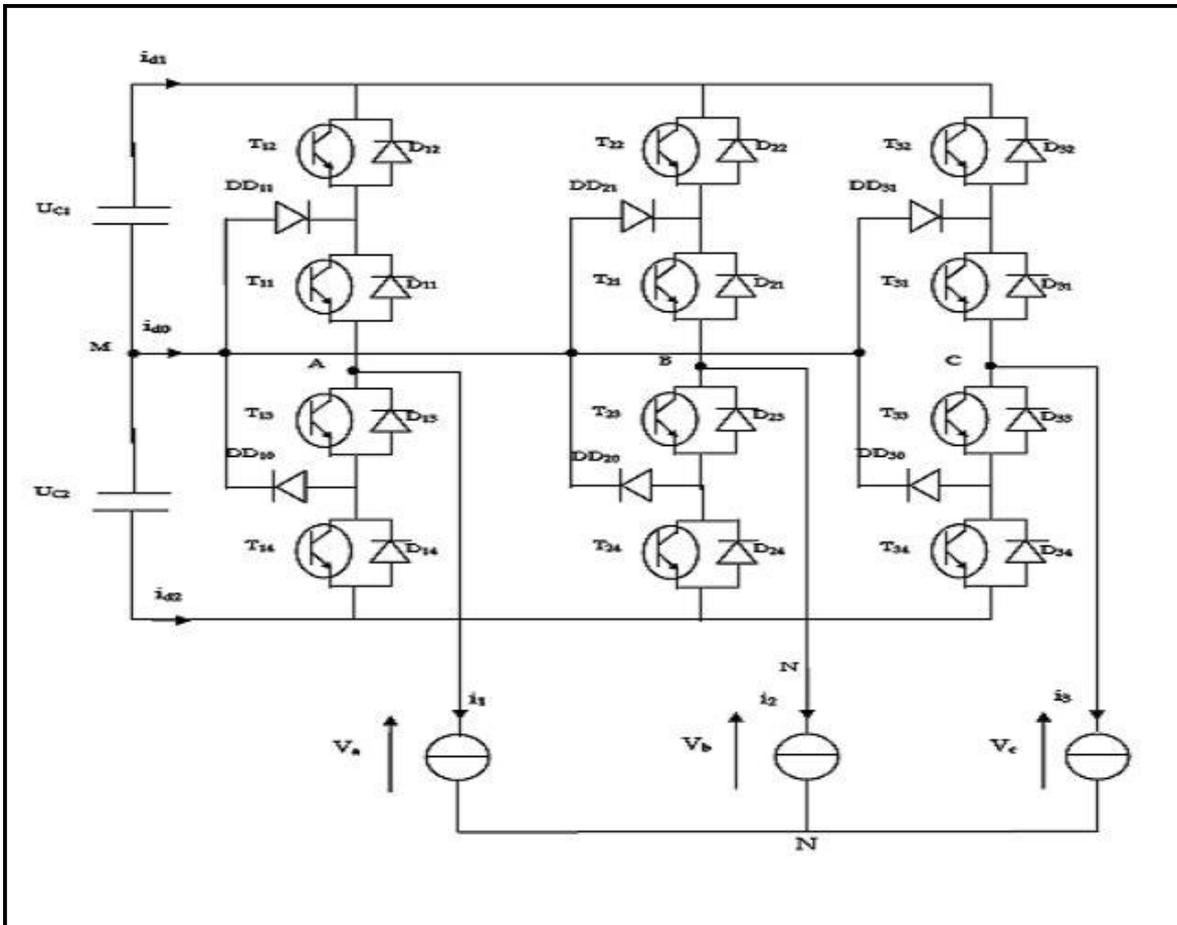


Figure.III.4: Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

III.2.3.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux

L'onduleur à trois niveaux a une structure symétrique. Donc on procède par bras (figure III.4), ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras sans à priori sur la Commande

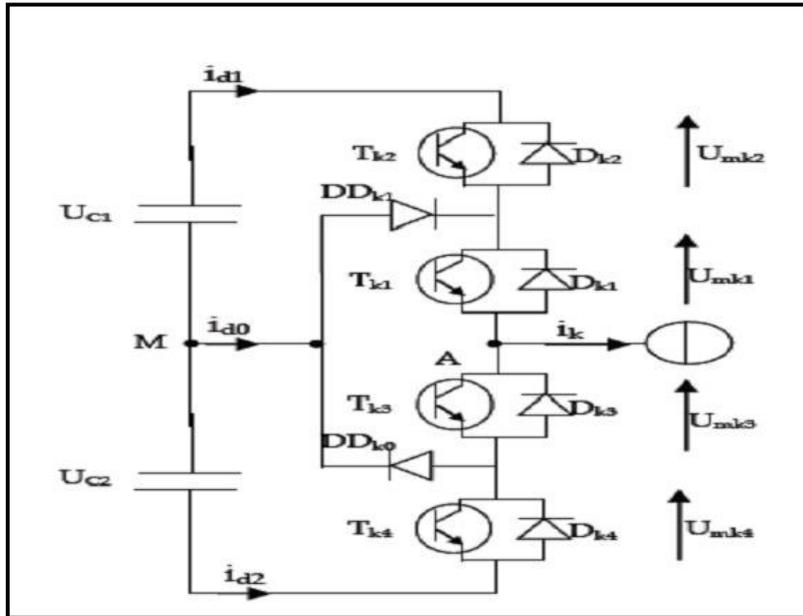


Figure.III.5 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux

III.2.3.3 Les différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux

A fin d'élaborer un modèle du fonctionnement de ces onduleurs à trois niveaux sans a priori sur la commande ; on représente chaque paire transistor diode par un seul interrupteur bidirectionnel (figure III.5) et on procède par bras (grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé) [KHA 09].

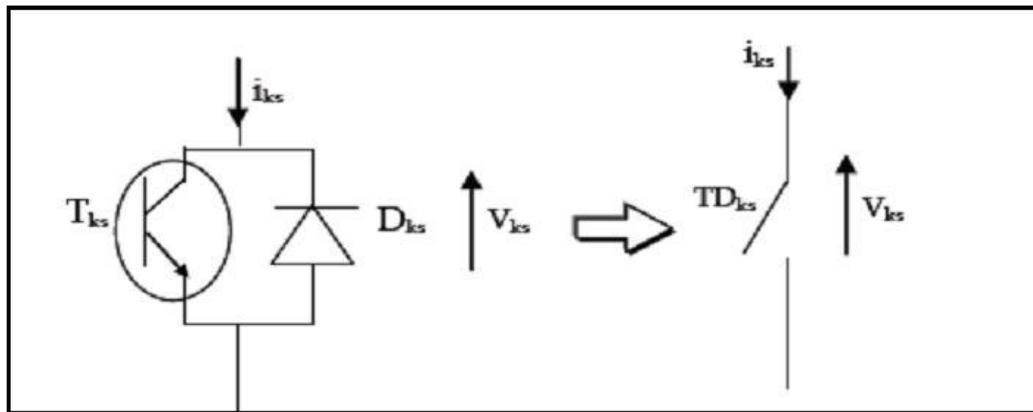


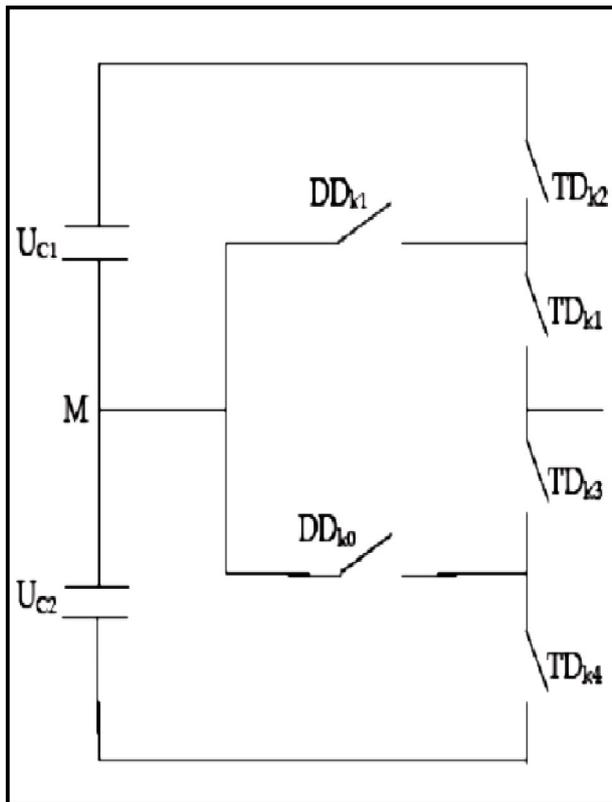
Figure.III.6 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont présentées à la figure (4.4).

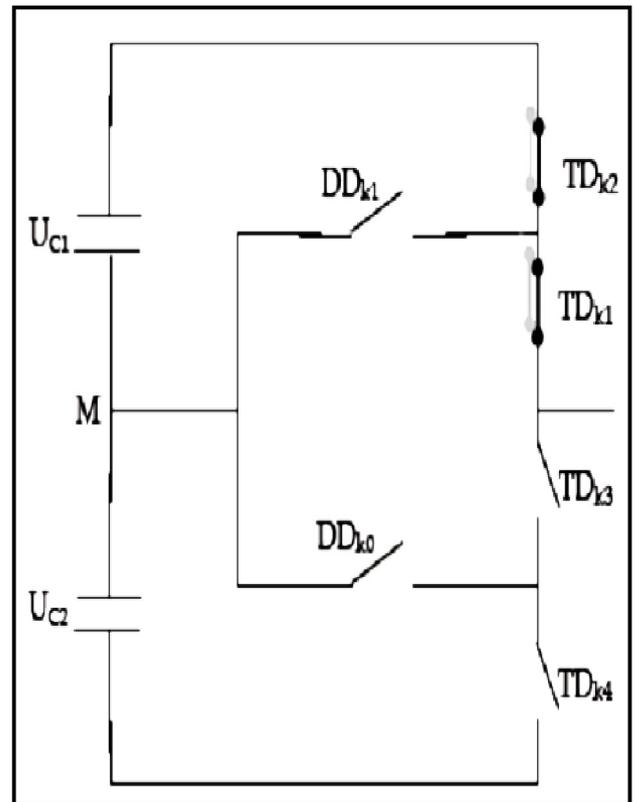
Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau III.4 (avec M origine des potentiels et V_k le potentiel du n° ud k du bras k). Pour les configurations E0 le potentiel V_k dépend de la source d'énergie alternative.

La configuration	La grandeur électrique
E0	$i_k = 0$
E1	$v_k = UC1 = UC$
E2	$v_k = 0$
E3	$v_k = -UC2 = -UC$
E4	$v_k = 0$

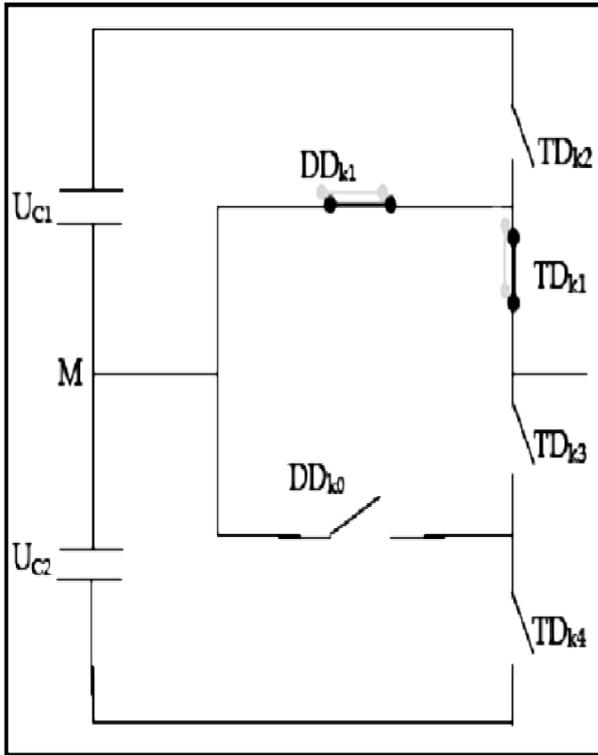
Tableau III.1: Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k.



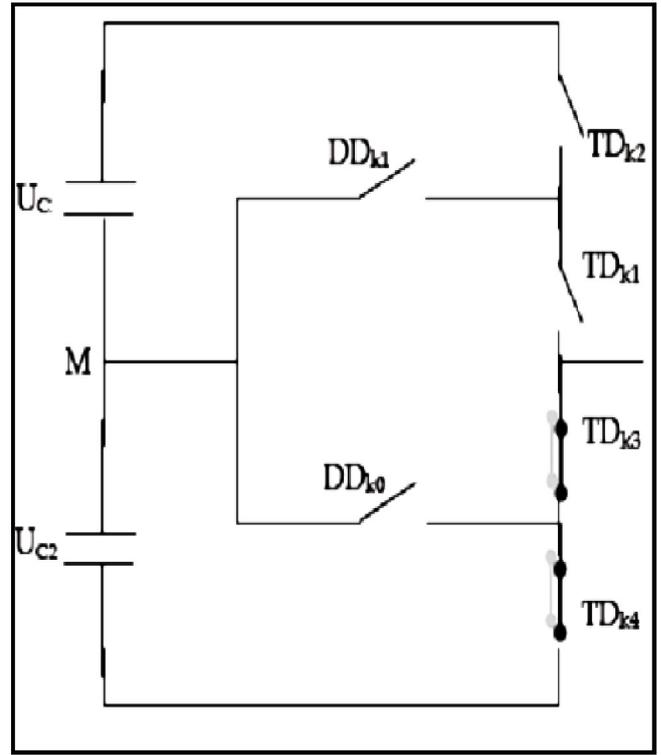
La configuration E0



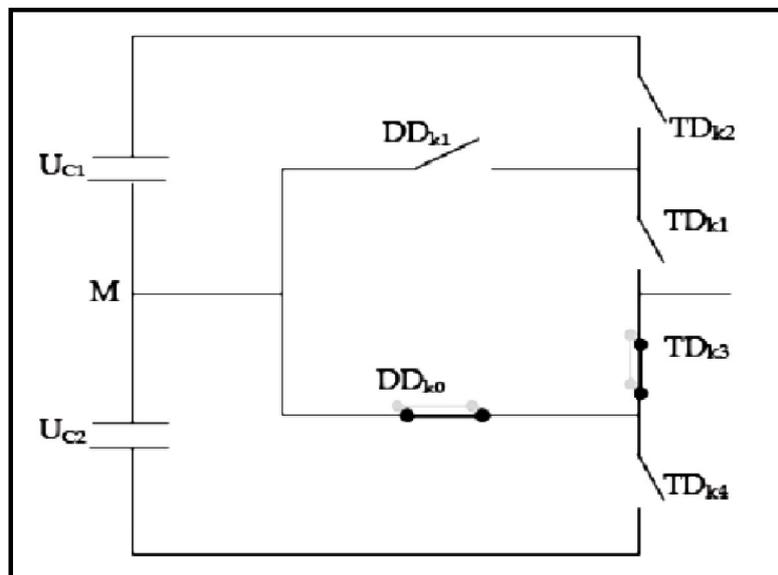
La configuration E1



La configuration E2



La configuration E3



La configuration E4

Figure.III.7 : Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux

III.2.3.4 Hypothèse

Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. En pratique, cela se traduit par le fait que, quel que soit le courant i_k , délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante $U_{C1}=U_{C2}$. La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de volts. [DIA 12]

III.2.3.5 Commande complémentaire pour l'onduleur à trois niveaux

Pour un onduleur triphasé à trois niveaux en mode commandable, et pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{aligned} B_{KS} + T_{KS} &= 1 \\ B_{KS} &= 1 - T_{KS} \end{aligned} \tag{III.6}$$

Avec B_{KS} , commande de base du transistor T_{KS} d'un bras K .

Remarque : un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe.

III.2.3.5.1 Fonction de connexion

On définit les fonctions de connexion de demi bras f_{K1} et f_{K2} comme suit

$$\begin{aligned} f_{K1} &= B_{K1} + B_{K2} \\ f_{K2} &= B_{K2} + B_{K1} \end{aligned} \tag{III.7}$$

Avec K est le numéro du bras $K=1, 2,3$; et On désigne par

1: le demi-bras de haut

0 : le demi-bras de bas

III.2.3.5.2 Modélisation aux valeurs instantanées

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée, sont donnés par le système suivant, avec $U_{c1}=U_{c2}=U_c$:

$$\begin{aligned}
 u_{22} &= u_{22} - u_{22} - u_{22} = (u_{22} - u_{22})u_{22} \\
 u_{22} &= u_{22} - u_{22} - u_{22} = (u_{22} - u_{22})u_{22} \\
 u_{22} &= u_{22} - u_{22} - u_{22} = (u_{22} - u_{22})u_{22}
 \end{aligned}
 \tag{III.8}$$

On constate d'après le système (3.3), que l'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série.

$$\begin{aligned}
 u_{22} &= u_{22} \cdot u_{22} & u_{22} &= u_{22} \cdot u_{22} & u_{22} &= u_{22} \cdot u_{22} \\
 u_{22} &= u_{22} \cdot u_{22} & u_{22} &= u_{22} \cdot u_{22} & u_{22} &= u_{22} \cdot u_{22}
 \end{aligned}
 \tag{III.9}$$

En introduisant l'expression de ces dernières dans les tensions d'entrée on aboutit à :

$$\begin{aligned}
 u_{22} &= u_{11}u_{22} - u_{10}u_{22} = (u_{11} - u_{10})u_{22} \\
 u_{22} &= u_{21}u_{22} - u_{20}u_{22} = (u_{21} - u_{20})u_{22} \\
 u_{22} &= u_{31}u_{22} - u_{30}u_{22} = (u_{31} - u_{30})u_{22}
 \end{aligned}
 \tag{III.10}$$

Les tensions composées sont données par :

$$\begin{aligned}
 u_{22} &= u_{22} - u_{22} = (u_{22}u_{22} - u_{22}u_{22})u_{22} = (u_{22}u_{22} - u_{22}u_{22})u_{22} \\
 u_{22} &= u_{22} - u_{22} = (u_{22}u_{22} - u_{22}u_{22})u_{22} = (u_{22}u_{22} - u_{22}u_{22})u_{22} \\
 u_{22} &= u_{22} - u_{22} = (u_{22}u_{22} - u_{22}u_{22})u_{22} = (u_{22}u_{22} - u_{22}u_{22})u_{22}
 \end{aligned}
 \tag{III.10}$$

III.2.3.5.3 Modèle de connaissance

En utilisant la fonction de connexion des demi-bras Fks, on obtient:

$$\begin{aligned}
 u_{22} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{22} & u_{22} \\ u_{22} & u_{22} \\ u_{22} & u_{22} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{III.11}$$

Les tensions simples sont données comme suite

$$\begin{aligned}
 u_{22} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{22} & u_{22} \\ u_{22} & u_{22} \\ u_{22} & u_{22} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

Dans le cas où $U_{c1}=U_{c2}=U_c$, la relation (3.9) s'écrit comme suit :

$$i_{d1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} i_1 - i_2 - i_3 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} i_1 - i_2 - i_3 \right) \quad (III.13)$$

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} en fonction des courants de charge i_1 i_2 i_3 sont donnés par le système ci-dessous :

$$\begin{aligned} i_{d1} &= \frac{1}{2} i_1 - i_2 - i_3 \\ i_{d2} &= \frac{1}{2} i_1 - i_2 - i_3 \end{aligned} \quad (III.13)$$

Cette relation montre une analogie du point de vue des courants d'entrée des onduleurs à trois niveaux et deux niveaux, ainsi pour l'onduleur à trois niveaux tout se passe, comme si le courant i_{d1} était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et i_{d2} celui de l'onduleur à deux niveaux du bas.

D'après la figure (II.2) et en appliquant la loi des nœuds, on aura

$$i_{d1} = i_1 + i_2 + i_3 - (i_{d1} + i_{d2}) \quad (III.14)$$

En introduisant la relation (III.13) dans l'équation (III.14) on obtient (III.15)

$$i_{d1} = \frac{1}{2} i_1 - \frac{1}{2} i_2 - \frac{1}{2} i_3 + \frac{1}{2} i_1 - \frac{1}{2} i_2 - \frac{1}{2} i_3 + \frac{1}{2} i_1 - \frac{1}{2} i_2 - \frac{1}{2} i_3 \quad (III.15)$$

D'où on aura les relations de conversion suivantes :

$$\begin{aligned} i_{d1} &= \frac{1}{2} i_1 - \frac{1}{2} i_2 - \frac{1}{2} i_3 \\ i_{d2} &= \frac{1}{2} i_1 - \frac{1}{2} i_2 - \frac{1}{2} i_3 \end{aligned} \quad (III.15)$$

Avec

$$N(t) = 0 \left[\begin{array}{ccccc} \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b - 2F_{21}^b + 2F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{array} \right] \quad (\text{III.16})$$

Remarque : un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe.

III.3 Simulation et résultats de système

III.3.1 Simulation du l'ensemble PAC + Hacheur élévateur

Dans un premier temps, on souhaite vérifier le bon fonctionnement de la pile à combustible par le fait que la PAC se doit d'être bien contrôlée via son courant de sortie implique que le Hacheur en sortie de cette dernière doit maîtriser ce courant. Le Hacheur élévateur connecté aux bornes de la PAC contrôlera la puissance fournie par celle-ci via le courant en sortie de la PAC. Le modèle topologique de courant est déjà fourni. On considère la tension en sortie du hacheur V_0 constante.

On utilise hacheur avec commande dans lequel
 $V_0 = V_{0_ref} = 380 \text{ V}$:

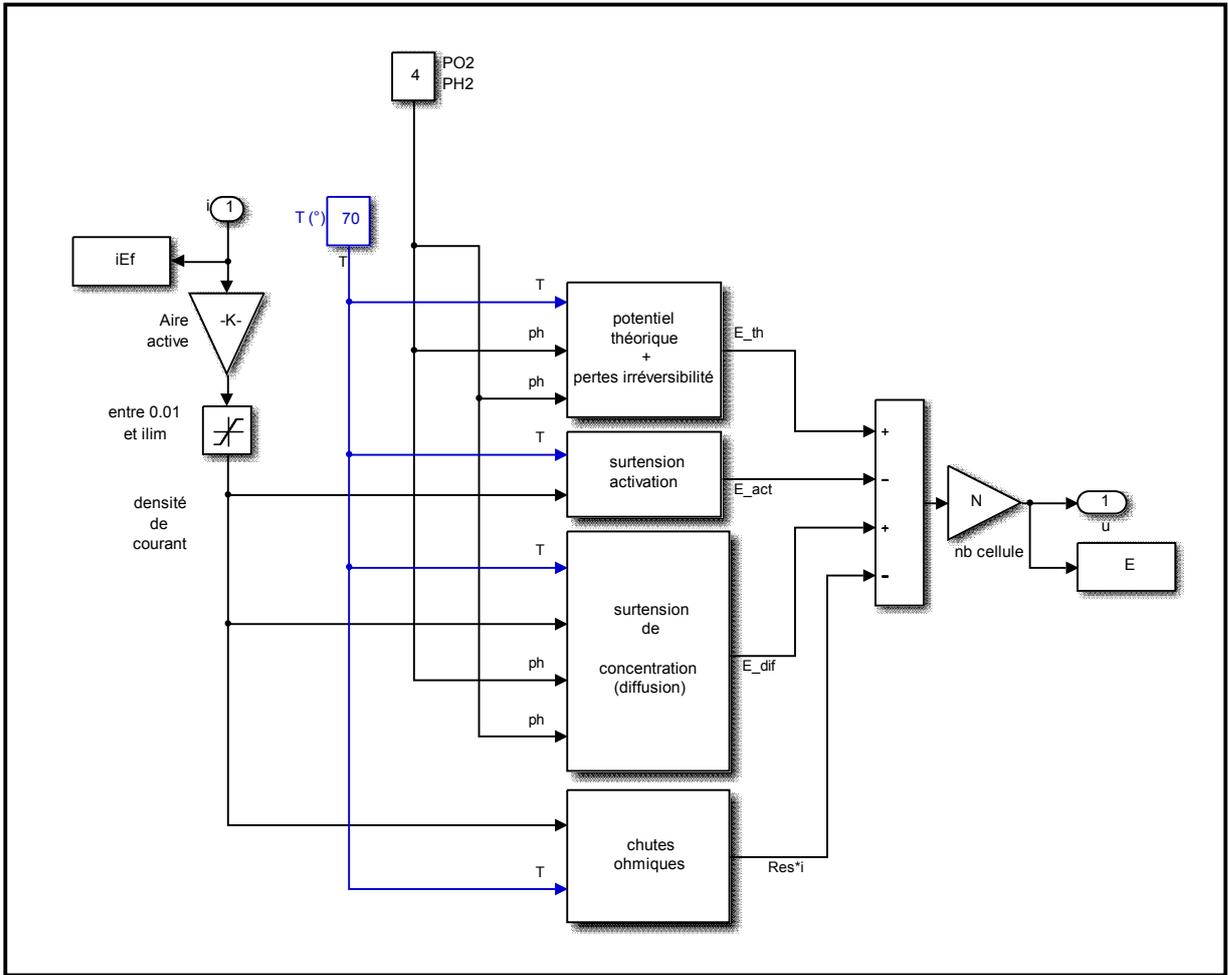


Figure.III.8 : block de simulation de la pile a combustible sous matlab

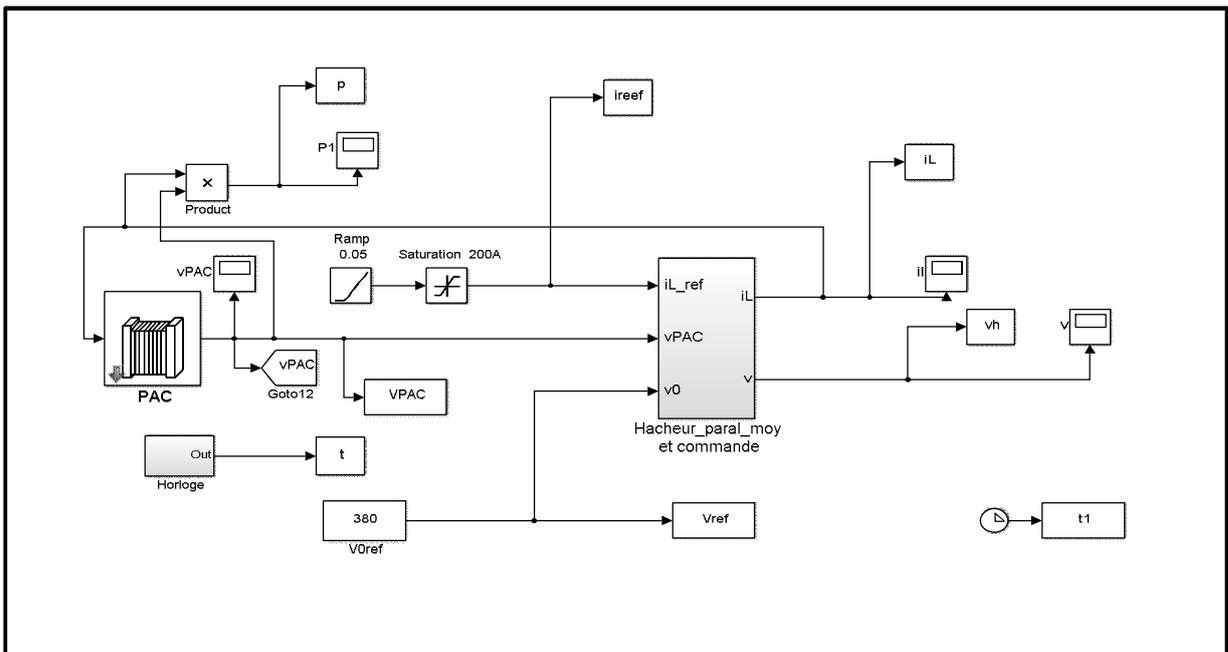


Figure.III.9 : Schéma équivalent de PAC + Hacheur élévateur

V_0 est le gain de la fonction de transfert du hacheur :

$$FT_{\frac{V_0}{u}} = \frac{V_0}{u} = \frac{V_0}{u} \dots \dots \dots (III.17)$$

L'équation de courant i_L est donnée par :

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_{pac} - V_{diode} - u_{diode} \dots \dots \dots (III.18)$$

Ensuite on injecte cette équation dans le schéma SIMULINK fournit. Voici la représentation en schéma bloc de l'équation ci-dessous

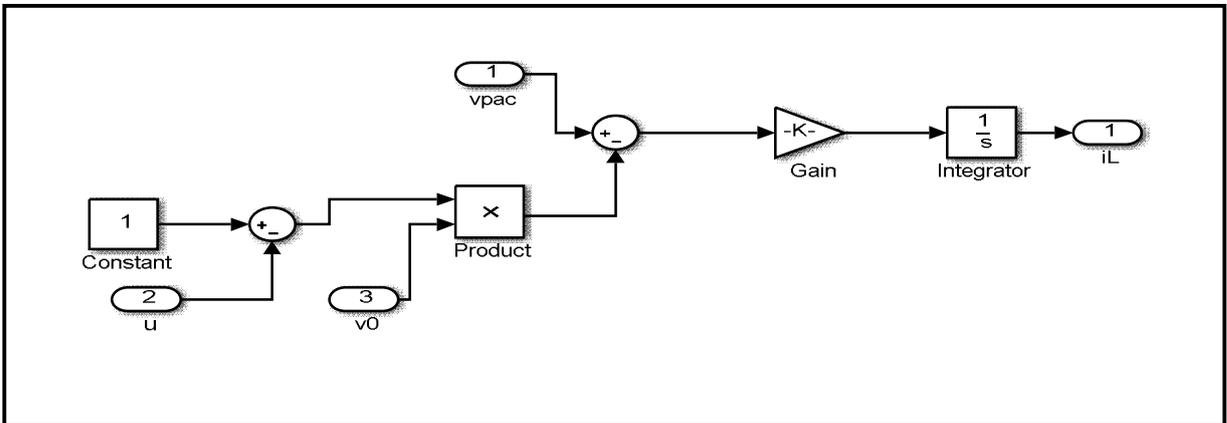


Figure.III.10 : Représentation en schéma bloc de l'équation de courant i_L .

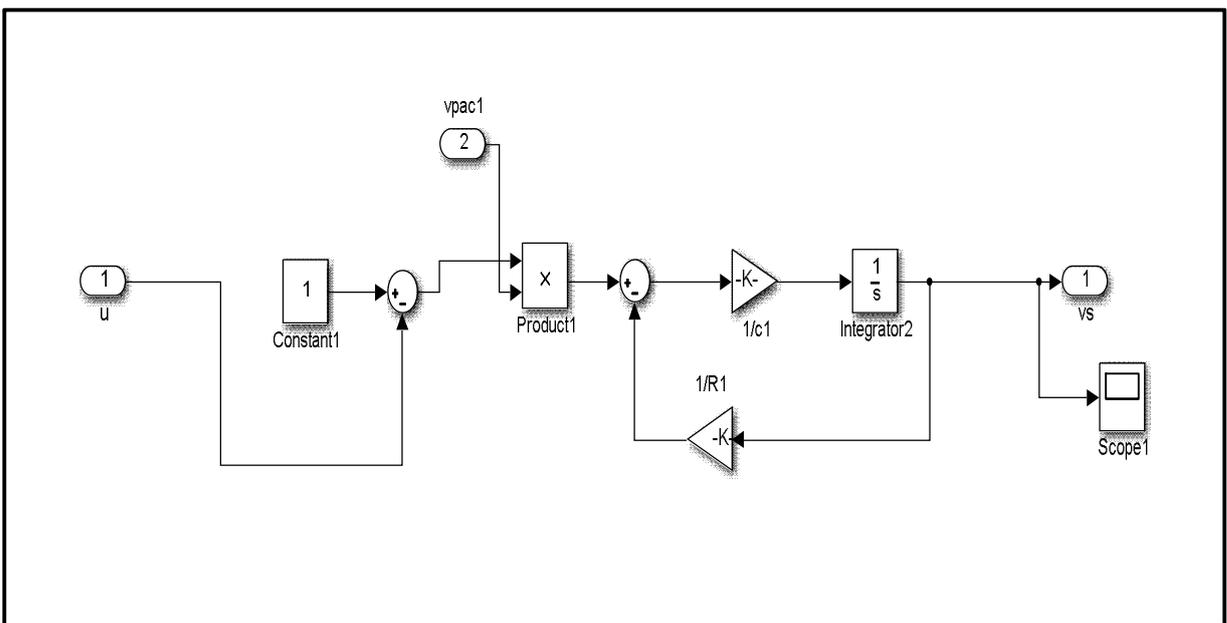


Figure.III.11 : Représentation en schéma bloc de l'équation de tension v .

Les types de régulations proposées dans ce bureau d'études pour le hacheur élévateur sont :

a) Type de commande utilise pour la régulation de courant

➤ *Correcteur Hystérésis :*

Cette type de commande fourni directement au (figure III.9)

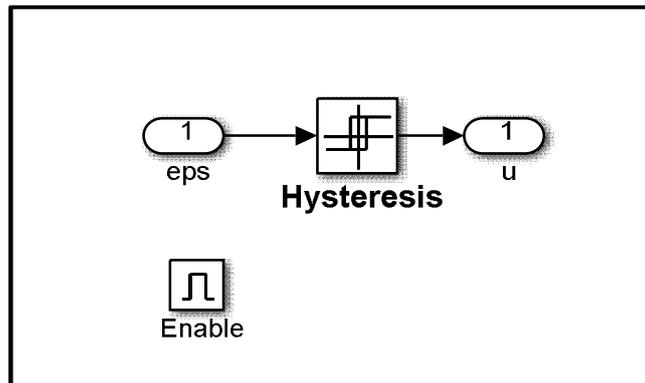


Figure .III.12 : Commande par Hystérésis

➤ *Correcteur PI :*

La commande par PI nous donne le rapport cyclique , il faut ensuite « construire » la commande u (par comparaison entre un signal triangulaire d'amplitude 1 et une constante d'amplitude), autrement c'est la fonction MLI (Figure III.10) :

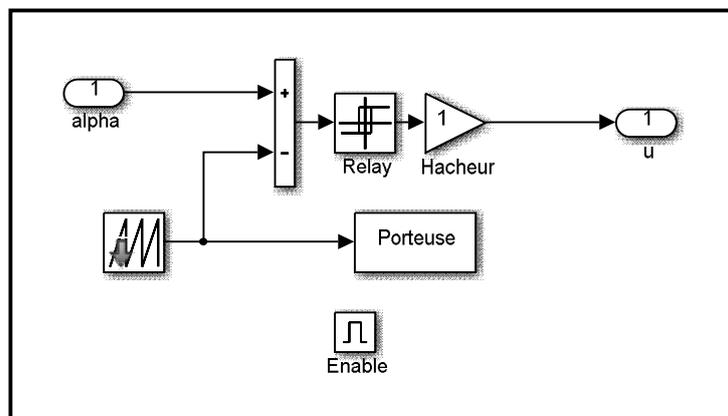


Figure.III.13 : La fonction MLI

Le réglage d'un régulateur PI peut se faire de diverses manières :

- ✓ Placement des pôles
- ✓ Réponse temporelle
- ✓ Réponse fréquentielle

Pour notre correcteur on a choisit le réglage par compensation des pôles.

L'ensemble Hacheur + commande est représenté dans la figure suivante :

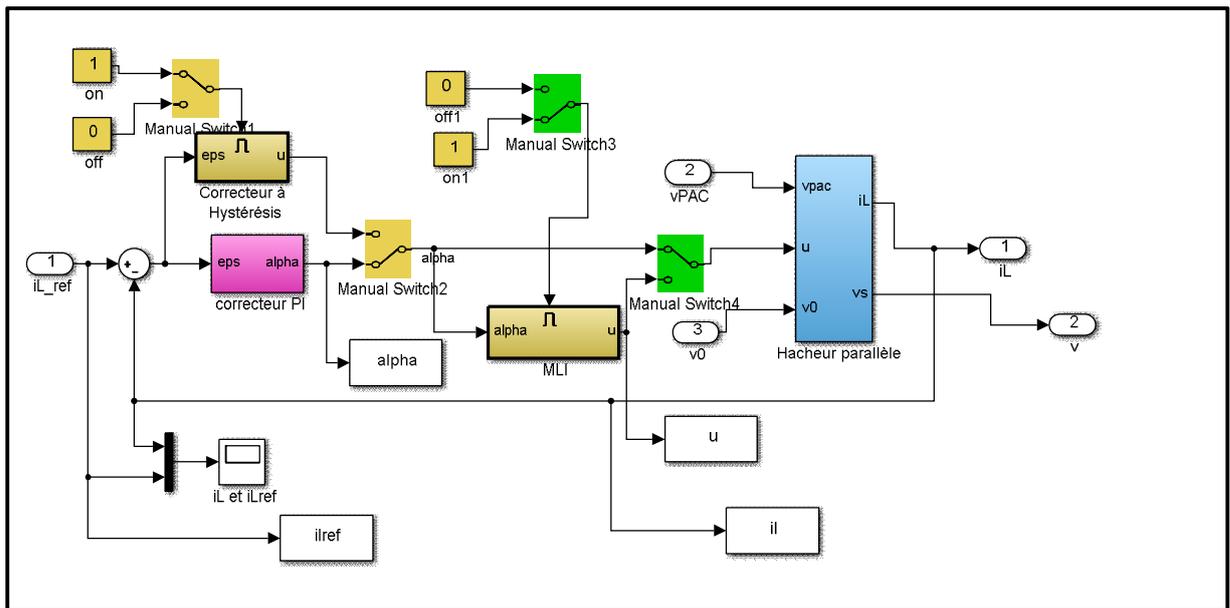


Figure.III.14 : Hacheur élévateur + commande

Pour changer le type de commande (MLI+PI ou Hystérésis) il suffit juste changer la position des switchers (en vert et jaune).

On visualise le courant i_L et sa référence i_{L_ref} :

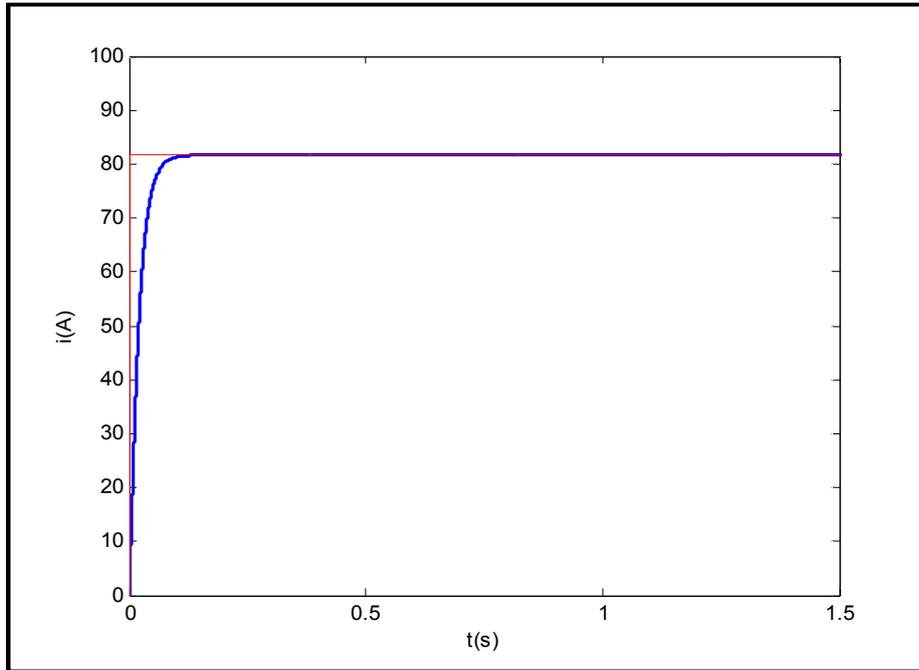


Figure.III.15 : le courant i_L et i_L ref en fonction de temps

On remarque que la réponse est celle d'un système de premier ordre, le temps de réponse de PAC est 0.1 s. La commutation ne commence que lorsque $i_L > i_{Lref}$.

On visualise aussi la tension de la sortie de e hacheur V et sa référence $Vref$:

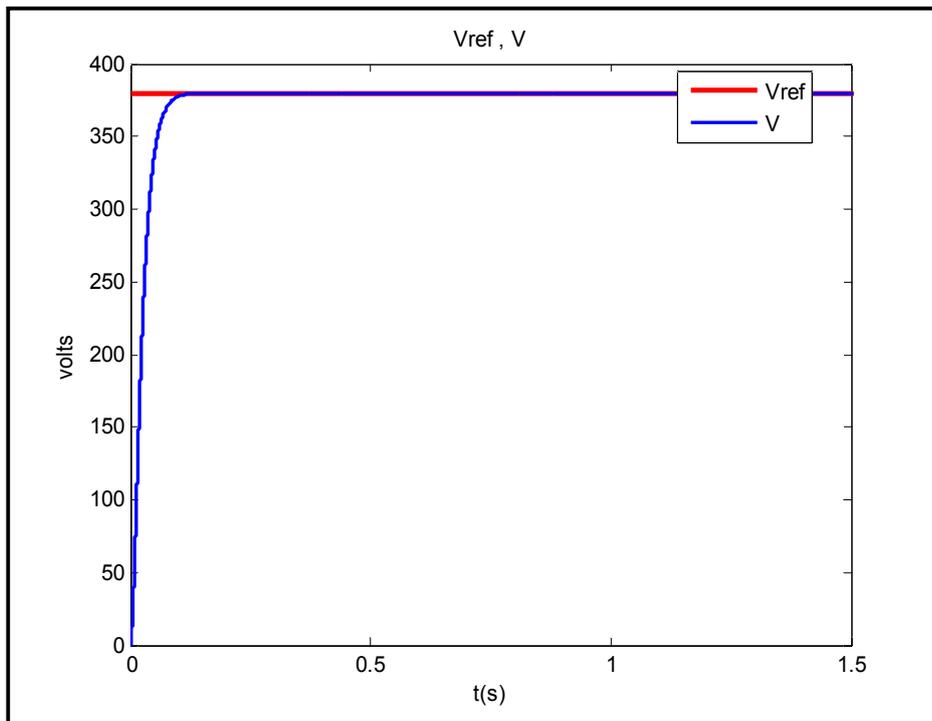


Figure.III.16 : Tension V et $Vref$

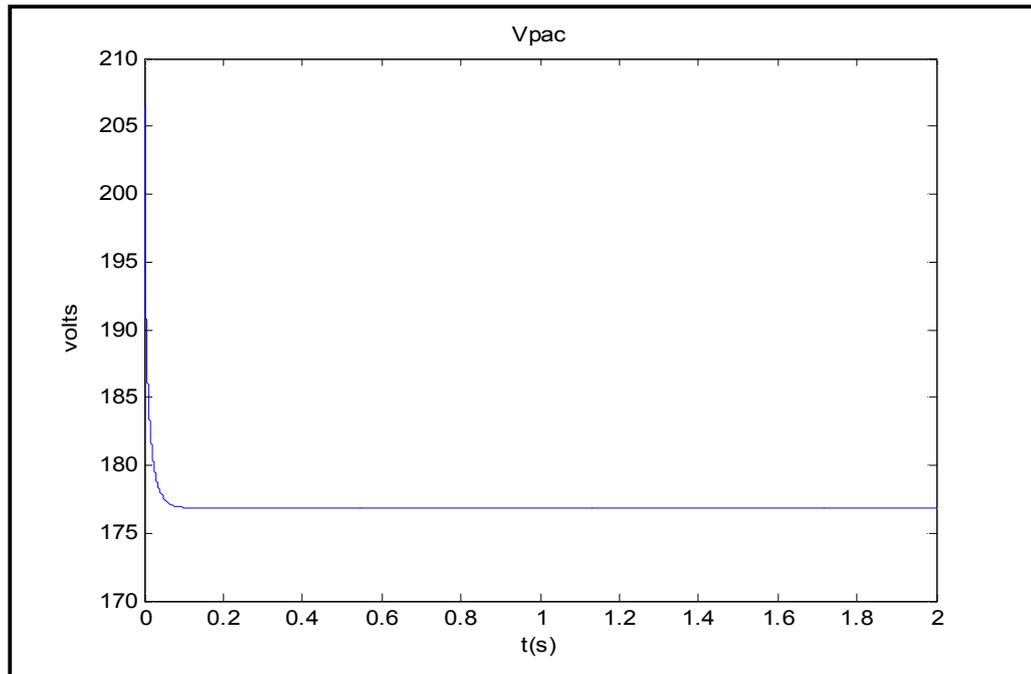


Figure.III.17 : Tension Vpac

On remarque que le temps de réponse est bien 0.1s.

Donc à partir de ces deux courbes et en régime établi : $I_{PAC} = 81 \text{ A}$, et $V_{PAC} = 176 \text{ V}$.

On calcul maintenant le point de fonctionnement de cette PAC :

La PAC utilisée comporte 200 cellules, chaque cellule admet une surface de 950 cm².

Donc :

- la densité de courant = $\frac{I_{PAC}}{S_{cell}} = \frac{81,00}{0,950} = 85,26 \text{ A/m}^2$
- La tension d'une cellule = $\frac{V_{PAC}}{N_{cell}} = \frac{176}{200} = 0,88 \text{ V}$

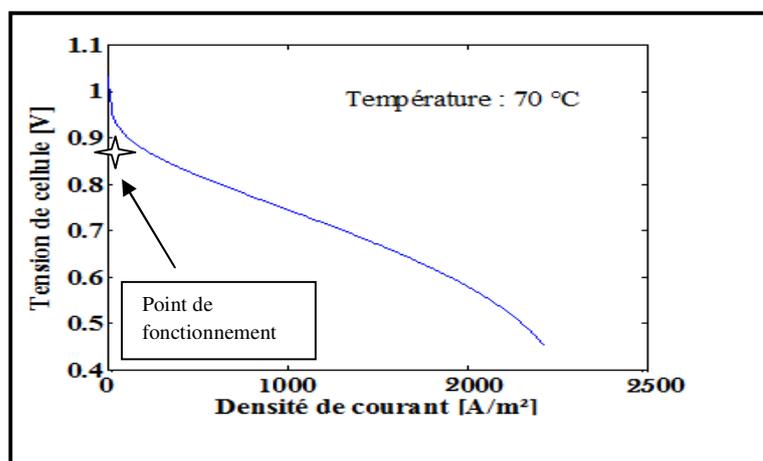


Figure.III.18 : Point de fonctionnement de la pile a combustible

III.3.2 simulation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC

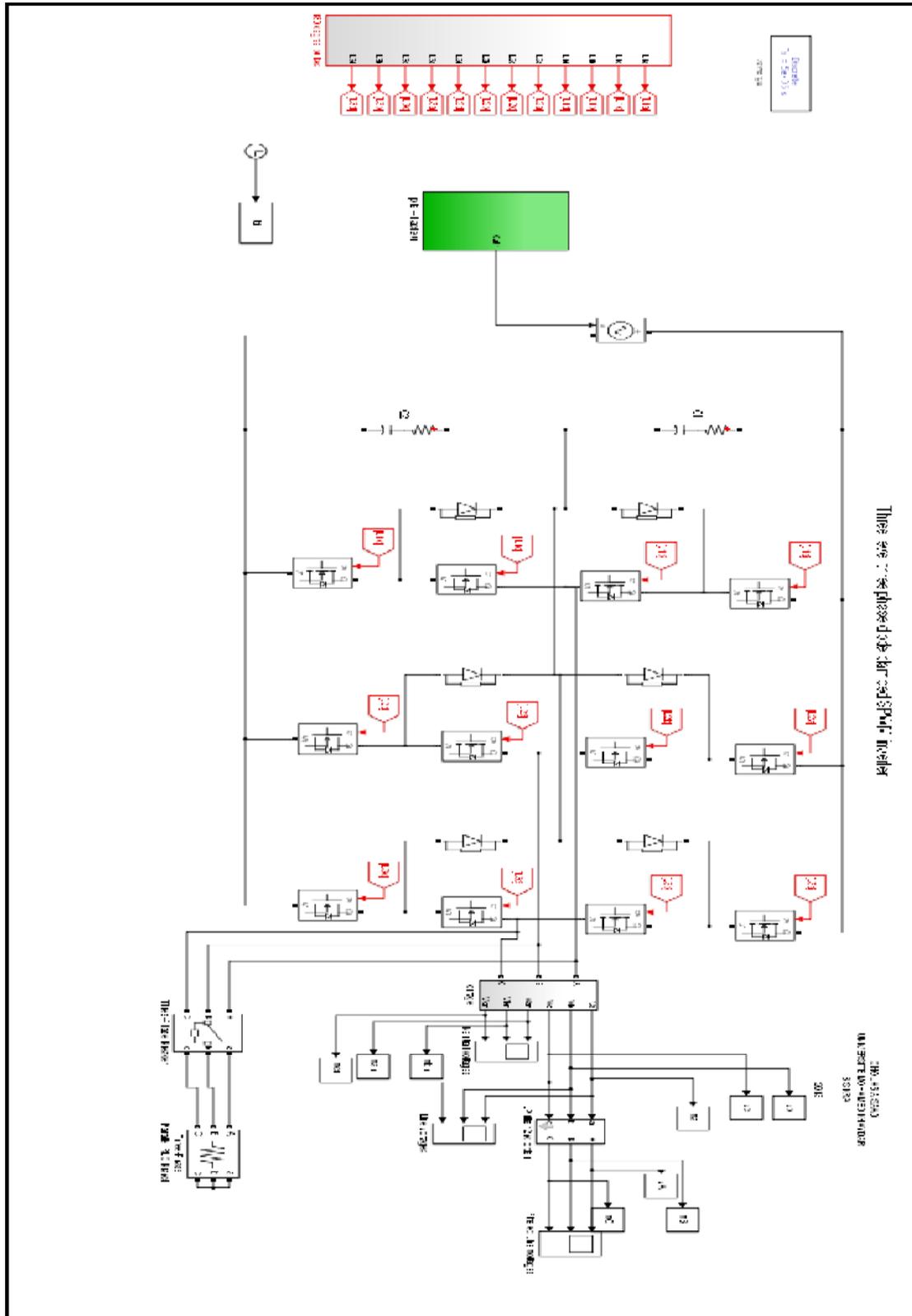


Figure.III.19 : Schéma block de la simulation de l'onduleur multiniveaux (NPC)

III.3.3 La commande d'onduleur MLI

Dans cette partie, nous élaborons la stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux qui permettent de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible qui est la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La figure (III.22) présent de signal deux porteuse décalée ($T_p/2$).

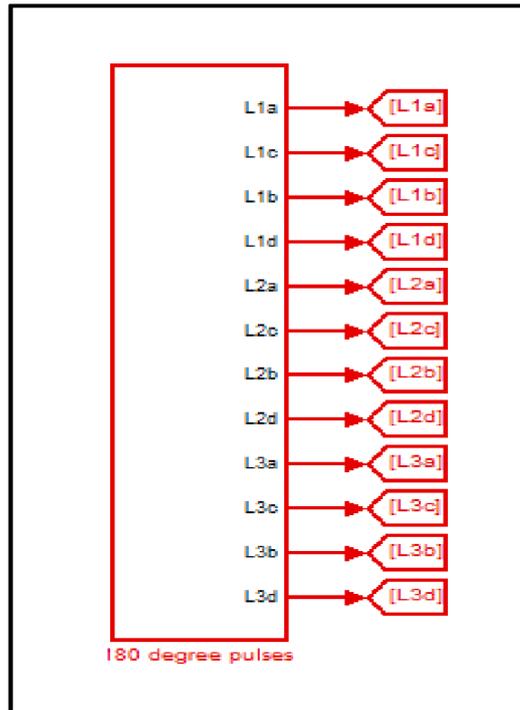


Figure.III.20: schéma block de la commande MLI de l'onduleur

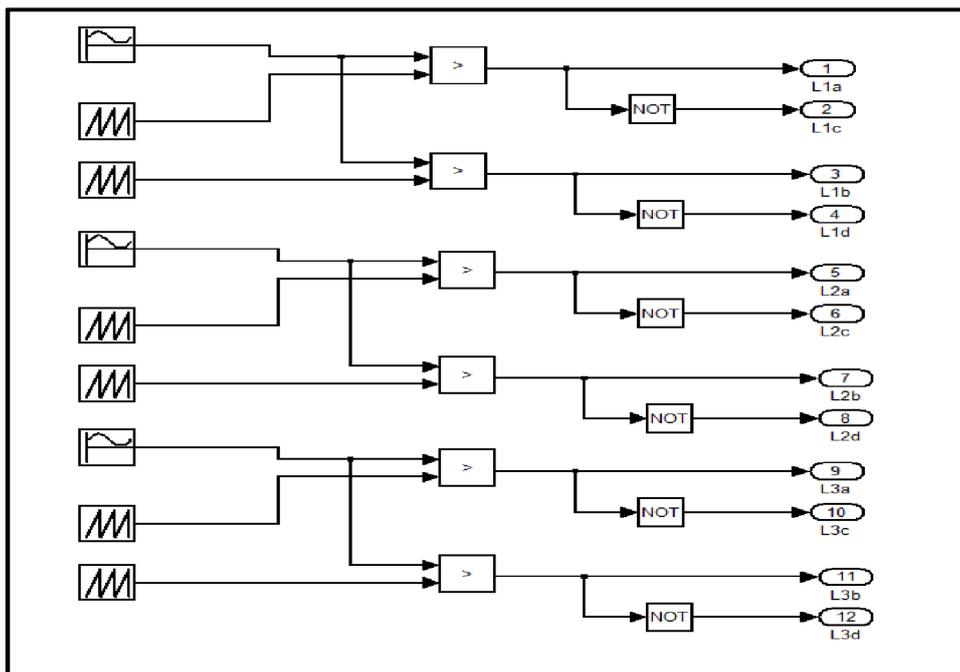


Figure.III.21 : schéma équivalent de simulation de la commande MLI

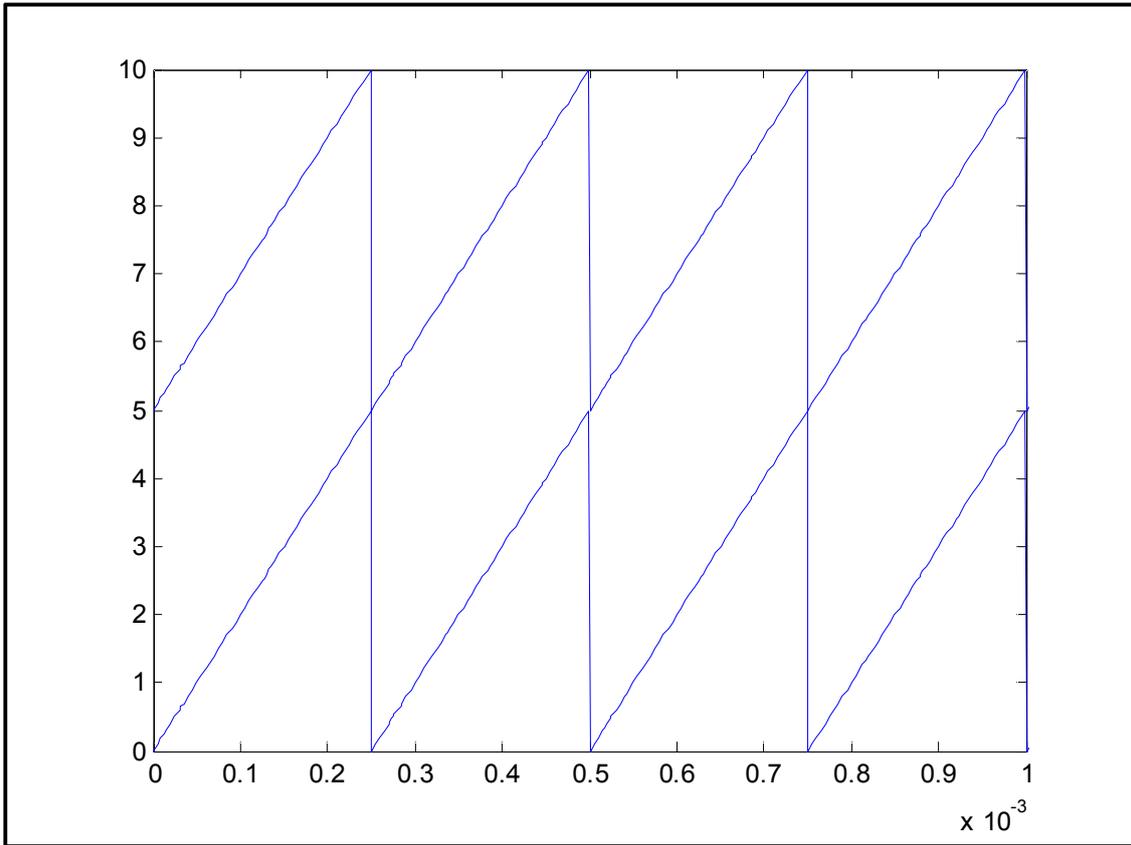


Figure.III.22: signal deux porteurs décalés

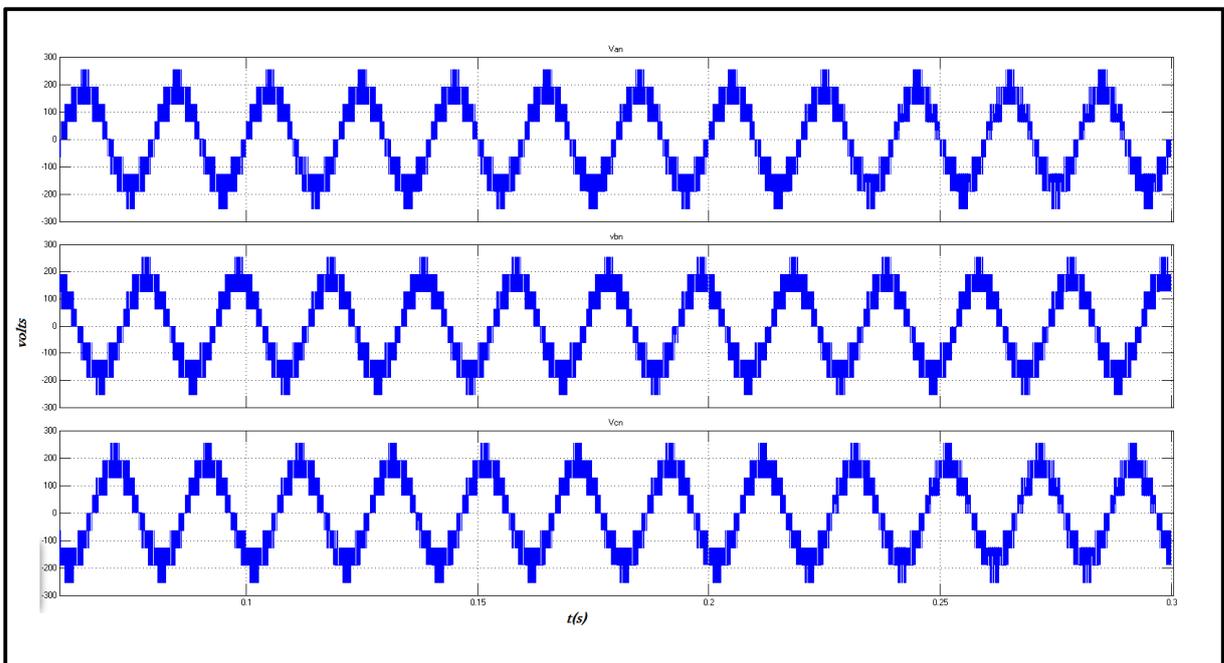


Figure.III.23: Tensions composés de la sortie de l'onduleur

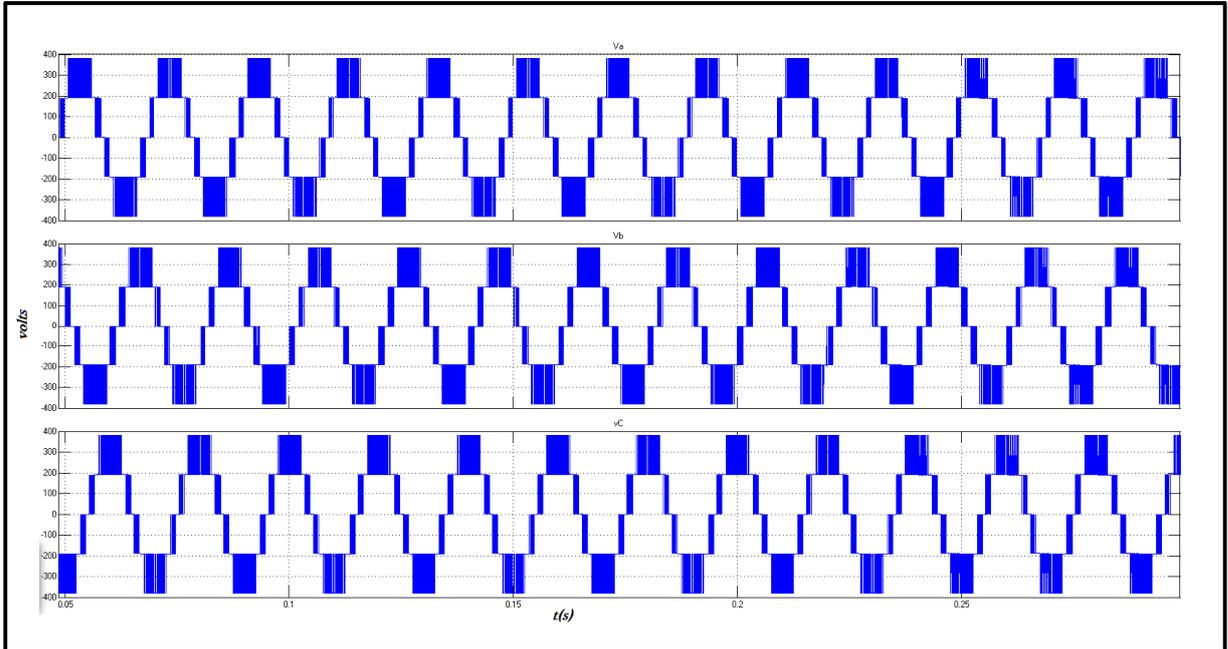


Figure.III.24 : Tensions simples de la sortie de l'onduleur

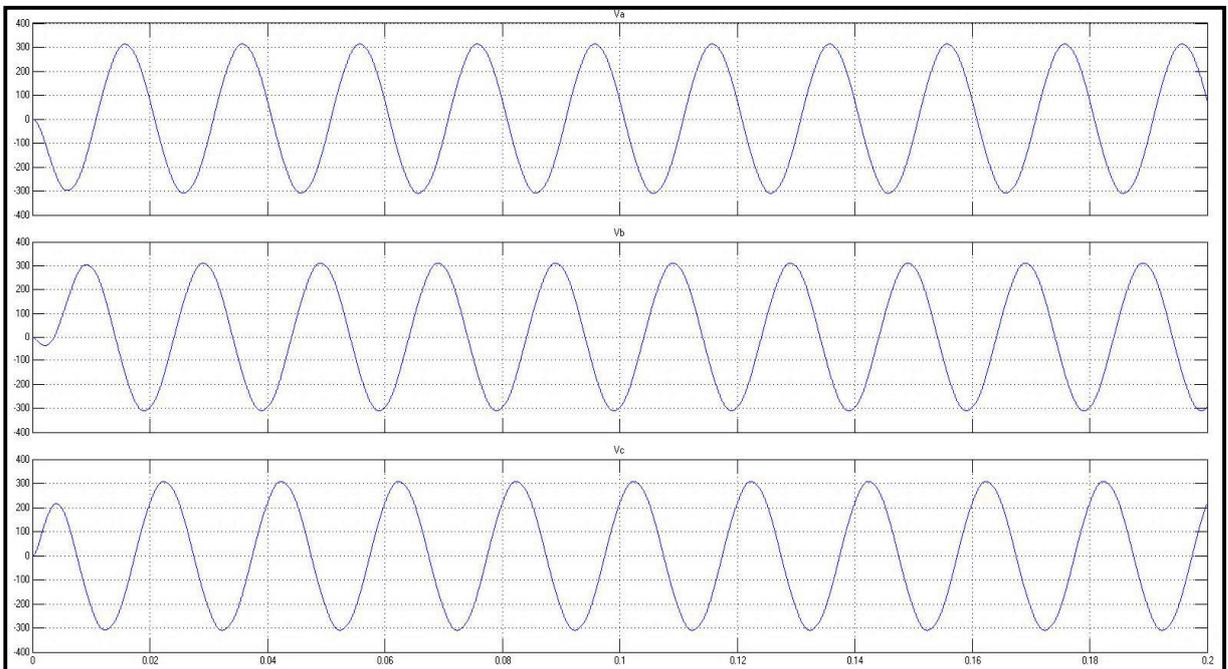


Figure.III.25 : Tensions simples après le filtrage

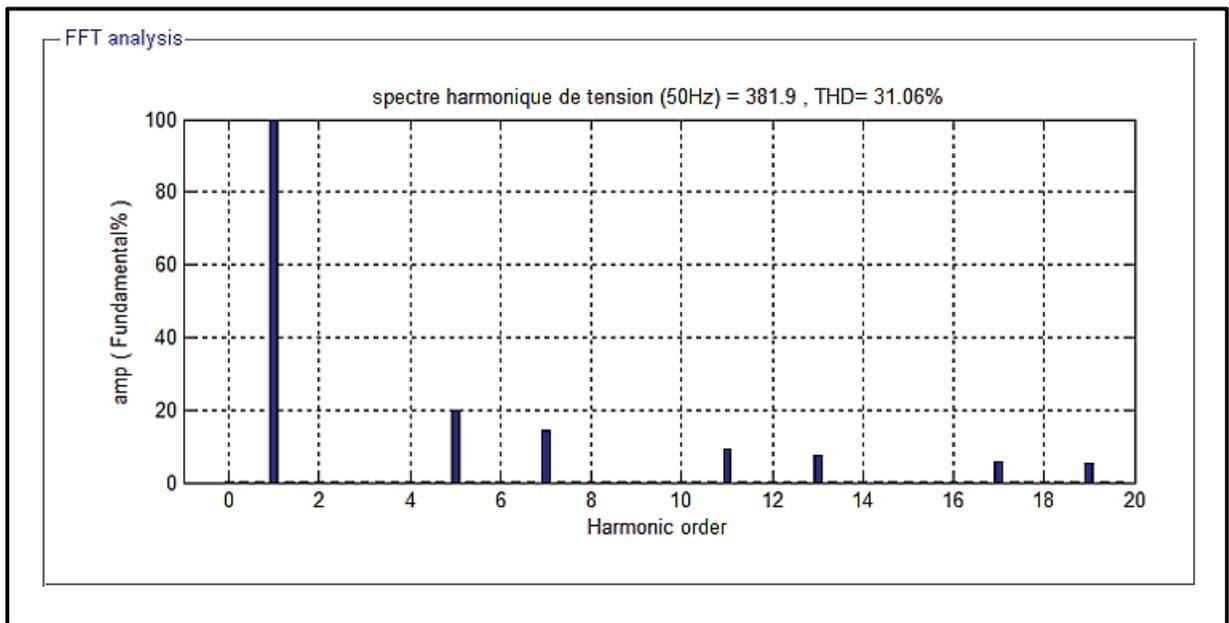


Figure.III.26 : Spectre harmonique de tension Va

Interprétation

Sur la figure (III.22) sont présentés les signaux au nombre de deux, appelés signaux porteurs qui sont décalé l'un par rapport à l'autre de $T/2$.

Ils sont utilisés afin de générer des signaux de commande MLI.

Sur les figures (III.23) et (III.24), nous avons présentés les allures de tension composées figure(III.23) et celles de tension modulées figure(III.24). Ces tensions vont être filtré pour obtenir des tensions de la sorties.

La figure(III.25) représente les tensions simples filtrées, ayant une forme sinusoïdale désirée.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre il a été question d'une modélisation puis d'une simulation d'un ensemble composé d'une pile à combustible type PEMFC et un hacheur élévateur liés tous les deux à onduleur à trois niveaux types NPC, alimentant une charge de type résistif.

Les tensions de sorties obtenues après la simulation sont satisfaisantes et répondent aux exigences demandées.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le cadre de notre travail, nous avons modélisés l'ensemble de la pile à combustible type PEMFC connecté à un hacheur survolteur .

Ensuite nous avons modélisés l'onduleur à trois niveaux à structure NPC , Enfin nous avons réalisés la simulation entière sous, Matlab Simulink, de notre système composé d'un générateur ; pile à combustible et un onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Pour une adaptation adéquate entre la pile à combustible de l'onduleur à trois niveaux, nous avons utilisés un hacheur survolteur .

La modélisation de l'onduleur à structure NPC est aussi une étape obligatoire pour faire commander ce dernier. Nous avons montré que les onduleurs à structure NPC à trois niveaux sont une association en série de plusieurs onduleurs à deux niveaux.

Comme perspectives, nous proposons :

- Connexions du système proposé à un réseau électrique d'alimentation.
- Utiliser d'autres stratégies de commande, a fin d'améliorer la sinusoïde de la tension de sortie.

BIBLIOGRAFIES

BIBLIOGRAPHIE

- [ALE 11] : Alexandre Leredde , « *Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multiniveaux* » , Thèse de doctorat de L' université de TOULOUSE ,le : mardi 8 novembre 2011.
- [ALF 06] : Alfred Rufer , Les onduleurs multiniveaux: évolution de la recherche et applications futures.2006.
- [ALI 09] : Alireza Payman , « *Contribution à la Gestion de l'Énergie dans les Systèmes Hybrides Multi-source Multi-charges* » , Université de Téhéran , Téhéran , Iran , le 15 juillet 2009.
- [AXE 13] : <http://www.axane.fr/> 10/03/2013
- [CHA 00] : Chabert, A. Rufer.« *Optimisation des convertisseurs de puissance embarqués* » Electronique de Puissance du Futur, actes du 8è colloque, Lille France, nov./déc. 2000.
- [CHA 13] : H. Chang, P. Koschany, C. Lim and J. Kim Materials and processes for light weight and high power density PEM fuel cells <http://www.groupe.polymtl.ca/jnmes/modules/journal/index.php/content0629.htm> Volume 3 (2000) , le 24/03/2013 à 14 :28.
- [DAN 06] : Dang Bang Viet , « Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible», Thèse de doctorat de L'UJF , Université Joseph Fourier, Le 08 Décembre 2006 .
- [DIA 12] : Daif . Youssouf « *Modélisation et commande d'un onduleur triphasé pilote par MLI structure multi-niveaux* » Université Kasdi Merbah - Ouargla , Master 2012.
- [ENG 13] : A.James , <http://www.eng.umd.edu/html/media/release.php?id=147> , Department of Energy Quadrennial Technology Review Framing Document, U.S , le 21/03/2013 à 19 :04 .

- [KOS 13] :** Koschany , H. Chang , C. Lim and J. Kim Materials and processes for light weight and high power density PEM fuel cells <http://www.groupe.polymtl.ca/jnmes/modules/journal/index.php/content0629.htm> Volume 3 (2000) , le 24/03/2013 à 14 :28
- [JEA 05] :** Jean-Sébastien Mariethoz , « *Étude formelle pour la synthèse de convertisseurs multi-niveaux asymétriques : topologies , modulation et commande* » Thèse de doctorat , École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2005 .
- [JER 04] :** Jérôme Lachaize Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », Thèse de doctorat de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE ,le 20 septembre 2004 .
- [JUL 05] :** Julien Ramousse «TRANSFERTS COUPLES MASSE-CHARGE-CHALEUR DANS UNE CELLULE DE PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE POLYMERE», Thèse de doctorat dans de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [GUI 04] :** Guillaume Lefevre « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible» , Université Joseph Fourier , Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, Le 26 Novembre 2004
- [KHA 09]** B.KHALIFA « *Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série : Approche Hybride.* »Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009.
- [LEC 05]:** Amel Lachichi « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible », Docteur en Génie électrique, l'Université de Franche-Comté , le 24 novembre 2005.

- [LEO 08] :** Leopodo G.Franquelo,Jose Rodriguez,Jose I.Leon,Samirkouro,Ramon Portillo, et Maria A.M.Prats ,« *the age of multilevel converters arrives* » article , IEEE Industrial Electronics Magazine , June 2008.
- [LEO 08] :** Leopodo G.Franquelo,Jose Rodriguez,Jose I.Leon,Samirkouro,Ramon Portillo, et Maria A.M.Prats ,« *the age of multilevel converters arrives* » article , IEEE Industrial Electronics Magazine , June 2008.
- [MAN 04] :** Joseph Song Manguelle , « *Convertisseurs multi-niveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires* » Thèse de doctorat , École Polytechnique Fédérale De Lausanne , 2004.
- [MAR 02] :** Sébastien Mariéthoz , Alfred Rufer , « *Dimensionnement et commande des onduleurs multiniveaux* » , Conférence Internationale Francophone d'Automatique , Nantes , 8-10 juillet 2002 .
- [MAR 92] :** M. Marchesoni, « *High-performance current control techniques for application multilevel high power voltage source inverters* », Jan. 1992.
- [PIN 07] :** J.R. Pinheiro et C. Rech, « *Hybrid multilevel converters: Unified analysis and design considerations* », Apr. 2007.
- [ROD 02]:** J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng , « *Multi-level inverters: A survey of topologies, controls, and applications* » Aug. 2002.
- [RUF 06] :** Alfred Rufer professeur et directeur du Laboratoire d'électronique industrielle de l'EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
« *Les onduleurs multi- niveaux: évolution de la recherche et applications futures* » article 2006 .
- [SAD 06] :**
- [THO 05] :** Phatiphat Thounthong « *Conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs* » , L'Institut National Polytechnique de Lorraine ,Thèse de doctoratde l'INPL , le 9 décembre2005.

[TOU 05] :

Toufik Arrif « Quantification des modes de transfert de masse dans une pile à Combustible de type PEMFC »,

ANNEXES