

N° Ordre...../FHC/UMBB/2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**  
**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

## **MASTER**

Filière : Hydrocarbure  
Option : Génie Electrique : Électricités Industrielle

**Présenté par :**

**BOUKELA ALLAEDDINE ABDERAHMANE**

**RAHMANI TARIQ**

**Thème**

# **Sureté de fonctionnement des onduleurs sécurisé à tolérance de panne**

**Devant le jury :**

Mr. TADJER SA	MAA	UMBB	Président
Mr. HAMADACHE M	MCA	UMBB	Examineur
Mr. KIFOUCHE R	MAA	UMBB	Examineur
Mr. KHELIFI F	MAA	UMBB	Encadreur

Année Universitaire : 2015/2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

Département : Automatisation et Electrification des Procédés Industriels

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie Electrique : Électricités Industrielle

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

*Thème*

# **Sureté de fonctionnement des onduleurs sécurisé à tolérance de panne**

**Présenté par :**

**Avis favorable de l'encadreur**

BOUKELA ALLAEDDINE ABDERAHMANE

RAHMANI TAREQ

**Avis favorable du Président du jury**

**Nom Prénom**

**Signature**

**Mr. TADJER SA**

**Cachet et signature**

# Remerciements

*Tout d'abord nous tenons à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et la patience de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre professeur consultant Mr. KHÉLIFI fateh pour ses conseils, ses orientations, ses remarques et pour le temps qu'il nous a accordé le long de cette période malgré ses occupations.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de l'INH et de l'INIM qui ont contribué à notre formation.*

*Enfin, tous nos remerciements vont à nos familles et amis de l'INH qui ont été nombreux à nous aider et nous encourager.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu*

*A Ma Mère qui a été toujours à mes côtés*

*A Mes Frères et Soeurs*

*Khaled, Nesro, Hakima,*

*Khadidja et Feyrouz*

*A toute la famille Rahmani et Ben Oum Saad*

*A mon binôme Allaeddine qui est plus qu'un ami pour moi, il est mon frère*

*A mes Amis*

*Schaib, Mounir, Yasser, Nacer, Imad, Ossama, Ali*

*Abderahman, Saleh, Mondji, Hichem et toute la promo H11.*

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>Chapitre I: Sûreté de fonctionnement, méthodes et concepts</b>	
I.1 Introduction .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.2 Historique .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.3 Une aptitude et une discipline .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4 Terminologie de la Sûreté de fonctionnement .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5 Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.1 Fiabilité .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.2 Maintenabilité .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.3 Sécurité .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.4 Disponibilité.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.5 Autres composantes.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.6 Relations entre les composantes .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.7 Les études de sûreté de fonctionnement .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.8 Défaillances, modes de défaillance.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.8.1 Défaillances.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.8.2 Modes de défaillance .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.8.3 Défaut .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.9 Classification des défaillances.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.10 Conséquences des défaillances : Défauts et pannes .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.11 Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.11.1 Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets : AMDE.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.11.2 Arbre de défaillance (ADF) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Conclusion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Chapitre II : Les convertisseurs statique</b>	
II.1 Introduction .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.2 Généralité sur l'électronique de puissance .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3 Etat de l'art sur les semi-conducteurs de puissance .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.1 Les diodes .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.2 Les thyristors .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

# SOMMAIRE

II.3.3 Les thyristors GTO.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.4 Transistor.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.4.1 Transistor bipolaire.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.4.2 Transistor MOS.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.4 Choix des composants.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5 Les convertisseurs statiques.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.1 Conversion ALTERNATIF/ALTERNATIF : le GRADATEUR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.2 Conversion CONTINU/ CONTINU: le HACHEUR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.3 Conversion ALTERNATIF/ CONTINU: le REDRESSEUR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.4 Conversion CONTINU /ALTERNATIF : ONDULEUR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6 Généralité sur l'onduleur.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.1 Définition de l'onduleur.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.2 Classification des onduleurs.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.2.1 Onduleur autonome.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.2.2 Onduleur non autonome.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3 Les applications des onduleurs.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3.2 Alimentation de secours.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7 Différents types d'onduleurs.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.1 Onduleur de tension.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.2 Onduleur de courant.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3 Onduleur à résonance.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3.1 Onduleur à résonance parallèle.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3.2 Onduleur à résonance série.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.8 Structure d'onduleur.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.8.1 Onduleur monophasé.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.8.1.1 Onduleur monophasé en demi-pont.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.8.1.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.8.2 Onduleur de tension triphasé.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.8.2.1 Le fonctionnement conventionnel.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9 L'onduleur multi-niveaux.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.1 Définition.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

# SOMMAIRE

II.9.2 Intérêt des onduleurs multi-niveau.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.3 Stratégies de commande .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.3.1 La commande 180° .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.3.2 La commande 120° .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.3.3 Commande à modulation de largeur d’impulsion (MLI).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.3.3.1 MLI naturelle (sinus-triangle) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.9.3.3.2 Modulation vectorielle (SVM) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Conclusion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
 <b>Chapitre III : Application des méthodes SDF sur l’onduleur</b>	
III.1 Introduction.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2 Application des méthodes d’analyse de la sureté de fonctionnement.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2.1 L’analyse de mode de défaillance et leur effet (AMDE) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2.1.1 Application de l’AMDE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2.2 L’arbre de défaillance (Adf).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2.2.1 Analyse qualitative .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2.2.2 Analyse quantitative .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3 Les défaillances des composants et de la commande dans une stratégie de modulation M.L.I .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.1 Défaillance de l’électronique de commande .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.1.1 Les imperfections liées à la commande M.L.I .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.1.2. Temps morts et tensions parasites générées .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.2. Les modes de défaillances des composantes semi-conducteurs.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.3 Défaut de court-circuit .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.3.1 Court-circuit dans une cellule de commutation .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.3.2 Défaut de court-circuit dû à la défaillance d’un interrupteur.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.3.3 Défaut d’ouverture d’un interrupteur .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.4 Technologie et topologie de l’onduleur à tolérance de panne .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.4.1 Sécurisation et tolérance de panne en onduleur à deux niveaux.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.4.1.1 Isolement électrique des défauts.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Conclusion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

# SOMMAIRE

## Chapitre IV : Simulation

IV.1 Introduction .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.2 Choix d'onduleur .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3 Simulation des modes de défaillance les plus distingués dans un onduleur	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.1 Défaut de type Circuit ouvert .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.1.1 Défaut de type Circuit ouvert d'un transistor .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.1.2 Défaut de type Circuit ouvert d'une cellule.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.2 Défaut de type court circuit.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.2.1 Défaut de C-C d'un IGBT (Défaut de bras asymétrique)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.2.2 Défaut de C-C d'un bras.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.4 Simulation de l'onduleur sécurisé avec detection et reconfiguration Onduleur à quatre bras .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Essai I .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Essai II .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Essai III.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Conclusion :.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
CONCLUSION GENERALE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>



# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Schéma Attributs de la sûreté de fonctionnement (SdF).....	6
<b>Figure I.2</b> : Définitions graphiques du MTTF, MDT, MUT et MTB.....	7
<b>Figure I.3</b> : Définitions graphiques du MTTR et MDT (Maintenabilité).....	8
<b>Figure I.4</b> : Contribution des techniques de diagnostic à la disponibilité.....	9
<b>Figure I.5</b> : Evolution du taux de défaillance dite "courbe en baignoire".....	13
<b>Figure I.6</b> : Arbre de défaillance.....	18
<b>Figure II.1</b> : Représentation symbolique D'une diode réelle.....	21
<b>Figure II.2</b> : choix des composants selon la puissance et la fréquence Choix .....	23
<b>Figure II.3</b> : Les familles de convertisseurs statiques.....	24
<b>Figure II.4</b> : Schéma de conversion AC/AC.....	24
<b>Figure II.5</b> : Schéma de conversion DC/DC.....	25
<b>Figure II.6</b> : Schéma de conversion AC/DC.....	25
<b>Figure II.7</b> : Schéma de conversion DC/AC.....	26
<b>Figure II.8</b> : Schéma de principe de la conversion Continu-Alternative (DC-AC).....	26
<b>Figure II.9</b> : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	28
<b>Figure II.10</b> : Alimentation de secours.....	28
<b>Figure II.11</b> : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	29
<b>Figure II.12</b> : Onduleur de tension en pont Monophasé.....	29
<b>Figure II.13</b> : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie .....	29
<b>Figure II.14</b> : Onduleur de courant en pont monophasé.....	30
<b>Figure II.15</b> : Signaux de commande et forme d'onde des courants.....	30
<b>Figure II.16</b> : Onduleur à résonance parallèle (Monophasée) .....	32
<b>Figure II.17</b> : Signaux de commande et forme d'onde des courants .....	32
<b>Figure II.18</b> : Onduleur à résonance série (Monophasée) .....	33
<b>Figure II.19</b> : Signaux de commande et forme d'onde des tensions .....	33
<b>Figure II.20</b> : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.....	33
<b>Figure II.21</b> : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont.....	34
<b>Figure II.22</b> : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé .....	35
<b>Figure II.23</b> : Commande 180°.....	40
<b>Figure II.24</b> : Commande 120°.....	40
<b>Figure II.25</b> : principe de commande MLI.....	42

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure III.1 :</b> Construction de l'Arbre de Défaillance .....	48
<b>Figure III.2 :</b> L'arbre de défaillance pour un onduleur à deux interrupteurs par bras.....	50
<b>Figure III.3 :</b> Schéma d'un onduleur à trois cellules de commutation avec driver de ponts associés.....	52
<b>Figure III.4 :</b> Signaux de commande d'une cellule de commutation avec une mise en jeu d'un temps mort ( $\lambda t$ ).....	54
<b>Figure III.5 :</b> Illustrations des tensions parasites appliquées en présence du temps mort.....	55
<b>Figure III.6 :</b> Causes, effets et modes de défaillance d'un semi-conducteur (IGBT).....	56
<b>Figure III.7 :</b> Eléments d'une cellule de commutation (bras d'onduleur).....	58
<b>Figure III.8 :</b> a) cellule générique.                      b) défaut de court circuit.....	58
<b>Figure III.9 :</b> a) cellule générique 1                      b) défaut d'ouverture.....	59
<b>Figure III.10 :</b> 3 dispositifs d'isolement par cellule.....	61
<b>Figure III.11 :</b> 1 dispositif d'isolement par cellule.....	61
<b>Figure III.12 :</b> 2 dispositifs d'isolement par cellule.....	61
<b>Figure III.13 :</b> 2 dispositifs d'isolement par cellule.....	61
<b>Figure III.14 :</b> topologie d'onduleur permettant l'isolement de cellules défaillantes à l'aide de fusibles.....	63
<b>Figure III.15 :</b> Exemples d'interrupteurs d'isolement 4 quadrants insérés entre la cellule et la phase moteur.....	64
<b>Figure IV.1 :</b> Forme d'onde de courant des phases et des signaux de commande MLI pour un fonctionnement sans défaut.....	67
<b>Figure IV.2 :</b> Forme d'ondes des courants près un Défaut de circuit ouvert d'un transistor (supérieur) .....	68
<b>Figure IV.3 :</b> Forme d'ondes des courants près un Défaut de circuit ouvert d'un transistor (inférieur) .....	68
<b>Figure IV.4 :</b> Forme d'ondes des courants près un Défaut de circuit ouvert d'une cellule....	69
<b>Figure IV.5 :</b> Forme d'ondes des courants près un Défaut de C-C d'un IGBT (Défaut de bras asymétrique).....	70
<b>Figure IV.6 :</b> Forme d'ondes des courants près un Défaut de C-C d'un bras.....	71
<b>Figure IV.7 :</b> la commande erronée (l'origine de défaut).....	73
<b>Figure IV.8 :</b> Court-circuit, isolation et reconfiguration pour un délai de 15 ms.....	73

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure IV.9 :</b> Forme d'onde courant dans le bras défaillant et le courant de reconfiguration.....	74
<b>Figure IV.10 :</b> Reconfiguration Rapide (pas de délai entre la déconnection et la connexion de bras BS1).....	74
<b>Figure IV.11 :</b> Forme d'onde courant dans le bras défaillant et le courant de reconfiguration.....	75
<b>Figure IV.12 :</b> Reconfiguration parfaite (détection et intervention super vite).....	75
<b>Figure IV.13 :</b> Forme d'onde courant dans le bras défaillant et le courant de reconfiguration.....	76

## ANNEXE

**Figure 1.2** Schéma d'onduleur a 4 bras conçu sur PSIM

**Figure 1.2** Schéma de charge (model de MASP)

**Figure 1.3** Schéma de circuit de commande MLI + système de détection de C-C

**Figure 1.4** Schéma de structure d'isolement et de connexion

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau III.1:** L'AMDE d'une cellule de commutation.....47

**Tableau III.2 :** tableau de l'arbre de défaillance.....49

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Dans l'industrie, on parle de plus en plus de sûreté de fonctionnement. Cette discipline, qui a acquis ce nom et sa forme actuelle principalement au cours du dernier demi-siècle et dans les secteurs de la défense, de l'aéronautique, de l'espace, du nucléaire, puis des télécommunications et des transports, serait désormais utile, voire indispensable, à tous les secteurs de l'industrie et même d'autres activités.

Pour les convertisseurs statiques, en intéresse de plus dans la disponibilité de convertisseur, ça veut dire qu'un convertisseur soit fonctionnant dans n'importe quelle instants, ça impose une tolérance de panne et aux modes dégradés, ces pannes (défaillances) sont des origines et conséquences différentes.

Au niveau du convertisseur, ces défaillances apparaissent soit sous forme de circuits ouverts (C-O) soit de courts-circuits(C-C) selon l'origine de défaut, et sa criticité.

Notre mémoire a le but d'analyser et contribuer à des solutions visant à augmenter les disponibilités des onduleurs. Donc une simulation des nouvelle structure sera fourni afin d'envisager un fonctionnement tolérant aux modes dégradés, et cela en implantant des stratégies palliatives et des actions préventives et correctives.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les méthodes de sûreté de Fonctionnement. Rappellerons dans un premier temps quelques concepts de la sûreté de fonctionnement et les méthodes d'analyse les plus utilisées en exposant les deux méthodes l'AMDE (analyse des modes des défaillances et de leur effets) et L'ADF (arbre des défaillances).

Dans Le chapitre II nous présenterons une généralité sur l'électronique de puissance, les différentes familles des convertisseurs statiques, les composantes semi-conducteurs, après ça nous allons décrire le principe de fonctionnement des onduleurs, ces types, et finalement les stratégies de commande.

Le chapitre III est consacré à l'étude des modes de défaillance de l'onduleur mentionnant les plus fréquents et néfastes. En appliquant les deux méthodes de la sûreté de fonctionnement d'un onduleur (l'analyse AMDE et l'arbre de défaillance). Ensuite nous allons lui appliquer la topologie du convertisseur qui doit faire apparaître des redondances ou bien un partitionnement pour pouvoir confiner le défaut et contenir ces effets.

Dans le chapitre IV nous effectuons la simulation des différents défauts à l'origine de circuit de commande, parmi ceci :

Les défauts Circuit ouvert (C-O).

Les défauts Court-circuit (C-C).

Ensuite nous effectuons la simulation d'un défaut de commande dans un interrupteur d'un onduleur sécurisé à 4 bras reconfigurable. A la fin on termine avec une conclusion.

# Chapitre I

## **Sûreté de fonctionnement, méthodes et concepts**



# Chapitre I

## Sûreté de fonctionnement, méthodes et concepts

### I.1 Introduction

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'un système à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données ; elle englobe principalement quatre composantes : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité, ou noté en terme anglo-saxon RAMS (Reliability, , Maintenability, Availability and security).

La connaissance de cette aptitude à remplir une ou plusieurs fonctions permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur assure. Par extension, la sûreté de fonctionnement désigne également l'étude de cette aptitude et peut ainsi être considérée comme la « science des défaillances et des pannes ».

Dans ce chapitre, nous présenterons un état de l'art sur les méthodes de sûreté de fonctionnement commençons par l'historique de la sûreté de fonctionnement pour donner les notions fondamentales. Les relations entre les composantes, Les études de sûreté de fonctionnement. Nous exposerons ensuite les deux méthodes d'analyse que nous adapterons pour notre travail.

### I.2 Historique

Au début Au début de l'ère industrielle aux années 1930, l'apparition de l'électricité puis son développement conduisirent les ingénieurs à chercher à rendre fiable cette source de puissance. Avec le développement du transport aérien, on a vu apparaître un autre aspect de la fiabilité : le recueil d'informations statistiques sur la fréquence de pannes des divers équipements des avions [1].

Durant les années 1940, les premiers modèles de fiabilité prévisionnelle apparaissent en Allemagne où se développaient les projets de missile V1 sous la direction de Von Braun. [1], [2].

Le manque de fiabilité était souvent devenu le cauchemar des ingénieurs, c'est ainsi que apparut la « loi de Murphy » en 1949 : « Si un ennui a la moindre chance de se produire, dites-vous qu'il se produira ! » [3].

La commission AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment), créée en 1952 par le Department of Defense et l'ensemble des industries électroniques [4], insista sur le besoin pour les nouveaux équipements d'être testés pendant plusieurs milliers d'heures dans des environnements très contraignants (incluant des hautes et basses températures, des vibrations, ...) afin de découvrir le maximum de points faibles suffisamment tôt pour permettre de corriger ces défauts avant le lancement de la production en série. La commission recommanda également, d'une part, le calcul du MTBF (durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée). [5]

Des évolutions comparables sont observées dans les pays européens ; c'est ainsi qu'en France, en 1955, le CENT (Centre National d'Etudes des Télécommunications) commençait ses premiers travaux sur la fiabilité [6].

C'est au début des années 1960 que fut créée la méthode de l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) dans le domaine de l'aéronautique.

Les méthodes d'analyse prévisionnelle de la fiabilité et de la sécurité des systèmes se généralisèrent dans l'industrie aéronautique. Il faut aussi mentionner l'existence des premières banques de données de fiabilité qui commencent à être disponibles à la fin de cette décennie.

Cette période voit aussi la naissance de la revue « IEEE Transactions on Reliability » créée par IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers).

De nombreuses et nouvelles méthodes furent développées dont la méthode de l'Arbre des Conséquences pendant la première moitié des années 1980 [7].

Ainsi, il apparait au milieu des années 1980 que la prise en compte des techniques de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité tend à se généraliser, d'une part, pour la maîtrise et la gestion des grands risques industriels et, d'autre part, pour la conception de matériels de grande consommation.

### **I.3 Une aptitude et une discipline**

La sûreté de fonctionnement est, selon Alain Villemeur, l'« aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données » [8]. Elle traduit la confiance qu'on peut accorder à un système, la sûreté de fonctionnement étant, selon la définition proposée par Jean-Claude Laprie [9], « la propriété qui permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre ». Par extension, selon Alain Villemeur, « la sûreté de fonctionnement est considérée comme la science des défaillances et des pannes » [8].

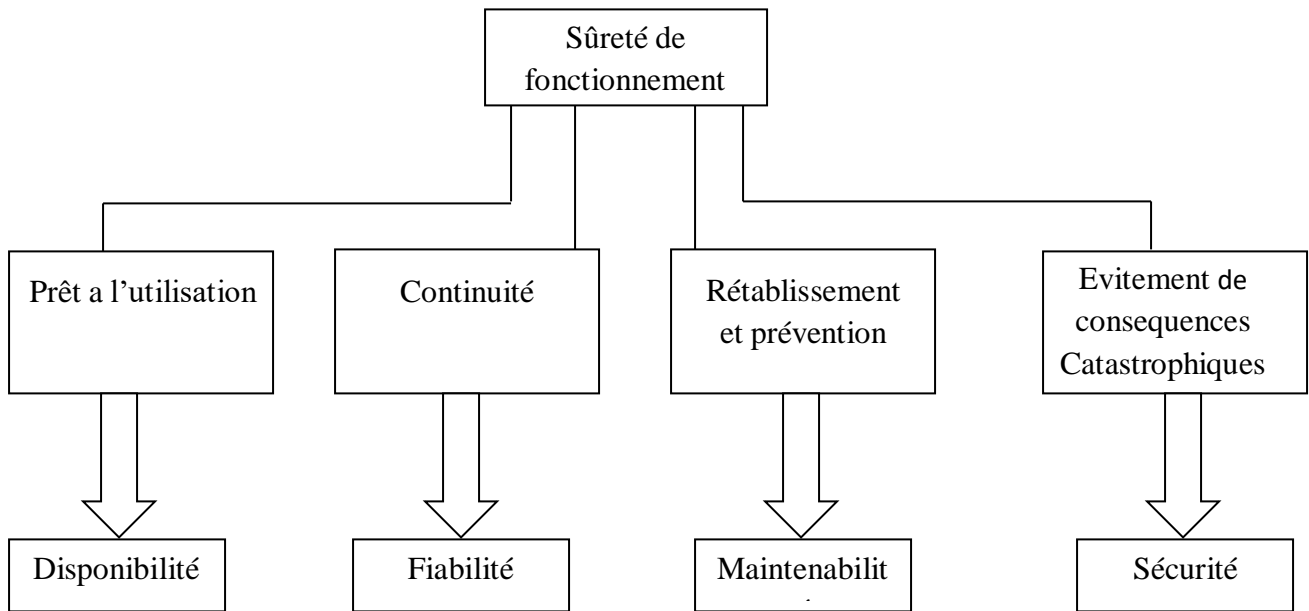
Deux sens peuvent donc être donnés à la sûreté de fonctionnement :

- le sens propre est l'aptitude d'une entité (organisation, système, produit, moyen, etc.) d'une part, à disposer de ses performances fonctionnelles (la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité) et d'autre part, à ne pas engendrer de risques majeurs (la sécurité) ;
- le sens large correspondant aux activités d'évaluation de cette aptitude (c'est-à-dire les études de sûreté de fonctionnement).

### **I.4 Terminologie de la Sûreté de fonctionnement**

Au sens large, la sûreté de fonctionnement. Elle peut être définie comme “la science des défaillances”. Elle inclut tous les aspects liés au dysfonctionnement des composants, dispositifs et systèmes, à savoir la connaissance de ces défaillances, leurs évolutions, leurs prévisions et le cas échéant leurs maîtrises. [10]

Au sens strict, la sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données .Elle peut être caractérisée par les concepts suivants (figure I.1).



**Figure I.1 :** Attributs de la sûreté de fonctionnement (SdF)

## **I.5 Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement**

### **I.5.1 Fiabilité**

La fiabilité est définie comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné [11].

La fiabilité est également la probabilité associée  $R(t)$ . Le temps moyen de fonctionnement avant la première défaillance MTTF (Mean Time To Failure) est souvent associée à la fiabilité.

Il désigne le temps moyen avant la première défaillance (Figure I.2).

Ce sont essentiellement les études de fiabilité qui sont sources de connaissances sur le mauvais fonctionnement et qui sont utilisées pour le diagnostic [12].

### **I.5.2 Maintenabilité**

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise lorsque la

maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

La maintenabilité est caractérisée par une probabilité  $M(t)$  qui exprime que la maintenance d'un système est achevée au temps  $t$ .

Les grandeurs associées à la maintenabilité souvent utilisées sont :

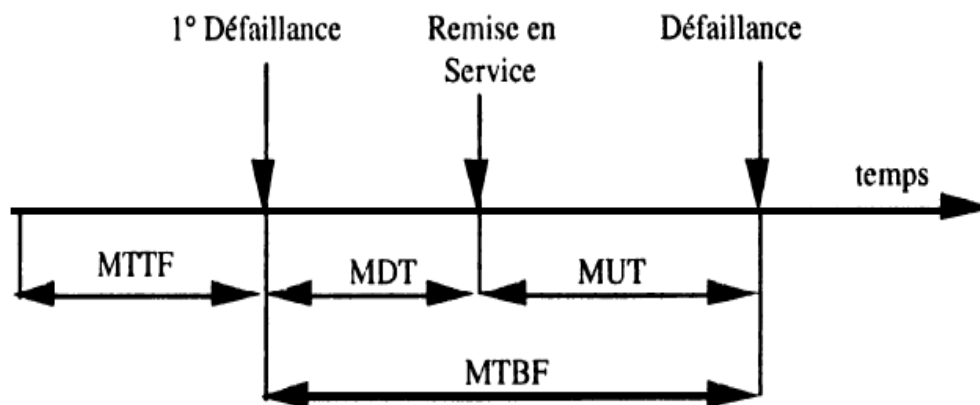
- Le temps moyen entre le début et la fin de la réparation MTTR (Mean Time To Repair);
- Le temps moyen de fonctionnement entre deux défaillances MTBF (Mean Time Between Failure).

### I.5.3 Sécurité

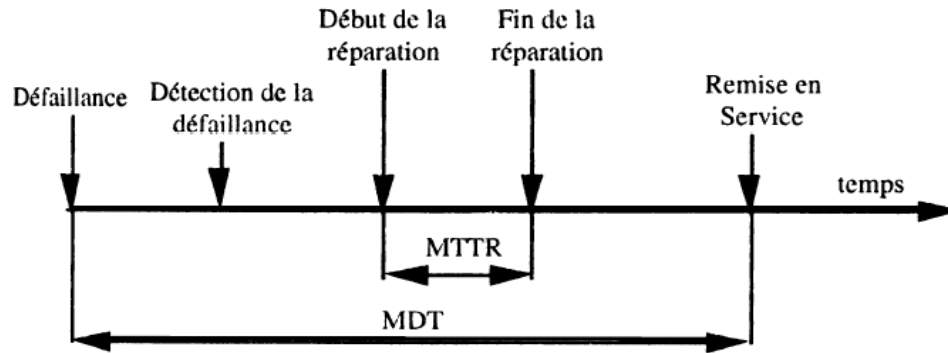
La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données des événements critiques ou catastrophiques.

Actuellement, l'évaluation de la sécurité est limitée à quelques secteurs. Elle se base sur les études statistiques des impacts des accidents réels, expérimentés ou simulés.

Pour préciser les définitions des grandeurs moyennes utilisées tout au long de ce parcours, deux schémas sont présentés sur les deux figures I.2 et I.3.



**Figure I.2** Définitions graphiques du MTTF, MDT, MUT et MTBF



**Figure I.3** Définitions graphiques du MTTR et MDT (Maintenabilité)

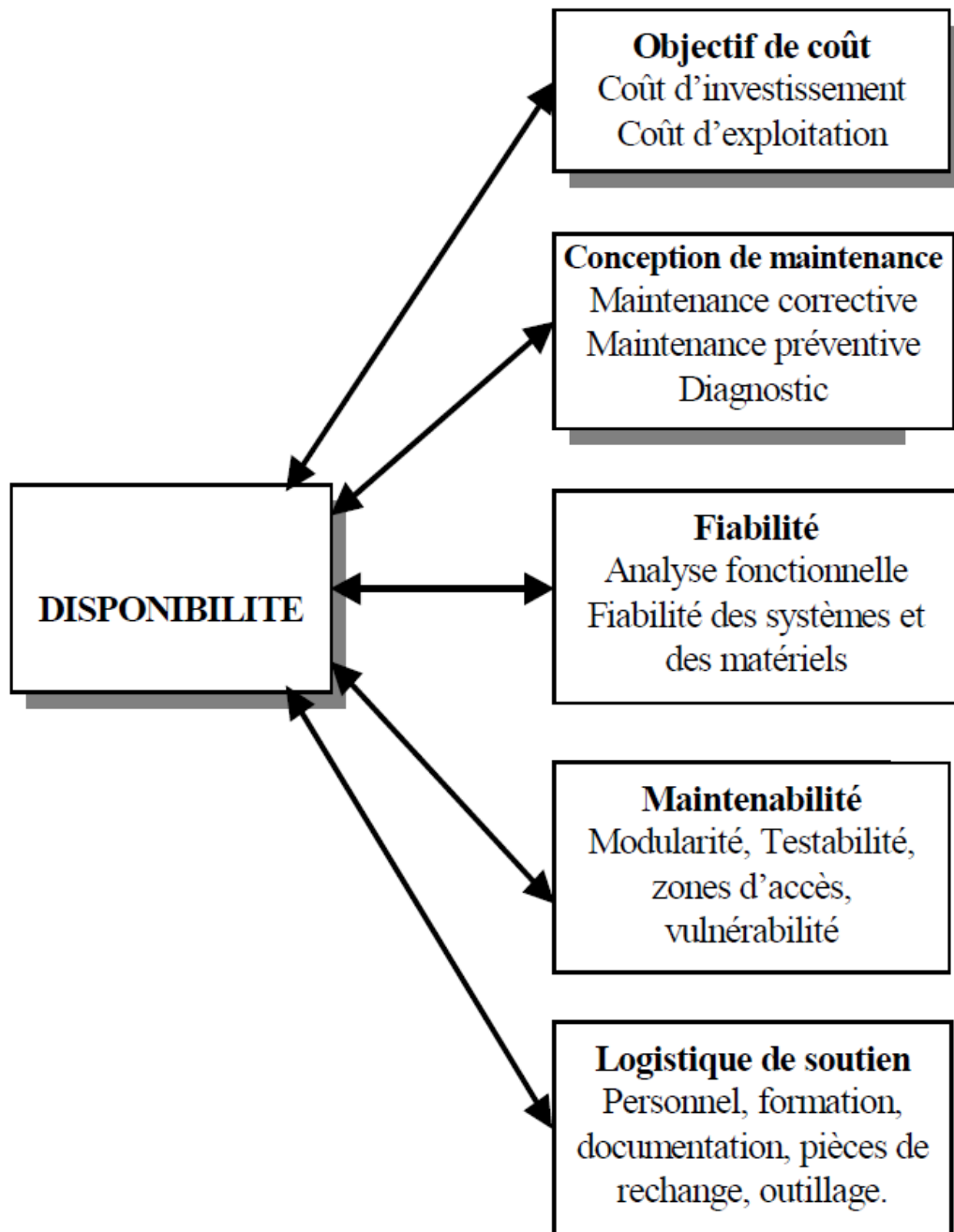
### I.5.4 Disponibilité

La disponibilité est définie comme étant l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.

La figure I-4 résume les composantes de la disponibilité.

La disponibilité correspond à la probabilité associée  $A(t)$  de non défaillance du système ou du composant. Quelques grandeurs associées à la disponibilité sont souvent utilisées :

- le temps moyen de disponibilité TMD et la durée moyenne de fonctionnement après réparation MUT (Mean Up Time) (Figure I-2).
- le temps moyen d'indisponibilité MDT (Mean Down Time) qui est la durée moyenne entre l'instant de défaillance et la remise en service.



**Figure I.4** Contribution des techniques de diagnostic à la disponibilité

### I.5.5 Autres composantes

- La testabilité est l'aptitude d'une entité à être déclarée défailante dans des limites de temps spécifiées, selon des procédures prescrites et dans des conditions données.
- La durabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

## **I.6 Relations entre les composantes**

La testabilité d'un composant contribue à la maintenabilité de l'équipement qui le contient.

La disponibilité d'un produit dépend de sa fiabilité et de sa maintenabilité [12]. En effet, pour qu'un produit soit en état de marche à un instant donné, il faut, soit qu'il n'ait pas arrêté de fonctionner (fiabilité), soit qu'il ait pu être remis en état de marche en cas de défaillance (maintenabilité et mise en place des moyens de maintenance appropriés).

Selon les contextes, la disponibilité et la sécurité peuvent être des aptitudes compatibles ou antagonistes. Ainsi, si un produit ne dispose pas d'état de repli sûr en cas de panne (cas de l'avion en vol par exemple), la sécurité est obtenue par une forte disponibilité. À l'inverse, si l'état de panne est plus sûr que l'état de fonctionnement (cas des transports terrestres, des systèmes ferroviaires par exemple), un haut niveau de sécurité peut entraîner une disponibilité médiocre, un compromis entre sécurité et disponibilité doit alors être trouvé.

## **I.7 Les études de sûreté de fonctionnement**

La sûreté de fonctionnement porte sur l'ensemble du cycle de vie d'un système. Les études prévisionnelles de sûreté de fonctionnement regroupent les activités d'évaluation de la fiabilité, de la maintenabilité, de la disponibilité et de la sécurité d'une organisation, d'un système ou d'un produit en cours de développement. Ces évaluations permettent, par comparaison aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de construction (ou d'amélioration) de la sûreté de fonctionnement de l'entité. Les études de sûreté de fonctionnement peuvent être utilisées pour le soutien logistique intégré et peuvent contribuer à l'évaluation du coût du cycle de vie [13] d'un produit.

Les études opérationnelles de sûreté de fonctionnement concernent le suivi des performances d'un système en exploitation. Elles permettent de s'assurer que les performances annoncées sont tenues pendant l'ensemble de la vie opérationnelle du système et de détecter d'éventuels phénomènes de vieillissement susceptibles de les dégrader.

Les études de sûreté de fonctionnement utilisent un ensemble d'outils et de méthodes qui permettent, dans toutes les phases de vie d'une entité, de s'assurer que celle-ci va accomplir ou



accomplit les missions pour lesquelles elle a été conçue, et ce dans des conditions de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité prédéfinies. Ces études consistent généralement à analyser les effets des pannes, dysfonctionnements, erreurs d'utilisation ou agressions de l'entité étudiée.

## **I.8 Défaillances, modes de défaillance**

### **I.8.1 Défaillances**

La défaillance est définie comme la cessation des aptitudes d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Elles peuvent se manifester par plusieurs symptômes appelés modes de défaillance.

### **I.8.2 Modes de défaillance**

Le mode de défaillance est le cheminement d'un défaut initial vers une défaillance "visible" du système. Les modes de défaillance sont générés par les causes de défaillance, un mode de défaillance représentant l'effet (ou les effets) par lequel se manifeste la cause de défaillance. Les défaillances d'un composant ont des effets sur les fonctions de celui-ci ; le mode de défaillance sera dénommé du nom de l'effet. [14]

### **I.8.3 Défaut**

Les défaillances sont causées par des défauts via leur activation ou leur occurrence [15]. On distingue généralement les défauts physiques (résultant de dysfonctionnements matériels), les défauts de conception (résultant d'erreurs commises durant le développement des systèmes), les défauts d'interaction (résultant d'erreurs dans la conduite ou l'utilisation opérationnelle des systèmes, ou dans leur maintenance). Alors que les défauts physiques sont par nature accidentels, les défauts de conception et d'interaction peuvent être accidentels, ou résultants d'une décision consciente, sans ou avec intention nuisible, auquel cas il s'agit de malveillances. Ainsi, la protection des systèmes fait partie intégrante du domaine de la sûreté de fonctionnement. La protection concerne toutes les composantes d'un système sur les différents niveaux. Elle s'acquiert grâce à l'utilisation combinée d'un ensemble de méthodes qui sont la

prévention des défauts, la tolérance aux défauts, l'élimination des défauts et la prévision des défauts.

- La prévention des défauts vise à empêcher l'occurrence ou l'introduction de fautes. Dans le cas du composant de puissance, elle conduit par exemple au durcissement des couches dans les technologies MOS afin d'éviter les claquages électriques.
- La tolérance aux défauts a pour but de permettre à un système de remplir sa fonction en dépit des défauts. La tolérance aux défauts physiques concerne les perturbations dues à l'environnement, aux défauts de conception, d'interaction et aux malveillances.
- La prévision des défauts consiste à estimer par modélisation ou par expérimentation la présence, la création et les conséquences des défauts. Elle a comme objectif l'évaluation de la sûreté de fonctionnement et des performances.

## I.9 Classification des défaillances

On distingue plusieurs catégories de défaillance qui dépendent soit de la vitesse d'apparition soit de son degré ou des deux.

La classification des défaillances en fonction du degré regroupe [11] :

- La défaillance partielle, qui est la déviation des caractéristiques au delà des limites du bon fonctionnement sans altérer à la fonction.
- Défaillance complète, qui est la déviation des caractéristiques telle qu'elle entraîne la disparition de la fonction
- Défaillance intermittente telle que les aptitudes sont retrouvées après le défaut.

Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition :

- Défaillance soudaine qui ne peut être prévue par un examen ou une surveillance.
- Défaillance progressive qui peut être prévue par un contrôle ou une surveillance.

Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition et du degré :

- Défaillance cataleptique qui est à la fois soudaine et incomplète.
- Défaillance par dégradation qui est progressive et partielle.

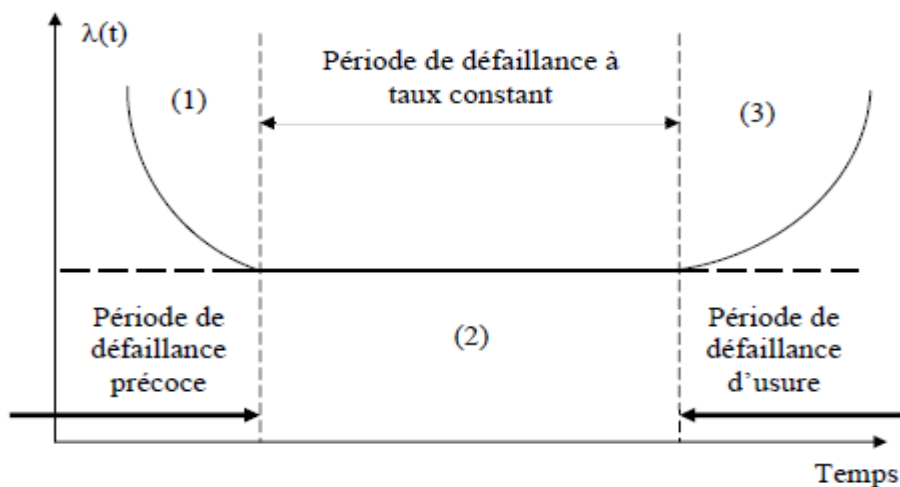
La notion de temps est importante dans la classification des défaillances. Le taux de défaillances  $\lambda(t)$  est l'une des grandeurs fondamentales souvent utilisée pour caractériser la défaillance d'un composant.

$\lambda(t)$  est la densité de probabilité conditionnelle exprimée par:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta(t)} = \frac{1}{(1 - M(t))} \left[ \frac{dM(t)}{d(t)} \right] \quad (I. 1)$$

Où  $R(t)$  est la loi de fiabilité

Dans de nombreux dispositifs, le taux de défaillance suit la courbe dite "en baignoire" représentée sur la Fig. I.5.



**Figure I.5** Evolution du taux de défaillance dite "courbe en baignoire"

## I.10 Conséquences des défaillances : Défauts et pannes

La diversité des activités de diagnostic conduit à employer assez souvent les termes de pannes et de défauts, si bien que la différence entre les concepts de défaillance, défaut et panne est parfois très subtile. Une panne résulte d'une défaillance. Elle est définie comme l'inaptitude à accomplir une fonction requise. Les classifications des pannes son similaires à celles des défaillances.

## I.11 Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement

On distingue deux types de démarches dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système, l'inductive et la déductive. Dans la démarche inductive, on raisonne du plus particulier

au plus général. Face à un système et une défaillance (ou une combinaison de défaillances), on étudiera de façon détaillée les effets ou conséquences de cette défaillance (ou de la combinaison de défaillance) sur le système lui-même et /ou son environnement. Les principales méthodes inductives sont les suivantes :

- L'Analyse de Modes de Défaillances et leur Effets et de leur criticité (AMDEC),
- L'Analyse de Modes de Défaillances et leur Effets (AMDE),
- La Méthode de la Table de Vérité (MTV),
- La Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR),
- La Méthode de l'Arbre des Conséquences (MDCC).

Dans la démarche déductive, on raisonne du plus général au plus particulier : supposant que le système est défaillant, on recherchera les causes de cette défaillance. L'analyse et l'enquête à la suite de catastrophes, pour en trouver les causes, sont de nature déductive.

Les principales méthodes déductives sont les suivantes :

- La Méthode de l'Espace des Etats (MEE).
- La Méthode de l'Arbre des Défaillances (AdF).
- L'analyse Préliminaire des Dangers (APD).
- La méthode du l'Espace des Etats (MEE).

Pour notre étude, nous avons choisi comme méthodes d'analyse inductive et déductive de notre système :

- L'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets,
- La méthode d'Arbre des Défaillances

### **I.11.1 Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets : AMDE**

Ces analyses sont très utilisées pour les études de sûreté de fonctionnement lors de la conception des systèmes. Elles sont indispensables pour s'assurer que les paramètres de sûreté, de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité sont conformes aux spécifications. Elles

prennent en compte toutes les défaillances possibles et analysent les conséquences sur les fonctions des systèmes, ce qui permet l'identification des matériels sensibles faisant l'objet d'un changement de conception ou bien d'une redondance matérielle.

La procédure AMDE a été normalisée (AFNOR X60-510/CEI 812-1985). Elle constitue une technique déductive [16].

Les étapes de l'AMDE peuvent être résumées dans les points suivants :

- Décomposition du système en sous-systèmes avec identification des organes de chacun.
- Etablissement des modes de défaillances pour chaque organe de chaque sous-système.
- Etudes des effets et présentation des résultats dans un tableau.

#### **I.11.1.1 Elaboration de l'AMDE**

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse de système utilisée pour l'étude systématique des causes et des effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système. Plus généralement, l'AMDE permet :

- d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur les différentes fonctions de système.
- d'identifier les modes de défaillance ayant d'importants effets sur la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité ou la sécurité....de ce système.

On distingue quatre principales étapes pour réaliser une AMDE :

- Définitions du système, de ses fonctions et de ses composants : cette méthode, comme toute autre méthode, nécessite dans un premier temps une définition du système à étudier et ses fonctions. Les divers états de fonctionnement du système doivent être établis. Il est également indispensable de définir les principales fonctions du système, les limites de fonctionnement du système dans son ensemble ainsi que celles de ses composants. Il faut aussi définir les spécifications relatives au fonctionnement du système et ses composants ainsi que celles relatives à l'environnement dans lequel le système et ses composants sont installés.

- Etablissement des modes de défaillances des composants et de leurs causes : on recense les modes de défaillance de chaque composant du système dans l'état de fonctionnement étudié pour le système. Le recensement doit être aussi complet que possible, l'analyse qui suit étant essentiellement fondé sur cette liste ; ainsi, en première analyse, des modes de défaillance plausibles ou potentiels seront identifiés. Il est nécessaire en même temps d'établir les causes possibles de chaque mode de défaillance. Certes, il n'est pas toujours facile de distinguer entre «modes de défaillance» d'un composant et « causes de défaillance» : c'est souvent un des premier obstacles rencontrés dans l'analyse. Pour aider à cette distinction, on peut dire que les modes de défaillance sont les effets de cause de défaillance sur les fonctions du composant ; les modes se définissent donc relativement aux effets sur le composant ou aux fonctions de celui-ci.

- Etudes des effets des modes de défaillance des composants : les effets de chaque mode de défaillance sur les fonctions du système ainsi que sur chacun de ses composants sont systématiquement étudiés et évalués. Ces effets sont décrits de façon aussi complète que possible, en supposant l'existence d'un seul mode de défaillance, tous les autres composants étant en fonctionnement ou en état de fonctionner.

- conclusions. Recommandations : les étapes précédentes ayant été achevées, l'analyste est alors en mesure d'en tirer les conclusions en relation avec les objectifs de l'étude et d'émettre toutes les recommandations utiles. La démarche que cette méthode et aboutit à des résultats intéressantes. Citons notamment :

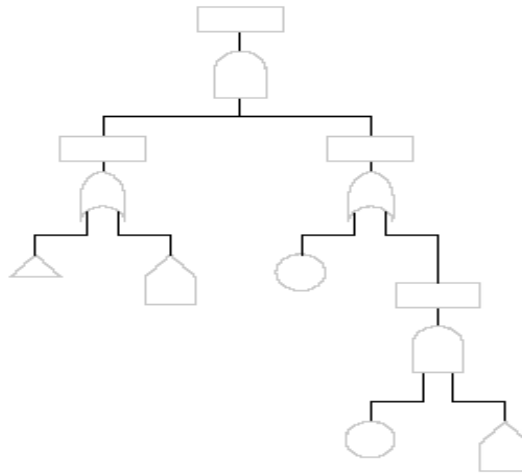
- L'assurance que tous les modes de défaillance concevables et leurs effets sur le fonctionnement du système ont été pris en compte au niveau de la conception.
- Le recensement des modes de défaillance suivant l'ampleur de leurs effets sur les fonctions du système.
- Identification des défaillances seconde, des besoins de redondance.
- L'établissement des modes de défaillance, de procédures de détections (alarmes, tests périodiques....) ; on peut ainsi juger si ces procédures sont bien adaptées.
- L'établissement pour chaque mode de défaillance, des procédures de maintenance, la maintenabilité des systèmes est donc étudiée.

### I.11.2 Arbre de défaillance (ADF)

La Méthode de l'Arbre de Défaillances (AdF) est née en 1961-62 dans les bureaux de la société Bell Téléphone. Développée par Watson pour évaluer et améliorer la fiabilité du système de lancement du missile «Minuteman », elle permet d'éliminer plusieurs points faibles de ce projet et son utilisation fut considérée comme un succès.

L'arbre de défaillance est une représentation graphique de type arbre généalogique. Il représente une démarche d'analyse d'événement. L'arbre de défaillance est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires, ou les combinaisons d'événements, qui conduisent à un **Événement Redouté (ER)**. L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un Événement Redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires. [16]

- A. **Principe** : Un arbre de défaillance représente de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'événements qui, dans certaines conditions produisent un événement donné, point de départ de l'étude. Construire un arbre de défaillance revient à répondre à la question « comment tel événement peut-il arriver ? », ou encore « quels sont tous les enchaînements possibles qui peuvent aboutir à cet événement ? ».
- B. **Caractéristique** : Un arbre de défaillance est généralement présenté de haut en bas. La ligne la plus haute ne comporte que l'événement dont on cherche à décrire comment il peut se produire. Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant la combinaison ou les combinaisons susceptibles de produire l'événement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées. Ces relations sont représentées par des liens logiques OU ou ET.
- C. **Objectifs** : L'objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié.
- D. **Présentation** : L'arbre de défaillance est une méthode qui part d'un événement final pour remonter vers les causes et conditions dont les combinaisons peuvent le produire. Il vise à représenter l'ensemble des combinaisons qui peuvent induire l'événement étudié d'où sa représentation schématique donnée à titre d'exemple figure I.6.



**Figure I.6** Arbre de défaillance

La méthode de l'arbre de défaillance a pour objectif le recensement de toutes les causes, de tous les défauts (et leurs combinaisons) entraînant l'apparition d'un événement indésirable. Elle permet donc d'identifier les points faibles de la conception. Elle constitue également un moyen de représentation de la logique des défaillances. Notons l'existence de nombreux programmes informatiques de calcul associés à cette méthode un élément qui favorise son utilisation.

## Conclusion

L'AMDE a l'objectif d'identifier les modes de défaillances ayant d'importants effets sur la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité ou la sécurité de ce système. Aussi qu'évaluer les effets de chaque mode des composants sur les différentes fonctions de ce système. Cette méthode n'est pas bien adaptée aux projets en temps réel puisque elle ne permet pas de bien appréhender l'aspect temporel des scénarios, mais elle reste une méthode qui fournit :-Une autre vision du système,- des supports de réflexion, de décision et d'amélioration, des informations à gérer au niveau des études de sûreté de fonctionnement et des actions à entreprendre.

L'arbre de défaillance est une des représentations de plus en plus utilisée de la logique d'un système .Elle est connue aussi sous les noms d'arbre des défauts, d'arbre des causes ou d'arbre des fautes. On part d'un événement indésirable unique et bien défini qui correspond au non fonctionnement d'un système et l'arbre de défaillance représentera graphiquement les combinaisons d'événements qui conduisent à la réalisation de cet événement indésirable (méthode déductive).



# Chapitre II

## **Les convertisseurs statiques**

# Chapitre II

## Les convertisseurs statiques

### II.1 Introduction

L'électronique de puissance est une discipline qui traite de la conversion ou de l'adaptation de l'énergie, cette énergie est souvent disposée sous deux formes:

- La forme alternative (valeur moyenne nulle)
- La forme continue (valeur moyenne différente de 0)

On a besoin d'un convertisseur ou d'un adaptateur d'énergie pour quitter d'une forme à une autre.

On distingue ainsi:

- Les convertisseurs AC-DC: redresseurs
- Les convertisseurs AC-AC: gradateurs
- Les convertisseurs DC-DC: hacheurs
- Les convertisseurs DC-AC: onduleurs

Dans ce chapitre, nous commençons par une généralité sur l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques, les composants semi-conducteurs, après ça en décrit le principe de fonctionnement de l'onduleur, ces types, et finalement les stratégies de commande.

### II.2 Généralité sur l'électronique de puissance

L'électronique de puissance répond encore à plusieurs acceptations dans le monde technique. Il peut s'agir de la forme moderne de l'électrotechnique quand le propos concerne la commande de moteur par exemple. L'électronique de puissance fait également référence à l'ensemble des concepts, techniques et méthodologies relatifs à la conversion statique de l'électricité. L'électronique de puissance est un domaine scientifique et technique vaste, en mutation perpétuelle et inscrit au cœur de l'enjeu sociétal sur la transition énergétique comme celui de la société numérique. [17]

## II.3 Etat de l'art sur les semi-conducteurs de puissance

Pour modifier, avec un bon rendement, la présentation de l'énergie électrique, les convertisseurs statiques utilisent des semi-conducteurs de puissance fonctionnant en commutation, faire fonctionner des semi-conducteurs en commutation signifie qu'on leur demande l'opérer par tout ou rien, comme des interrupteurs mécaniques. On utilise d'ailleurs pour ces composants électroniques le vocabulaire des interrupteurs mécanique et dans les schémas de principe, on les représente par des interrupteurs c'est ainsi qu'on trouve :

- Un composant non commandable : la diode.
- Un composant commandable seulement à la fermeture : le thyristor.
- des composants commandables à la fermeture et à l'ouverture :
  - Le thyristor à ouverture commandée (GTO).
  - Le transistor bipolaire (BJT).
  - Le transistor (MOS) de puissance.
  - Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT). [18]

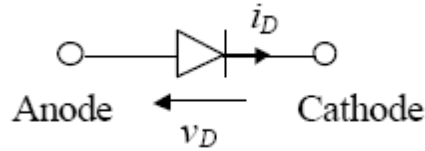
### II.3.1 Les diodes

La diode à jonction P-N est formée d'une pastille de silicium deux couches, celle de type P est reliée à l'anode A, celle du type N à la cathode K.

La diode est un composant non commandable, son comportement lui est imposé par le circuit dans lequel est insérée.

Quand ce circuit veut lui imposer le passage d'un courant dans le sens positif, elle laisse passer ce courant avec une faible chute de tension positive à ses bornes : elle est passante ou fermée. Figure II.1

Quand le circuit extérieur lui impose une chute de tension négative, elle est bloquée ou ouverte ; le courant négatif ou courant de fuite inverse est très faible par rapport au courant direct qu'elle peut écouler lorsqu'elle est passante [19] [20].



**Figure. II.1** : Représentation symbolique D'une diode réelle.

### II.3.2 Les thyristors

Le thyristor ou SCR (silicon controlled rectifier) est un semi-conducteur à fermeture commandée. Outre l'anode A et la cathode K (figure a), il possède un électrode de commande, la gâchette (gâte) G qui permet de le rendre conducteur lorsque la tension  $V_T$  à ses bornes est positive.

Cette possibilité de commande a fait du thyristor le moteur de l'essor de l'électronique de puissance, mais si à la fin de son intervalle de conduction son ouverture n'est pas spontanée, le thyristor nécessite pour son blocage un circuit auxiliaire d'extinction. Aussi dans les convertisseurs qui nécessitent des interrupteurs à fermeture et ouverture commandables il est maintenant remplacé par d'autres composants.

### II.3.3 Les thyristors GTO

Le thyristor GTO (gâte turn-off) est, comme son nom l'indique, un thyristor qui peut être bloqué par action sur la gâchette .celle-ci permet donc la commande de la fermeture et de l'ouverture.

L'ouverture, grâce à une énergie d'extraction du courant par la gâchette, est notamment rendue possible par la division de la couche de la cathode en plusieurs centaines de petits bâtonnets entièrement entourés par la gâchette. Le GTO équivaut à plusieurs centaines de petits GTO mis en parallèle.

Les thyristors GTO sont utilisés dans les convertisseurs de moyenne, forte ou très forte puissance :

- dans les onduleurs de courant : ils ont à bloquer des tensions inverses. On utilise alors des GTO symétriques ayant une Caractéristique statique à 3 segments.
- dans les onduleurs de tension et la plupart des hacheurs, les GTO ont des diodes en parallèle inverse à leurs bornes. Ils n'ont pas à bloquer de tension inverse notable et on utilise alors des GTO asymétriques. [19]

### **II.3.4 Transistor**

C'est un composant unidirectionnel, commandable à l'ouverture et à la fermeture. Les transistors nécessitent une commande permanente pour la conduction. [18]

#### **II.3.4.1 Transistor bipolaire**

C'est un élément relié à une source d'énergie locale. Il reçoit un signal d'entrée et fournit un signal de sortie. C'est un dispositif comprenant trois couches semi-conductrices séparées par deux jonctions. Les trois couches sont appelées :

- Collecteur (C);
- Emetteur(E);
- Base (B).

#### **II.3.4.2 Transistor MOS**

Le Transistor à Effet de Champ à Métal Oxyde Semi-conducteur (MOSFET : Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor) a sa grille isolée du canal par une couche de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).

Il possède trois électrodes nommées Grille (Gate), Drain et Source. Contrairement au transistor bipolaire qui se commande en courant, le transistor MOS se commande en tension. Le courant dans la Grille est nul en fonctionnement statique. [19][20]

### **II.4 Choix des composants**

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors

MOSFET, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible.

Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais d'avantage plus puissants (quelques kHz à une dizaine de kW). Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 kHz à une des dizaines de kW). Les thyristors GTO commutent très lentement les grandes puissances. Ces composants sus indiqués sont du type commandables à l'ouverture et à la fermeture; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique. Figure II.2 [21]

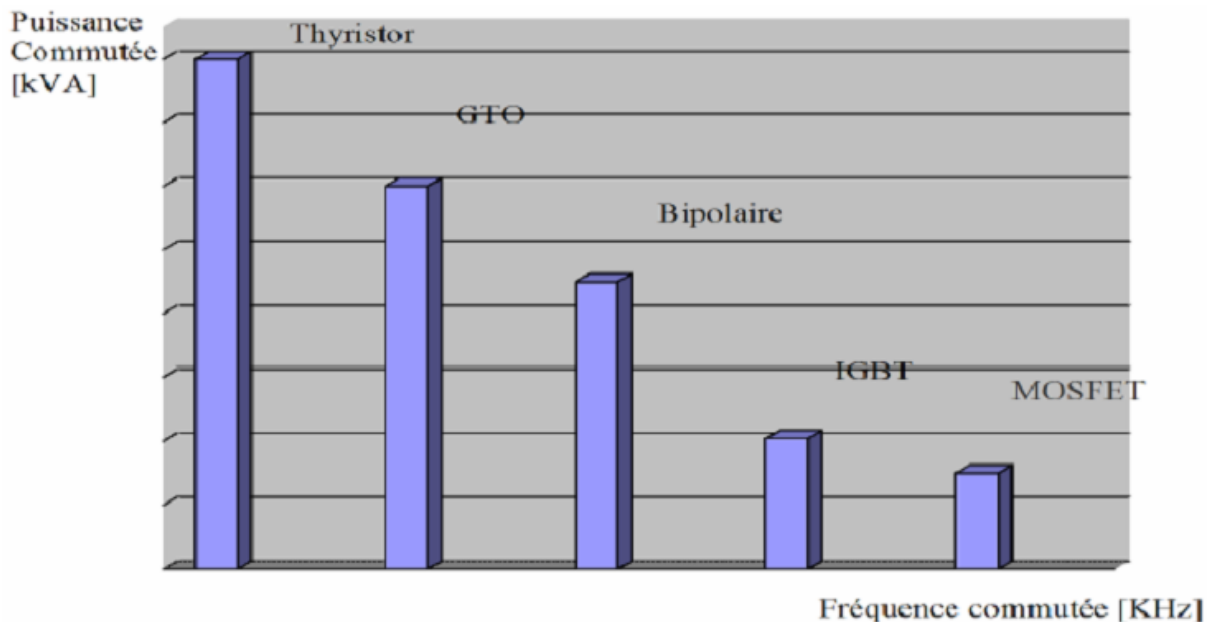


Figure II.2 : Choix des composants selon la puissance et la fréquence

## II.5 Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné.

Exemples :

- On trouve un convertisseur alternatif continu dans l'alimentation d'appareils électroniques (TV, ordinateurs, chargeurs de téléphones...) qui transforment la tension alternative sinusoïdale du réseau EDF en tension continue.

- Un onduleur de secours transforme la tension continue des batteries en tension alternative pour alimenter, par exemple, du matériel informatique. [18]

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques. Figure II.3

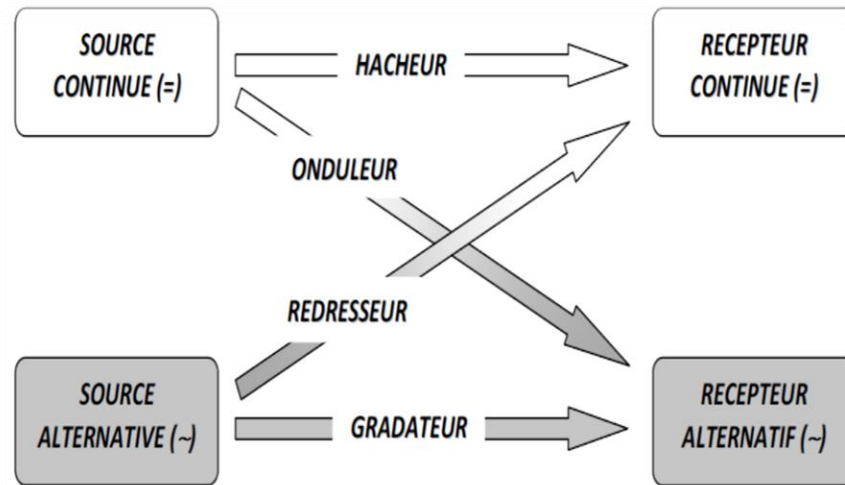


Figure II.3 : les familles de convertisseurs statiques.

### II.5.1 Conversion ALTERNATIF/ALTERNATIF : le GRADATEUR

Le gradateur est un montage qui permet de faire varier la valeur de la tension efficace aux bornes d'une charge telle qu'un moteur sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source.

Ce montage est très fréquent dans le domaine domestique, au niveau notamment des variateurs de lumière pour lampes halogènes. Figure II.4

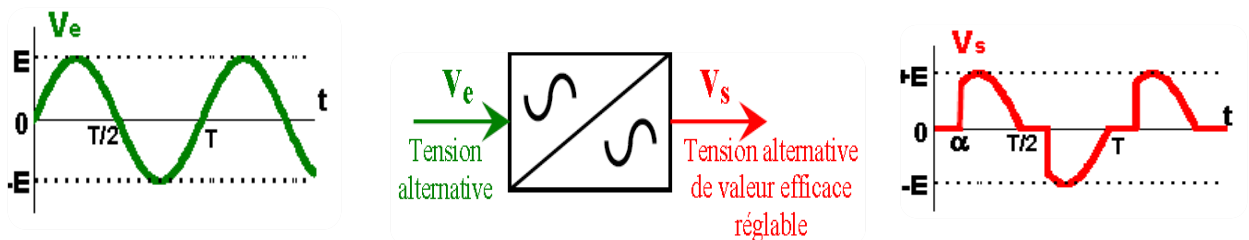


Figure II.4 : Schéma de conversion AC/AC

### II.5.2 Conversion CONTINU/ CONTINU: le HACHEUR

Le hacheur permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe.

Cette source peut être par exemple une batterie d'accumulateurs ou provenir d'une autre conversion préalable comme un redresseur à diodes.

On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs électroniques.

Figure II.5

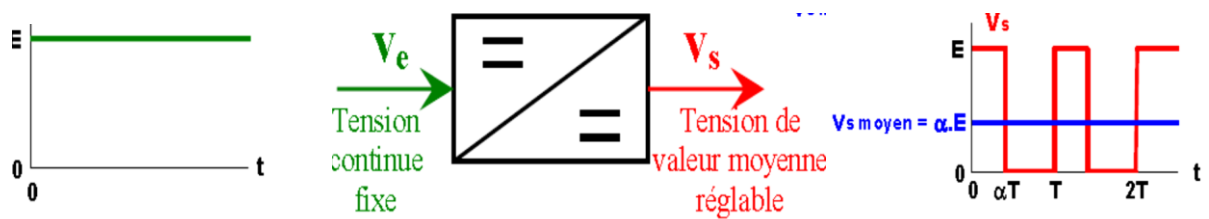


Figure II.5 : Schéma de conversion DC/DC

### II.5.3 Conversion ALTERNATIF/ CONTINU: le REDRESSEUR

Le redressement est la conversion d'une tension alternative en une tension continue.

On l'utilise pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif. Figure II.6

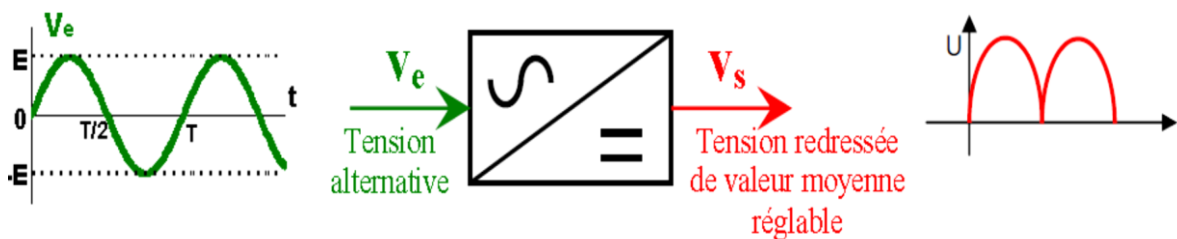


Figure II.6 : Schéma de conversion AC/DC



## II.5.4 Conversion CONTINU /ALTERNATIF : ONDULEUR

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue. Figure II.7

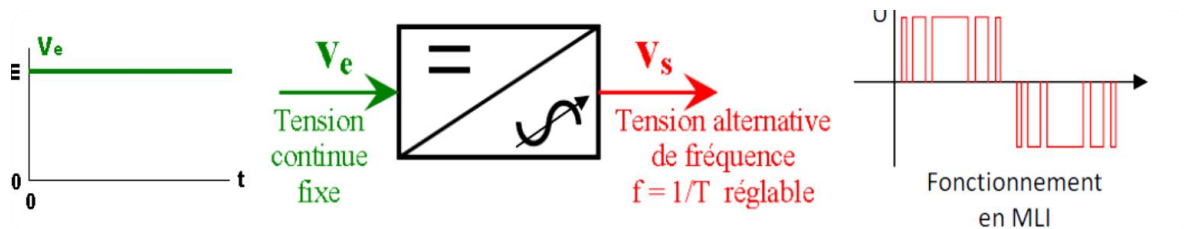


Figure II.7 : Schéma de conversion DC/AC

## II.6 Généralité sur l'onduleur

### II.6.1 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Figure II.8

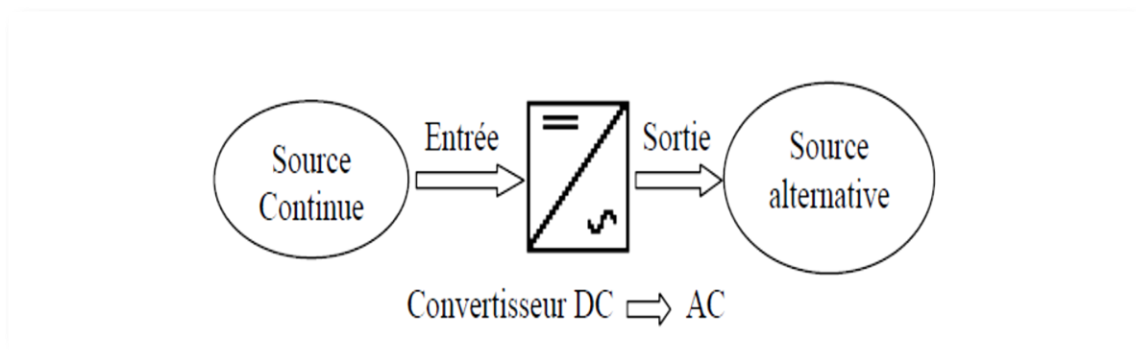


Figure II.8 : Schéma de principe de la conversion Continu-Alternative (DC-AC)

## II.6.2 Classification des onduleurs

### II.6.2.1 Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes. [22][25]

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

### II.6.2.2 Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cycloconvertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO. [23], [24].

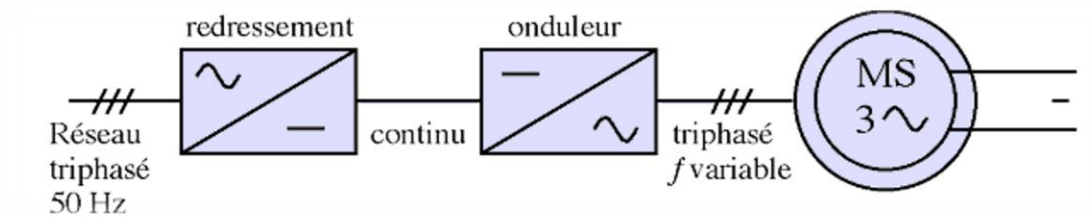
## II.6.3 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe débouclé actuel des onduleurs autonomes. [22], [25].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcées : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

### II.6.3.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

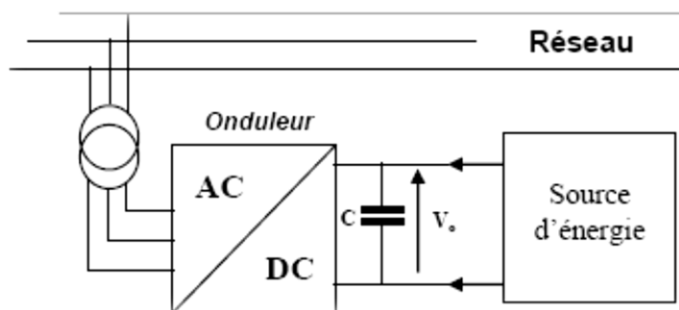
La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée. Figure II.9



**Figure II.9 :** Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

### II.6.3.2 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur. Figure II.10 [23]



**Figure II.10:** Alimentation de secours.

### II.6.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence. Figure II.11

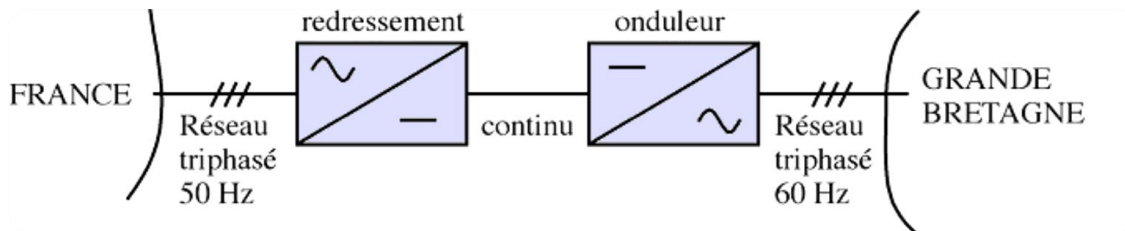


Figure II.11: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

## II.7 Déférénts types d'onduleurs

### II.7.1 Onduleur de tension

On appelle onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue. Nous présentons le principe des onduleurs de tension dans le cas où la sortie est monophasée et utilisons l'onduleur en pont à quatre interrupteurs : K1, K2, K1' et K2'.

La Figure II.12 représente le circuit de puissance d'un onduleur (pont monophasée) et la Figure II.13 représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :

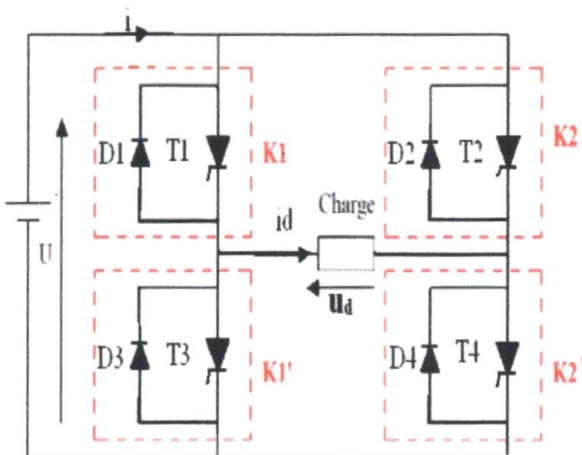


Figure II.12 : Onduleur de tension en pont Monophasé

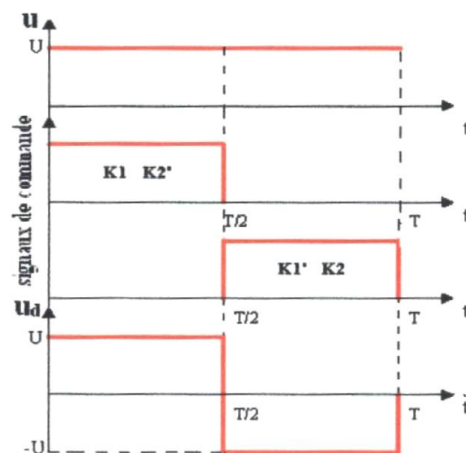


Figure II.13 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $U_d(t)$  comme suit: Si la tension d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $U$ , quelque soit  $I$  on a :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs,  $K1, K2'$  sont fermés, et  $K2, K1'$  sont ouverts.

D'où:  $U_d = +U$

- Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs,  $K2, K1'$  sont fermés, et  $K1, K2'$  sont ouverts.

D'où:  $U_d = -U$

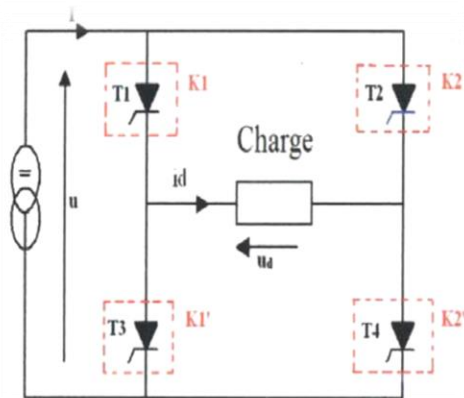
Le courant de la sortie est donc le courant  $I$  à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternative.

Notant que les interrupteurs  $K_i$  de l'onduleur; Figure II.8 sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur  $T_i$  commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode  $D_i$ .

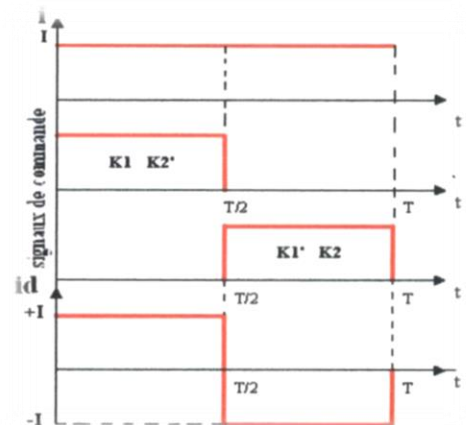
Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie [23], [24].

### II.7.2 Onduleur de courant

On appelle onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continue. Comme exemple, on prend le montage de la figure II.14 illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance  $K1, K2, K1'$  et  $K2'$ , sur La Figure 1.15 sont représentés les signaux de commande et les formes d'ondes des courants correspondants [23], [24].



**Figure II.14 :** Onduleur de courant en pont monophasé.



**Figure II.15:** Signaux de commande et forme d'onde des courants.

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $i_d(t)$ . Si le courant d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $I$ , quelque soit  $U$ :

- Pour  $0 < t < T / 2$  : les interrupteurs,  $K1, K2'$  sont fermés, et  $K2, K1'$  sont ouverts

D'où :  $i_d = +i$

- Pour  $T / 2 < t < T$  : les interrupteurs,  $K2, K1'$  sont fermés, et  $K1, K2'$  sont ouverts

D'où :  $i_d = -i$

La tension  $U_d(t)$  de la sortie est donc la tension  $U$  à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le coté alternatif. Dans ce cas; l'interrupteur est formé d'un semi conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle, [23], [24].

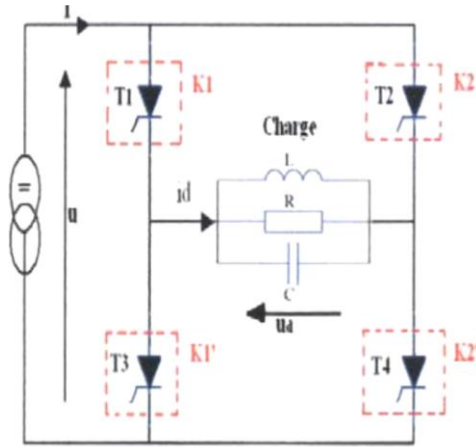
Parmi les onduleurs de tension ou de courant, on trouve aussi les onduleurs à résonances :

### II.7.3 Onduleur à résonance

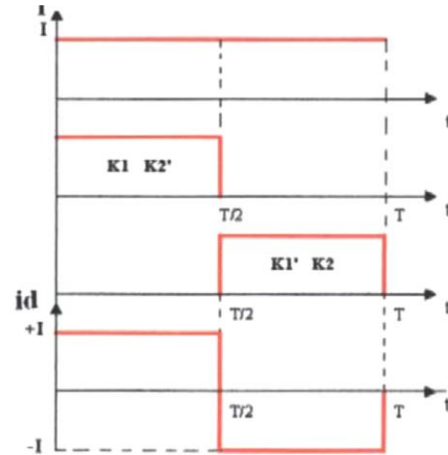
Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut command les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance [23], [24], [25].

#### II.7.3.1 Onduleur à résonance parallèle

Ce dernier débite sur un circuit RLC résonnant parallèle peu amorti comme l'illustre la Figure II.16 suivant :



**Figure II.16 :** Onduleur à résonance parallèle (Monophasée)

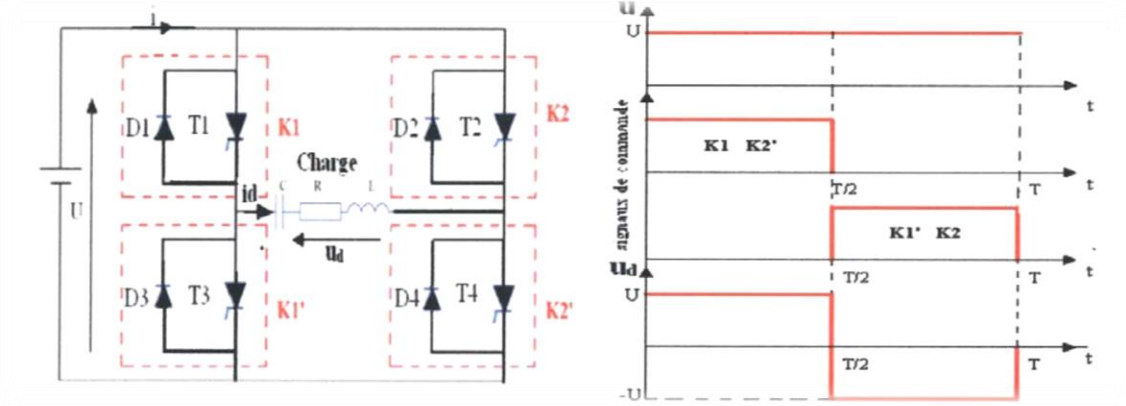


**Figure II.17 :** Signaux de commande et forme d'onde des courants

Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension; donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de courant, dont la Figure II.17 donne les signaux de commande et les formes d'ondes des courants [23], [24], [25].

### II.7.3.2 Onduleur à résonance série

Celui-ci débite sur un circuit RLC résonant série peu amorti la Figure II.18 dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant  $I$ , donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de tension. La Figure II.19 représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :



**Figure II.18 :** Onduleur à résonance série (Monophasée)

**Figure II.19 :** Signaux de commande et forme d'onde des tensions

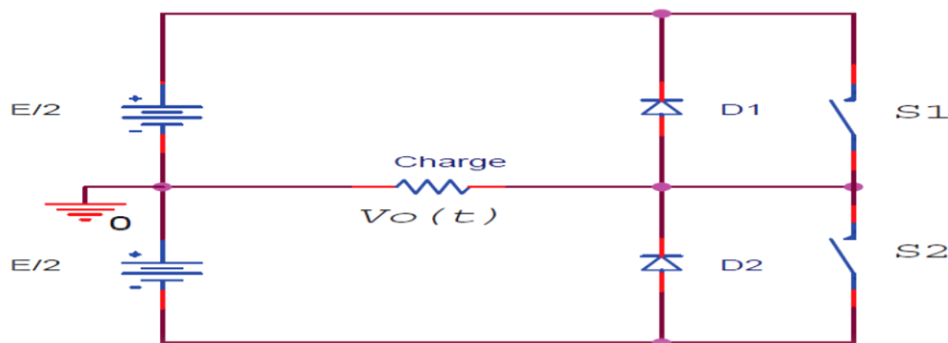
## II.8 Structure d'onduleur

### II.8.1 Onduleur monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

#### II.8.1.1 Onduleur monophasé en demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure II.20



**Figure II.20:** Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.



Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle ( $180^\circ$ ) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur S1, la tension aux bornes de la charge serait donc de  $+ E/2$ , et prend la valeur  $- E/2$  quand le second interrupteur, S2 est fermé.

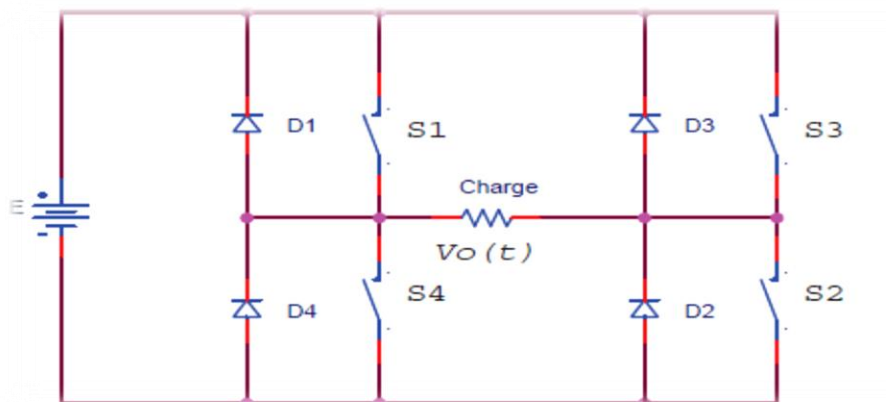
La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance (temps de montée  $t_r$ , temps de descente  $t_f$  et temps de stockage  $t_s$ ).

Les diodes D1, D2, dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge. [26]

### II.8.1.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H)

L'onduleur en pont est représenté en figure II.21 il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S1, S2, S3 et S4 quand les interrupteurs S1 et S2, sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur  $+ E$ , et de  $-E$  lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S3 et S4.

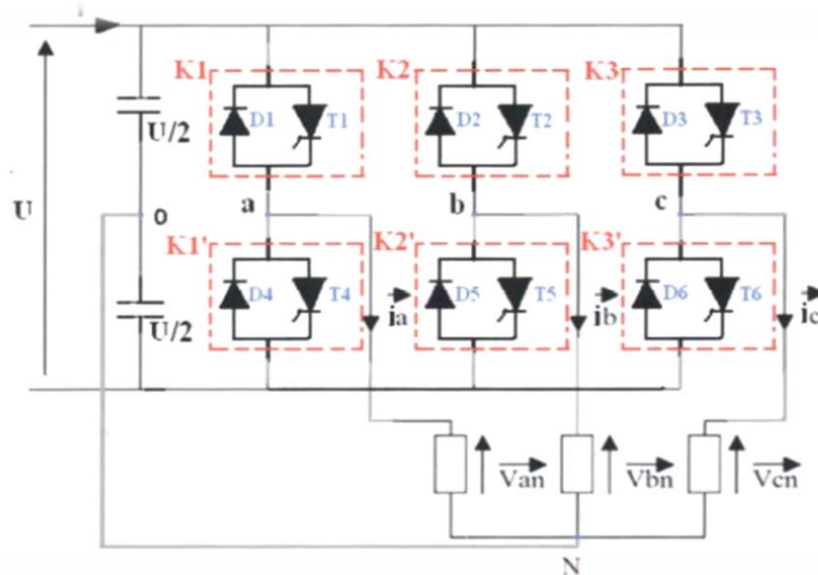
Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue. [27]



**Figure II.21:** Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont.

## II.8.2 Onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la Figure II.22 dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue  $U$  ne soit jamais en court circuit et pour que les circuits des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant. [23], [24], [25].



**Figure II.22 :** Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé

### II.8.2.1 Le fonctionnement conventionnel

On peut commander l'onduleur de manière que :

- Chaque interrupteur conduit durant  $120^\circ$ .
- Chaque interrupteur conduit durant  $180^\circ$ .

On va se limiter à l'étude seulement de cette dernière, c'est-à-dire la commande en pleine onde (180°), dont, les intervalles de commande de fermeture de chaque interrupteur sont définis comme suit:

- K1 est fermé pour :  $0 < \omega t < \pi$
- K2 est fermé pour :  $2\pi / 3 < \omega t < (2\pi / 3) + \pi$
- K3 est fermé pour :  $4\pi / 3 < \omega t < (\pi / 3) + \pi$
- K1' est fermé pour :  $\pi < \omega t < 2\pi$
- K2' est fermé pour :  $(2\pi / 3) + \pi < \omega t < (2\pi / 3) + 2\pi$
- K3' est fermé pour :  $(4\pi / 3) + \pi < \omega t < (\pi / 3) + 2\pi$

Si les courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  sont sinusoïdaux et forment un système triphasé équilibré, alors :

$$I = I_2 \sin(\omega t - \phi) \text{ a}$$

$$i = I_2 \sin(\omega t - \phi - 2\pi / 3) \text{ b}$$

$$i = I_2 \sin(\omega t - \phi - 4\pi / 3) \text{ c}$$

Avec  $I$  : la valeur efficace du courant de sortie de l'onduleur, et cette commande, quelque soit les courants circulants, les interrupteurs imposent les tensions suivantes :

Tension entre a, b, c et 0 (neutre) :

$$V_{a0} = V_a - V_0 = \begin{cases} +\frac{U}{2} & \text{Si K1 est fermé.} \\ -\frac{U}{2} & \text{Si K'1 est fermé.} \end{cases}$$

$$V_{b0} = V_b - V_0 = \begin{cases} +\frac{U}{2} & \text{Si K2 est fermé.} \\ -\frac{U}{2} & \text{Si K'2 est fermé.} \end{cases}$$

$$V_{c0} = V_c - V_0 = \begin{cases} +\frac{U}{2} & \text{Si K3 est fermé.} \\ -\frac{U}{2} & \text{Si K'3 est fermé.} \end{cases}$$

Les tensions simples  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  :

Si la charge est équilibrée et couplée en étoile: la somme des courants de ligne est nulle, ce qui implique que la somme des tensions simples est égale à zéro, donc:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

A partir des relations précédentes, on tire:

$$V_{an} = \frac{1}{3}\{2(V_a - V_0) - (V_b - V_0) - (V_c - V_0)\}$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3}\{2(V_b - V_0) - (V_a - V_0) - (V_c - V_0)\}$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3}\{2(V_c - V_0) - (V_b - V_0) - (V_a - V_0)\}$$

$$V_n - V_0 = \frac{1}{3}\{2(V_a - V_0) - (V_b - V_0) - (V_c - V_0)\}$$

- Tension composée  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  :

On déduit les tensions composées entre les bornes de sortie de l'onduleur, tel que :

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

De ces équations on tire :

$$V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ac}) = \frac{1}{3}(2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0})$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) = \frac{1}{3}(2V_{b0} - V_{a0} - V_{c0})$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) = \frac{1}{3}(2V_{c0} - V_{a0} - V_{b0})$$

Les courants dans les interrupteurs se déduisent des courants de sortie  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  tel que :

$i_{K1} = i_a$	$i_{K1}' = 0$	Quand K1 est fermé
$i_{K1} = 0$	$i_{K1}' = -i_a$	Quand K1' est fermé
$i_{K2} = i_b$	$i_{K2}' = 0$	Quand K2 est fermé
$i_{K2} = 0$	$i_{K2}' = -i_b$	Quand K2' est fermé
$i_{K3} = i_c$	$i_{K3}' = 0$	Quand K3 est fermé
$i_{K3} = 0$	$i_{K3}' = -i_c$	Quand K3' est fermé

Et le courant fourni par la source  $i$  est donnée par :

$$i = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} .$$

## II.9 L'onduleur multi-niveaux

### II.9.1 Définition

Un convertisseur statique est dit multi-niveaux lorsqu' il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux.

La réalisation d'un convertisseur multi- niveau consiste à employer un convertisseur de topologie plus complexe. Le terme multi-niveaux a été propose pour la première fois par Nabal à un onduleur à trois niveaux.

L'augmentation du nombre de source continu et par conséquent du nombre de niveaux contribue à rendre la forme de tension a la sortie du convertisseur plus proche de la sinusoïde avec un minimum de taux d'harmoniques, ce qui constitue un avantage déterminent.

### II.9.2 Intérêt des onduleurs multi-niveau

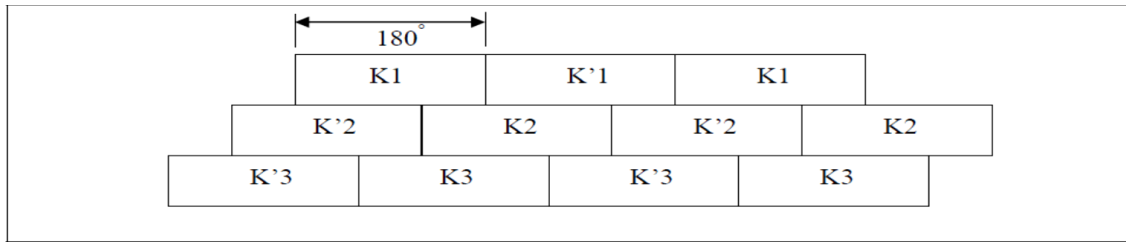
Ce type de convertisseurs présente essentiellement deux avenage .d'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les intercepteurs de puissance : chaque composante, lorsqu' il est a l'état bloque, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continue que le nombre de niveaux est élevé ; d'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales.

### II.9.3 Stratégies de commande

#### II.9.3.1 La commande 180°

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°, Figure II.23. Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période.

Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$  par rapport au premier bras [22], [25].

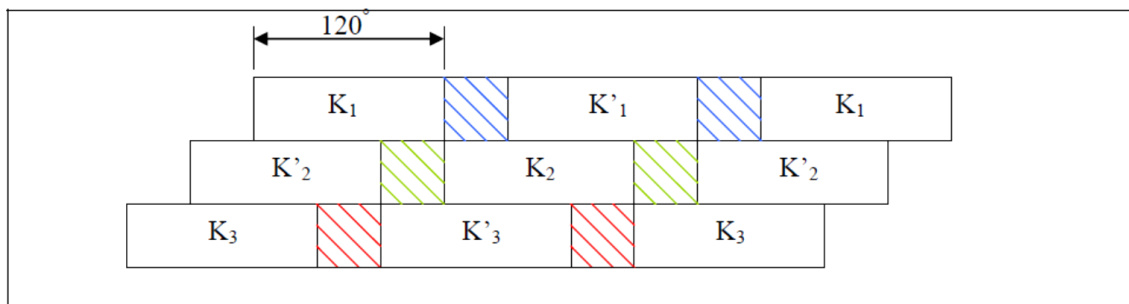


**Figure II.23 :** Commande  $180^\circ$

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

### II.9.3.2 La commande $120^\circ$

Dans ce cas la Figure II.24, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type  $120^\circ$ .



**Figure II.24:** Commande  $120^\circ$

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant  $120^\circ$ , telle que la séquence est  $K_1$ ,  $K_2$  puis  $K_3$  successivement. De même pour les interrupteurs  $K'_1$ ,  $K'_2$  et  $K'_3$  avec un décalage de  $60^\circ$  par rapport à  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ .

### II.9.3.3 Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce la on fait appel à la technique de modulation

de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple [23], [24].

En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle :

#### **II.9.3.3.1 MLI naturelle (sinus-triangle)**

##### **a) Définition et modélisation**

La technique de la MLI naturelle repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier qui est appelé signal de référence (Modulatrice) représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse (Triangulaire) définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence (HF) par rapport au signal de référence.



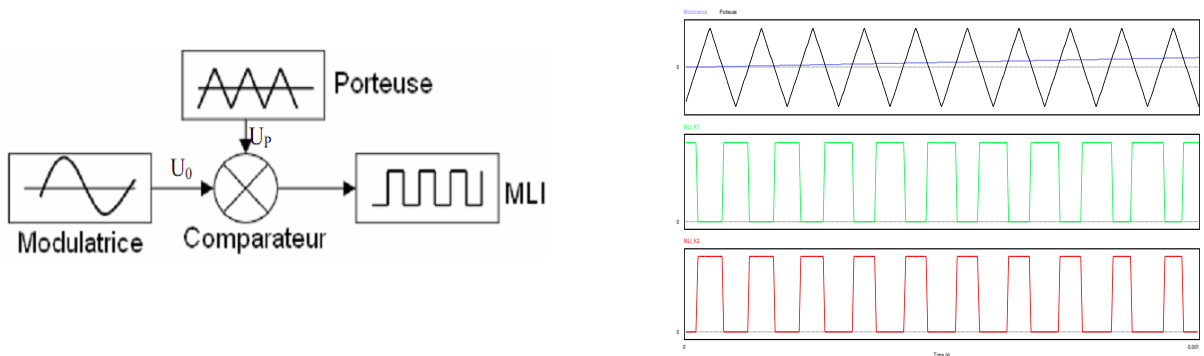
Pour une référence sinusoïdale, deux Paramètres suffisent pour caractériser la commande :

- L'indice de modulation ( $m$ ), égal au rapport  $f_p/f$  des fréquences de modulation et de références.
- Le coefficient de réglage en tension ( $r$ ), égal au rapport de l'amplitude de la référence à la valeur de Crête de modulation ( $V_m/V_{mp}$ ).

$m = \frac{f_p}{f}$  : Rapport de la fréquence de la porteuse sur celle de référence (indice de modulation).

$r = \frac{V_m}{V_{mp}}$ : Coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

Le schéma synoptique correspondant à la génération des impulsions par MLI est donné par la figure II.25 qui consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdale (modulatrice). [22]



**Figure II.25** principe de commande MLI

Pour commander chaque bras, nous comparons le signal de référence (modulante) à un signal triangulaire (porteuse) de fréquence élevée, et les signaux de référence sont définies par :

$$V_{ref} = r \sin(2\pi ft - 2(j - 1) \frac{\pi}{3}) \quad (j=1, 2,3)$$

L'équation de la porteuse sur une période est donnée par :

$$V_p = \begin{cases} \frac{4t}{T_p} - (4n + 1) & \text{si } nT_p < t < (2n + 1) \frac{T_p}{2} \\ \frac{-4t}{T_p} + (4n + 3) & \text{si } \frac{(2n+1)}{2} T_p < t < (n + 1) T_p \end{cases}$$

Ou :  $T_p = \frac{1}{f_p}$  .

### b) Objectif de la technique

Les objectifs principaux d'une MLI sinus-triangle sont les suivants :

- Obtenir dans la charge électrique des courants dans la variation est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie
- Imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamentale des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sorties larges variable.
- Elimination de certaines harmoniques de tension.
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus hautes.

#### II.9.3.4 Modulation vectorielle (SVM)

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones.

En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension.

Dans notre étude et simulation on va utiliser la commande MLI naturelle (sinusoïdale).

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur les onduleurs, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement, leurs principales applications et nous avons présenté les différentes structures des onduleurs.

Nous avons fait l'étude des onduleurs de tension triphasée et leur fonctionnement conventionnel. Ainsi que les onduleurs multi-niveaux, les différentes stratégies de commande.

# Chapitre III

## **Application des méthodes de SDF sur l'onduleur**

## Chapitre III

# Application des méthodes de SDF sur l'onduleur

### III.1 Introduction

Pour qu'un système électrique soit fiable, il faut l'amener à la tolérance de panne, pour cela il faut savoir les défauts qui peuvent engendrer chaque élément en générale, et dans le système selon leur emplacement, pour cela il faut établir une étude sur les modes de défaillances, les causes et les répercussions ; dans notre cas on va faire une étude brève des modes de défaillances qui peuvent engendrer un onduleur.

Les défauts des composants semi-conducteurs de puissance sont soumis à des niveaux élevés de sollicitations fonctionnelles et environnementales hostiles (cyclage thermique, contraintes thermomécaniques...etc.), ces dernières ne font qu'accélérer les mécanismes de dégradation. Et dans la partie commande, la présence des signaux parasites à la sortie du système de commande peut avoir des conséquences néfastes sur le fonctionnement, la qualité du signal de sortie, et pour les cas extrême peut même amener à la destruction des intercepteurs de puissances connectés à la commande défaillante.

Au niveau du convertisseur, ces défaillances apparaissent soit sous forme de circuits ouverts (C-O) soit de courts-circuits(C-C).

Ce chapitre est dédié pour l'étude des modes des défaillances de l'onduleur, mentionnant les plus fréquents et néfastes. Afin d'analyser les conséquences qui peuvent entraîner l'onduleur et d'évaluer sa disponibilité nous allons lui appliquer les deux méthodes d'analyse (AMDE, ADF). Puis nous étendons l'étude on lui applique la topologie du convertisseur qui doit faire apparaître des redondances ou bien un partitionnement pour pouvoir confiner le défaut et contenir ces effets.

## **III.2 Application des méthodes d'analyse de la sureté de fonctionnement**

### **III.2.1 L'analyse de mode de défaillance de leur effet (AMDE)**

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse systématique des causes de défaillance et de leurs effets sur un système. Cette méthode permet de faire apparaître, sous la forme d'un tableau, les relations de cause à effet relatives aux défauts et défaillances du système étudié dans son environnement. Les Combinaisons particulières de défauts conduisant à un effet majeur sont ainsi mise en évidence de façon systématique ; de même que la sensibilité de certains défauts sur l'intégrité du système. L'AMDE est généralement une méthode qualitative qui s'appuie sur la connaissance fonctionnelle et technologique d'un système ou sous-système. Elle part du défaut le plus particulier jusqu'à la défaillance la plus générale. Elle constitue, de fait, un point de passage obligé dans l'analyse prévisionnelle de la sûreté des systèmes que ce soit en phase d'expertise ou en phase de conception. L'AMDE implique une connaissance approfondie du système. [14]

#### **III.2.1.1 Application de l'AMDE**

La défaillance est très souvent "l'effet visible" ou "observable" d'un défaut. Le résultat de l'étude de l'AMDE que nous avons menée sur l'onduleur est présenté dans le tableau III.1 résumant les défauts (Circuit ouvert et Court-circuit) qui en découlent à chaque fois ; le mode de défaillance est analysé (cause, effet).

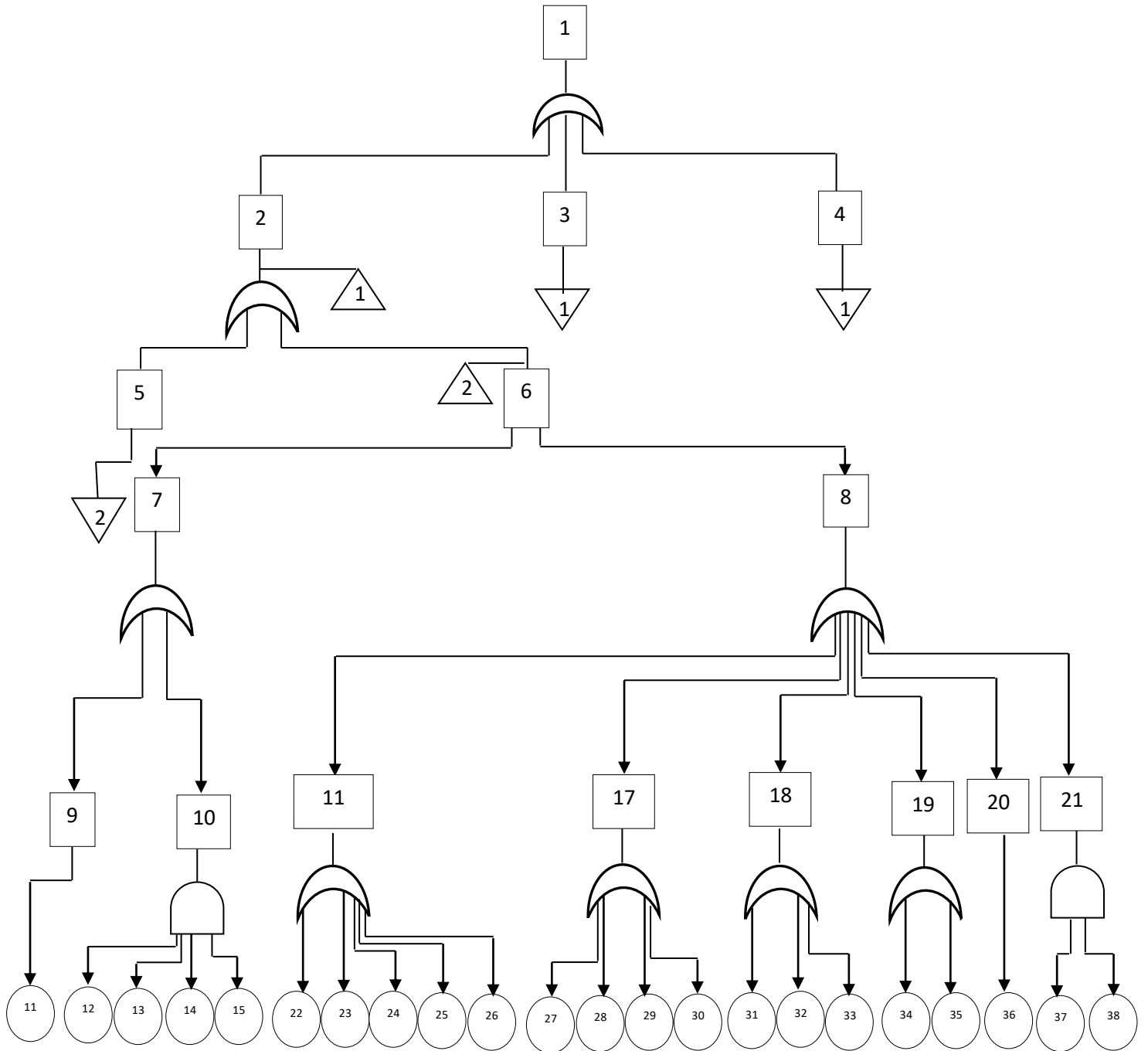
Elément	Fonction	Modes de défaillances	Couses	Effets
onduleur	Transformer l'énergie électrique continue en énergie électrique alternative	Circuit ouvert d'un IGBT ou plus	-Emballlement thermique -Défaut de commande -Fissuration de connexion avec le driver	Courant de phase mono alternance, ceci implique un régime dégradée, peut détruire les charge délicates connectée au l'onduleur
		Court-circuit d'un IGBT ou plus	-Défaut de commande (harmonique de signale MLI) -Claquage d'interrupteur de puissance due à la tension élevée entre ses bornes	Croissance de courant de phase brusquement, et l'emballement thermique des interrupteurs, dont la destruction des charges connectée, et la dernière étape de ce défaut et le circuit ouvert

**Tableau III.1:** L'AMDE d'une cellule de commutation

### III.2.2 L'arbre de défaillance (Adf)

#### III.2.2.1 Analyse qualitative

La démarche consiste à s'appuyer sur la connaissance des éléments constitutifs du système étudié pour identifier tous les scénarios conduisant à l'événement redouté. La figure III.1 représente l'arbre de défaillance construite de l'onduleur.



**Figure III.1 :** Construction de l'Arbre de Défaillance



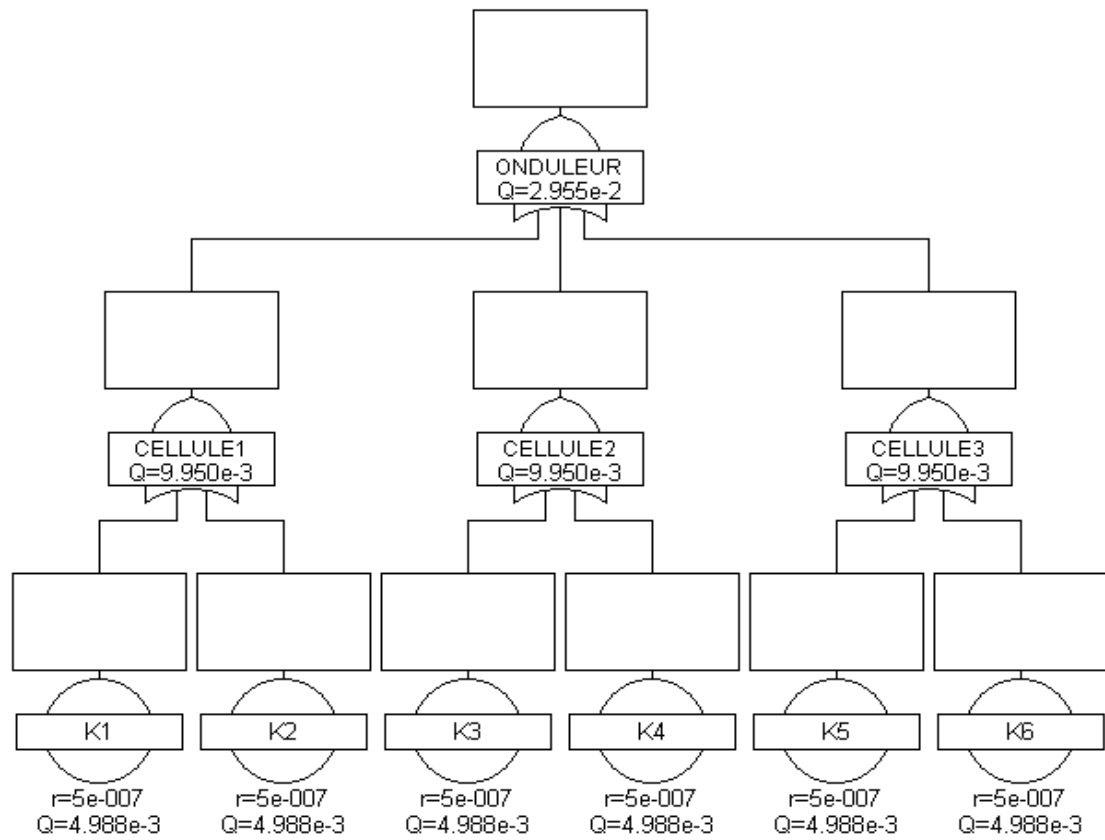
1	Arrêt de l'onduleur	20	Retournement statique ou Latch up
2	Défaut dans la cellule I	21	Retournement et avalanche dynamique
3	Défaut dans la cellule II	22	Défaut de commande
4	Défaut dans la cellule III	23	Echauffement
5	Défaut dans l'interrupteur I	24	Vieillessement
6	Défaut dans l'interrupteur II	25	Conduction en inverse
7	Défaut dans la diode	26	fort dv/dt
8	Défaut dans l'IGBT	27	dv/dt ou di/dt important
9	Court-circuit De la diode	28	Echauffement
10	Avalanche dynamique de la diode	29	Vieillessement
11	Surtensions inverses	30	Défaut de commande
12	Fort courant	31	Surintensité
13	Forte tension	32	Surtension
14	Haute température	33	Vieillessement
15	di/dt important	34	Surtension
16	Défaut d'ouverture dans l'IGBT	35	Claquage de la grille
17	Défaut de fermeture dans l'IGBT	36	Augmentation rapide de la densité de courant
18	Court-circuit physique	37	présence d'un fort courant dans la couche vitale du composant
19	Claquage par avalanche	38	présence d'une forte tension dans la couche vitale du composant

**Tableau III.2** : tableau de l'arbre de défaillance

### III.2.2.2 Analyse quantitative

Pour l'évaluation de la disponibilité, nous utilisons le logiciel FAULT TREE 11, (ISOGRAPH).

Figure III.2



**Figure III.2 :** L'arbre de défaillance pour un onduleur à deux interrupteurs par bras

### III.3 Les défaillances des composants et de la commande dans une stratégie de modulation M.L.I

Les défaillances des semi-conducteurs apparaissent sous formes de court-circuit (CC) ou de circuit ouvert (CO) [29]. Dans certains cas, le défaut circuit ouvert est l'ultime état de défaillance, pouvant apparaître après une défaillance en court-circuit. Ces derniers sont critiques, se propagent à travers tous les éléments de la chaîne, compromettent l'intégrité du convertisseur et de l'actionneur. Il est donc évident que l'électronique (de puissance ou de commande) soit la plus exposée et affectée par les contraintes d'usage, qu'elles soient d'ordre fonctionnelles ou environnementales. En conséquence, la fiabilisation du l'onduleur passe donc par celle des composants semi-conducteurs ainsi que des circuits auxiliaires de commande. Intéressons-nous alors à ces problématiques, de la défaillance de la commande à celle du composant.

#### III.3.1 Défaillance de l'électronique de commande

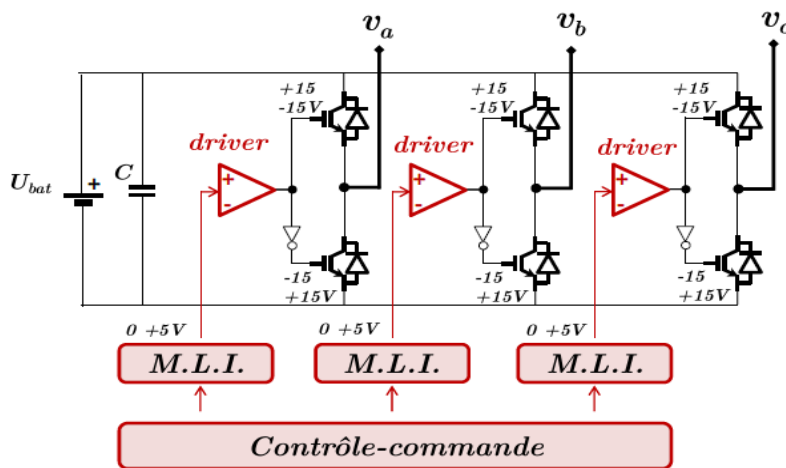
L'électronique de commande est l'élément matériel qui permet de traduire les ordres venant du système de contrôle au convertisseur (Figure III.1). Majoritairement, il s'agit d'un driver (ou allumeur) qui adapte les tensions de commande issues de la modulation (M.L.I.) (0V, +5V) aux tensions de grilles des composants semi-conducteurs (-15V, +15V).

Les deux interrupteurs de la même cellule sont commandés de façon complémentaire ; quand l'un est passant, l'autre est ouvert. Cette fonction est réalisée par le driver.

Généralement, la défaillance de la commande des interrupteurs de puissance est associée à la défaillance des circuits drivers [30]. Les défaillances les plus critiques sont celles liées aux problèmes de connexion entre le driver et la carte de commande (impulsion de commande parasite, rupture des liaisons avec la commande, ...), défaillance de la carte de commande et défaillance de l'alimentation des driver [31]. Elles apparaissent sous forme de deux modes de défaillances :

- le driver est toujours actif et sa tension de sortie reste figée à l'état +15V
- ou bien toujours inactif où sa tension de sortie -15V ou 0V

Du point de vue fonctionnel, l'apparition de ces anomalies peut avoir des effets néfastes sur tout le convertisseur. En effet, lorsque la sortie du driver est en permanence à l'état +15V, l'interrupteur reste donc à l'état passant. A ce moment, il peut y avoir un court-circuit de la cellule (et de la source de tension,  $U_{bat}$  sur la Figure III.3) si la voie de commande de l'interrupteur complémentaire reste intacte. Dans le cas contraire où la sortie du driver est toujours inactive, l'interrupteur concerné reste ouvert en permanence. On ne peut donc pas qualifier ce fonctionnement de défaut en circuit ouvert car la diode en antiparallèle (de roue libre) reste opérationnelle.



**Figure III.3** : Schéma d'un onduleur à trois cellules de commutation avec driver de ponts associés.

Néanmoins, l'industrie actuelle des circuits de commande (allumeurs ou drivers) a réalisé des avancées remarquables surtout dans le domaine de la détection précoce de la défaillance [32]. Sont proposés aujourd'hui des circuits "drivers" (allumeurs) «intelligents» capables de détecter rapidement les courts-circuits et d'envoyer un signal d'alarme au système de contrôle. Ces informations sont alors immédiatement exploitées pour la protection de l'équipement (confinement de défaut) et la reconfiguration pour une marche dégradée (continuité de service). Si de tels dispositifs améliorent la fiabilité du convertisseur, ils peuvent occasionner des pertes de performances en particulier dues aux retards de transmission des signaux.

### III.3.1.1 Les imperfections liées à la commande M.L.I

Les principaux problèmes des commandes M.L.I. sont liés en partie à la caractéristique de non-linéarité du convertisseur de puissance et aux perturbations de la commande de grille telles que la présence des délais de commutation, de temps de propagation de la commande et les chutes de tension aux bornes de la grille.

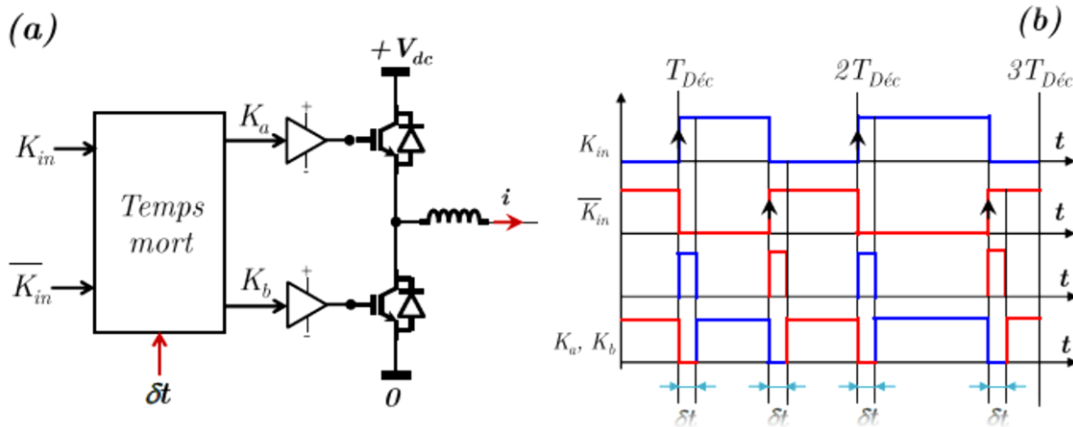
En réalité, le circuit de commande des semi-conducteurs (M.L.I + driver + grille du semi-conducteur) ne peut pas être assimilé à une source de tension idéale à deux états +15V et -15V. Il comprend plusieurs éléments parasites tels que des inductances, résistances ou capacités qui sont à l'origine des oscillations/perturbation des tensions de commande. De plus, ils induisent des retards dans la transmission des signaux de commande (contrôle au convertisseur) en raison de leur constante de temps des circuits qu'ils forment.

Du côté du convertisseur, la non-linéarité la plus désagréable est celle introduite par le temps mort ; temps qui sert comme protection contre le court-circuit de la source de tension [33].

### III.3.1.2. Temps morts et tensions parasites générées

Tous les semi-conducteurs de puissance commandés présentent des retards intrinsèques au blocage. C'est le cas, notamment, pour les composants bipolaires (GTO, I.G.B.T.,...). Ces temps de stockage de charges peuvent prendre des valeurs considérables, jusqu'à 10 $\mu$ s pour un GTO (Thyristor à extinction par la gâchette) par exemple. Ce temps dépend énormément des conditions de charge, de la température et de la commande [34]. Ce retard peut provoquer, lorsque les semi-conducteurs sont placés sur un bras d'onduleur, un court-circuit de la charge plus au moins long. Ce court-circuit peut être préjudiciable au bon fonctionnement du convertisseur et du système tout entier, d'où la nécessité de les éviter. Le principe utilisé pour remédier à ce problème est l'introduction dans la commande du convertisseur de temps morts fixes, l'extinction est alors immédiate et l'amorçage est retardé. La Figure III.3 montre les signaux de commande M.L.I. appliqués à une cellule de commutation pendant une période de découpage (TDéc), illustrant la durée de temps mort ( $\Delta t$ ) introduite pour prévenir les courts circuits. Le calcul de la durée du temps mort ( $\Delta t$ ) se fait dans les conditions les plus défavorables, augmentant ainsi la fiabilité du convertisseur. Elles sont de l'ordre de 1 à 10 $\mu$ s, variant selon le

type des composants semi-conducteurs utilisés, la tension de fonctionnement, l'architecture du convertisseur, les contraintes de l'application....etc.



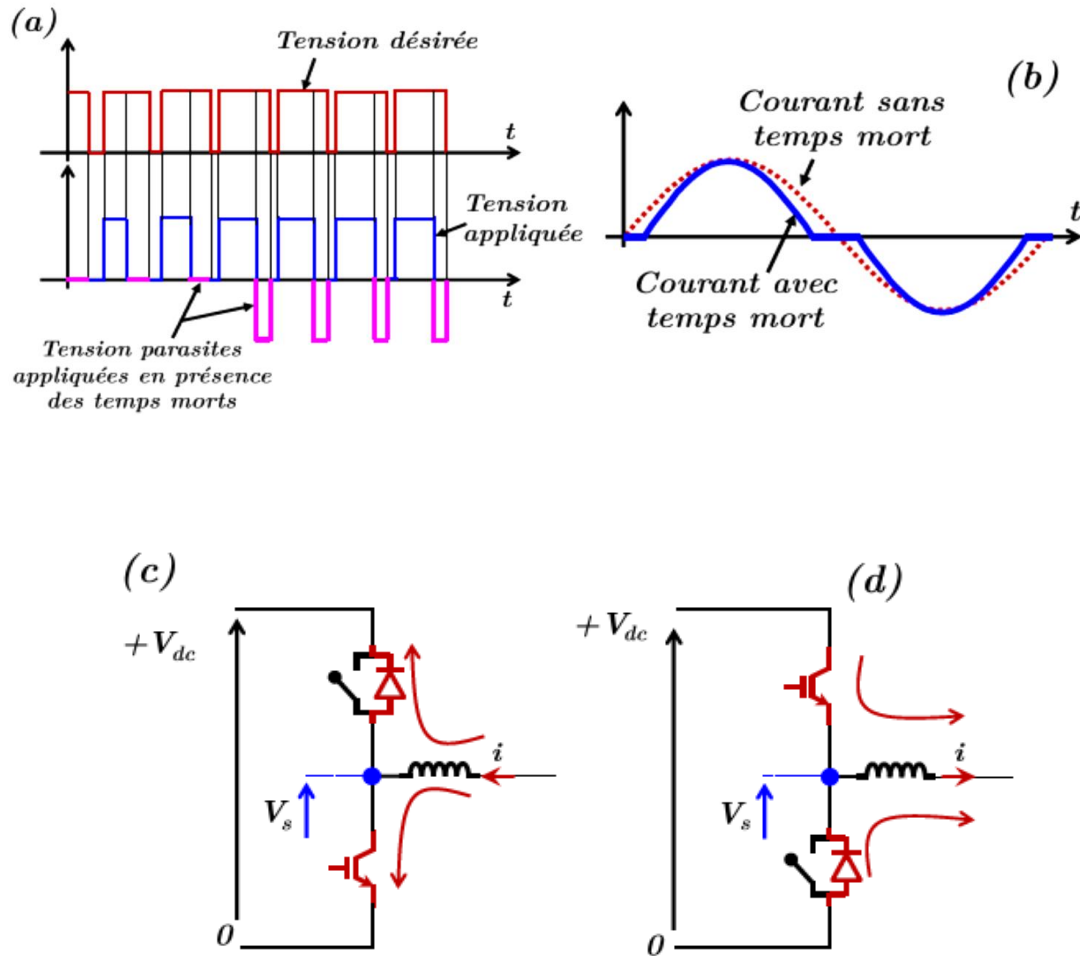
**Figure III.4 :** Signaux de commande d'une cellule de commutation avec une mise en jeu d'un temps mort ( $\lambda t$ ).

Bien que cette protection soit essentielle pour prévenir les courts-circuits de bras d'onduleur, elle provoque des distorsions des tensions de sortie de l'onduleur.

Dans les applications de traction utilisant une machine électrique, les anomalies dans les tensions appliquées à la machine entraînent des distorsions dans les formes d'ondes des courants de phase affectant ainsi le couple de la machine. En effet, pendant les courtes durées du temps mort des tensions indésirables (parasites) (Figure III.5- a) sont appliquées au bobinage moteur déformant alors la forme d'onde du courant de phase (Figure III.5-b) [35]. La tension de sortie de la cellule ( $V_s$  sur la Figure III.5-c) et les tensions parasites dépendent du signe du courant traversant la cellule. Suivant l'interrupteur marquant son temps mort, le courant peut mettre en conduction la diode en opposition ou bien passer à travers l'interrupteur complémentaire.

En plus, la déformation de la forme d'onde des courants n'affecte pas uniquement les performances de la chaîne de conversion mais aussi celles du système contrôle-commande puisque les valeurs des courants mesurés (feedback) sont, dans ce cas, erronées [33].

Plusieurs travaux existent dans la littérature et qui traitent de l'influence du temps mort et les méthodes de compensation. La majorité des travaux proposent d'agir sur le contrôle de la structure pour éliminer les effets du temps mort [33] [35]. La stratégie consiste à prendre en compte la durée du temps mort dans le calcul des durées de commutations des interrupteurs.

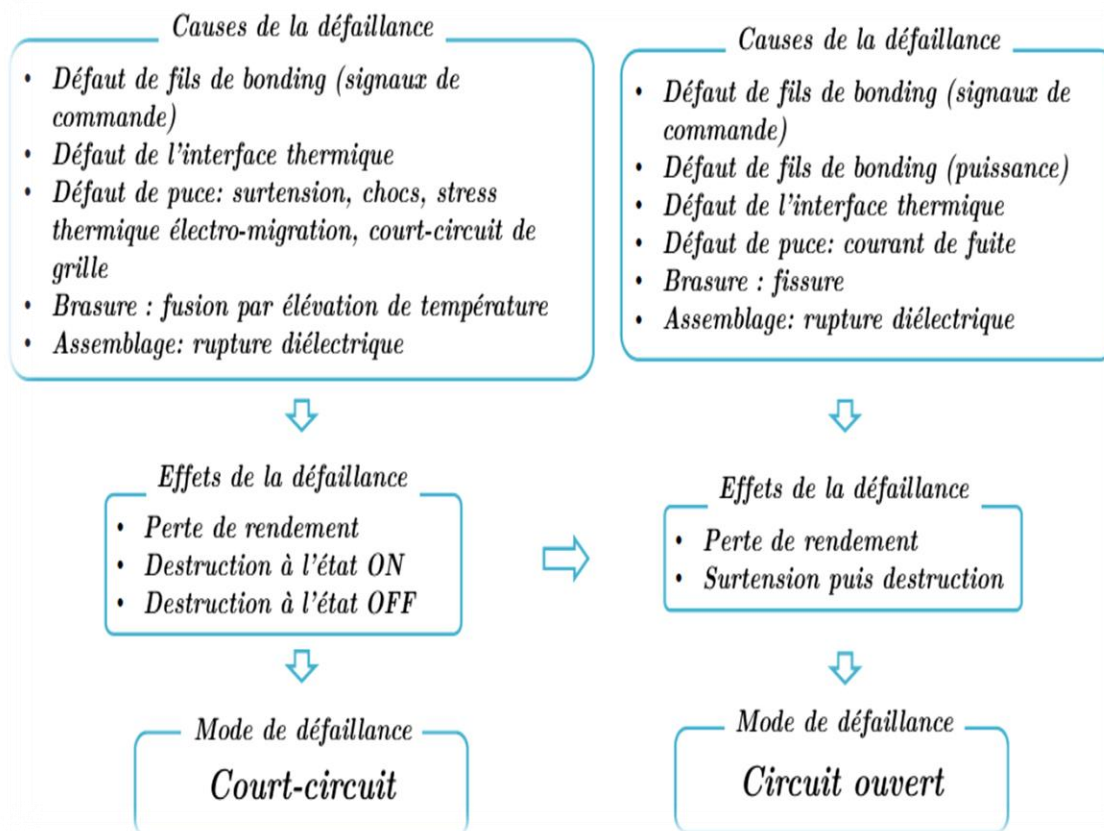


**Figure III. 5 :** Illustrations des tensions parasites appliquées en présence du temps mort.

Après avoir donné un aperçu des défaillances de la commande et les imperfections associées, intéressons-nous seulement aux défaillances du point de vue de l'électronique de puissance liée au composants semi-conducteurs, les défaillances liées au contrainte physique et thermique ne sont pas motionnées.

### III.3.2. Les modes de défaillances des composants semi-conducteurs

Les défaillances des semi-conducteurs apparaissent sous formes de court-circuit (CC) ou de circuit ouvert (CO) [29]. Dans certains cas, le défaut circuit ouvert est l'ultime état de défaillance, pouvant apparaître après une défaillance en court-circuit. Ces derniers sont critiques, se propagent à travers tous les éléments de la chaîne, Il est donc évident que l'électronique (de puissance ou de commande) soit la plus exposée et affectée par les contraintes d'usage, qu'elles soient d'ordre fonctionnelles ou environnementales. En conséquence, la fiabilisation d'onduleur passe donc par celle des composants semi-conducteurs ainsi que des circuits auxiliaires de commande. Intéressons-nous alors à ces problématiques, de la défaillance de la commande à celle du composant. Figure III.6



**Figure III.6 :** Causes, effets et modes de défaillance d'un semi-conducteur (IGBT)



### III.3.3 Défaut de court-circuit

On compte deux origines de court-circuit due au semi-conducteur :

- **Défaut physique** : Ce défaut est interne au semi-conducteur. Quelle que soit la cause de la défaillance, il se matérialise toujours par le court-circuit non contrôlé de l'interrupteur. En effet, une action sur la commande ( $V_{ge}$ ) ne permet pas d'arrêter le défaut et le courant de court-circuit est limité par l'impédance de la maille. La température dans le composant augmente très rapidement. Cependant, le défaut est réversible si le court-circuit est arrêté par un élément externe (second IGBT, fusible) ou bien si la cause de la défaillance disparaît (surtension fugitive). Lorsque la température intrinsèque du semi-conducteur est atteinte, le défaut est irréversible. A cet instant, le composant est hors service. Quelle que soit la cause initiale de la destruction, elle est toujours finalement liée une température excessive.
- **Défaut de commande** : Cette défaillance se traduit soit par l'ouverture de l'interrupteur soit par sa mise en court-circuit. Dans les deux cas, à l'instant du défaut, l'interrupteur défaillant est sain et il reste contrôlable. [14]

#### III.3.3.1 Court-circuit dans une cellule de commutation

Une cellule de commutation, ou bras d'onduleur, est composée d'un circuit allumeur (driver) et de deux interrupteurs bidirectionnels, deux I.G.B.T , T1 et T2 dans l'exemple de la Figure III.5. Les deux interrupteurs semi-conducteurs sont commandés de manière complémentaire afin d'éviter le court-circuit de la source de tension E.

Issus d'études bibliographiques, il y a deux types de court-circuit au sein d'une cellule de commutation. Le premier court-circuit (Figure III.7), dit de type I, est lié à une possible commande erratique de l'interrupteur [33]. Ce défaut intervient lorsque la complémentarité de conduction des I.G.B.T. est interrompue suite aux défauts de commande. Le deuxième type de court-circuit, dit de type II, correspond à la défaillance physique suite à des défauts qui apparaissent au niveau de l'assemblage physique de l'I.G.B.T. (fatigue des brasures, délaminage des puces...etc.), ou bien issus d'une défaillance de la charge.

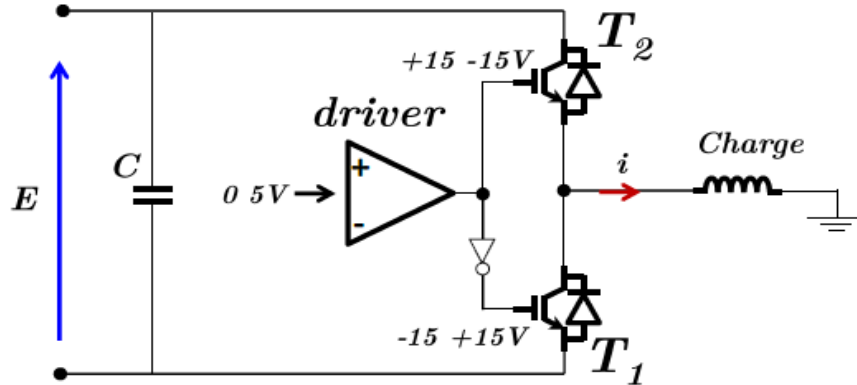


Figure III.7 : Eléments d'une cellule de commutation (bras d'onduleur).

Nous avons cité ces deux défauts critiques, le court-circuit de type I, et le court-circuit de type II [36].

### III.3.3.2 Défaut de court-circuit dû à la défaillance d'un interrupteur

Quelle que soit l'origine du défaut de court-circuit, la défaillance d'un interrupteur provoque la mise en court-circuit de la source de tension lorsque le second interrupteur de la cellule est commandé à la fermeture. L'impédance de la maille, condensateur de filtrage (C) cellule en défaut, étant très faible, cela se traduit par un fort courant de court-circuit circulant à travers la cellule défaillante [14]. Figure III.8

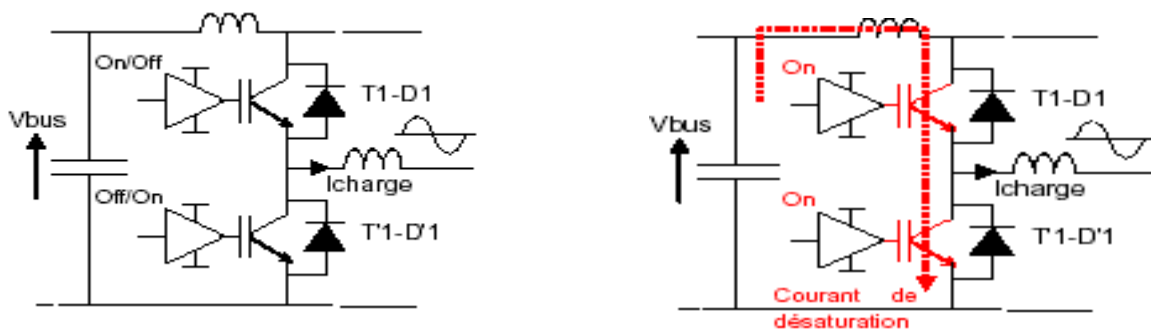


Figure III 8 : a) cellule générique.

b) défaut de court circuit

Le ou les deux semi-conducteurs de puissance (suivant l'origine du défaut) vont, si rien n'est fait, très rapidement passer en défaut physique. Il ne sera alors plus possible de les ouvrir par la commande (passage à un défaut physique). Si l'apport d'énergie par la source de tension n'est pas stoppé, la température va continuer d'augmenter jusqu'à l'ouverture ou l'explosion des composants.

### III.3.3.3 Défaut d'ouverture d'un interrupteur

Le maintien à l'état ouvert d'un transistor entraîne une perte de réversibilité en courant de la cellule : en mode onduleur, le courant de phase est alors unipolaire et non sinusoïdal. En effet, la conduction spontanée de la diode en anti-parallèle du transistor en défaut est conditionnée par le signe du courant dans la phase. Figure III.9

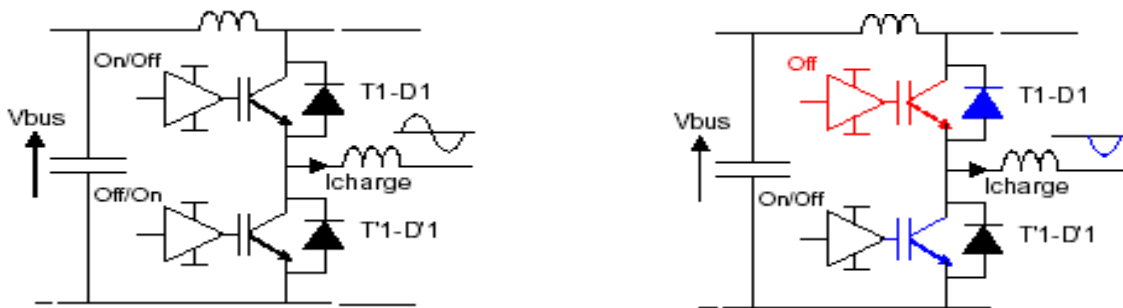


Figure III 9 : a) cellule générique 1

b) défaut d'ouverture.

Par exemple, si le transistor supérieur d'une cellule reste ouvert, la phase correspondante de la machine reste connectée au potentiel négatif du bus par la diode du bas. Le courant dans la phase concernée s'annule pendant la moitié de la période de modulation.

Comme le neutre de la machine est isolé, les courants dans les deux autres phases sont également déformés. La distorsion des courants est donc importante ce qui implique une puissance fluctuante significative. Le maintien du régime nominal nécessite alors une augmentation du courant efficace

En conclusion de cette partie, rappelons tout d'abord que la défaillance de l'électronique est la plus commune et la plus critique. Elle conduit majoritairement à la rupture du service de la chaîne

de traction ; un défaut sévère au sein du convertisseur ou de la machine peut à lui seul entraîner la perte (totale ou partielle) de contrôle de l'actionneur électrique. Aussi, afin d'améliorer la sûreté de fonctionnement de certaines d'applications (notamment dans le domaine d'aéronautique ou d'automobile), est-il nécessaire de prévoir la possibilité du fonctionnement en mode dégradé en présence de défauts dans l'un des éléments de la chaîne. C'est pourquoi la partie suivante dresse un état de l'art des architectures de convertisseurs d'interface tolérantes aux pannes offrant la possibilité de surmonter le défaut et d'assurer une continuité de service.

### **III.4 Technologie et topologie de l'onduleur à tolérance de panne**

#### **III.4.1 Sécurisation et tolérance de panne en onduleur à deux niveaux**

Partant des scénarios de défaillances internes principaux présentes dans le paragraphe précédent nous allons ici définir la structure et le fonctionnement des dispositifs d'isolement à insérer pour sécuriser une cellule élémentaire au sein de l'onduleur triphasé. Cette "première" opération d'isolement électrique sera également analysée du point de vue de sa compatibilité avec une "deuxième" fonction de connexion secours obtenue par un bras de secours en redondance parallèle.

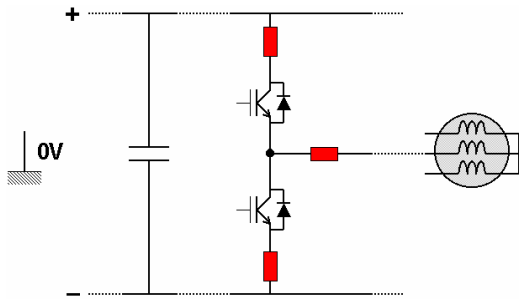
##### **II.4.1.1 Isolement électrique des défauts**

Le sous-chapitre précédent a mis en évidence les contraintes résultant de différents modes de défaut. En particulier, dans certains cas de court-circuit, le blocage des transistors n'est pas suffisant pour isoler électriquement l'ensemble onduleur-machine puisque la rotation des aimants de la machine entretient le régime de défaut. L'intérêt de dispositifs d'isolement appropriés a été montré pour la plupart des défauts, afin de réduire les régimes dégradés et éventuellement d'assurer le mode de défaillance ultime adéquat. Cela constitue également un moyen d'envisager une tolérance de panne en permettant la reconfiguration du convertisseur afin de poursuivre la mission.

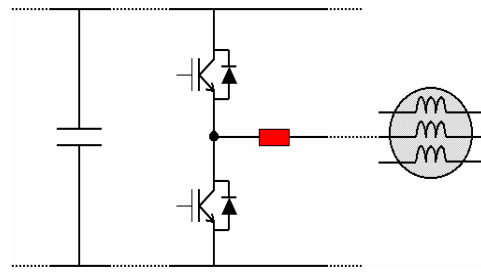
##### **a) Aspects technologiques**

Pour pouvoir isoler totalement un bras d'onduleur de l'ensemble des potentiels environnants (masse avion, points chaud et froid du bus continu, phases de la machine), 3 dispositifs d'isolement sont nécessaires puisque cette cellule de commutation est un tripôle (figure III.10).

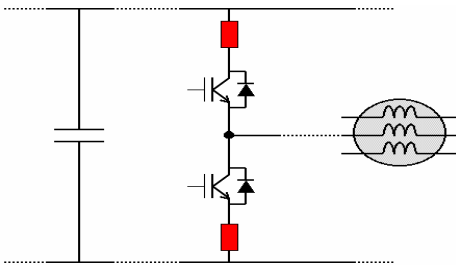
Cette solution pénalise fortement les pertes et la compacité du convertisseur et elle semble donc contraignante pour la plupart des applications industrielles. Avec un nombre réduit de dispositifs (figure III.11, figure III.12 et figure III.13), l'isolement n'est que partiel, en particulier dans le cas du défaut d'isolement par rapport à la masse avion.



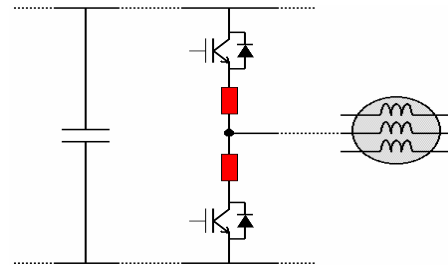
**Figure III.10** : 3 dispositifs d'isolement par cellule



**Figure III.11** : 1 dispositif d'isolement par cellule



**Figure III.12** : 2 dispositifs d'isolement par cellule



**Figure III.13** : 2 dispositifs d'isolement par cellule

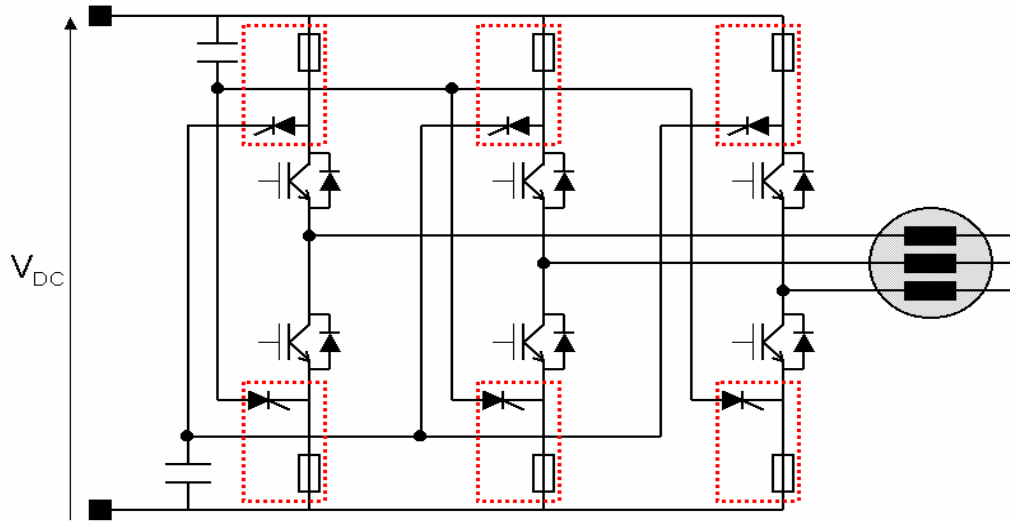
Plusieurs technologies sont envisageables pour la réalisation de cette fonction. Dans la littérature, de nombreuses topologies utilisent des fusibles [37]. Un exemple est représenté à la figure III.14. Chacun des deux condensateurs raccordés au bus continu est connecté à un thyristor par bras d'onduleur. Suite à la défaillance d'un ou deux transistors du même bras, l'amorçage des thyristors reliés à ce bras crée un court-circuit à travers le bus continu et l'énergie absorbée par

les condensateurs permet l'ouverture des 2 fusibles et déconnecte ainsi la cellule de commutation du bus continu.

Les fusibles présentent cependant un certain nombre d'inconvénients, en particulier dans un contexte aéronautique.

- Tout d'abord, la plage de courant dans laquelle se produit la fusion est assez large, compte tenu des dispersions sur la température ambiante, l'état de vieillissement et les pertes Joule de ce type de composant. L'isolement électrique n'est donc pas parfaitement maîtrisé.
- De plus, la masse et le volume des condensateurs calibrés pour le stockage de l'énergie nécessaire à la fusion grèvent la compacité du convertisseur. Leur valeur est choisie pour avoir un transfert d'énergie suffisant en un temps assez court ; si les capacités mises en jeu sont trop faibles, le courant circule pendant un temps trop court pour atteindre les limites thermiques spécifiées pour le fusible et il ne s'ouvre donc pas. Une solution alternative utilisant une inductance à la place du condensateur est envisageable, mais elle est plus contraignante puisque le fusible doit avoir un pouvoir de coupure supérieur. De plus, elle est moins sécuritaire car, si le fusible ne s'ouvre pas, le courant court-circuit à travers le bus continu n'est limité que par l'inductance et la composante résistive des éléments en série.
- L'amplitude élevée du courant nécessaire à l'ouverture est une contrainte sur le dimensionnement des thyristors, même si la durée de conduction est courte et s'ils n'ont pas à conduire de courant après une éventuelle reconfiguration.
- D'autre part, en cas de surintensité, un arc électrique risque d'apparaître à leurs bornes, ce qui peut constituer un inconvénient.
- Enfin, lorsque les fusibles sont connectés au bus continu, ils vont augmenter l'inductance parasite des cellules de commutation et cela empire les surtensions vues par les interrupteurs lors des commutations et les problèmes de CEM.

Pour l'ensemble de ces raisons, il est choisi de mettre en oeuvre des dispositifs d'isolement de technologie différente. Toutefois, il peut être noté que des travaux de recherche portent sur l'intégration d'éléments fusibles dédiés à une cellule de commutation.



**Figure III.14** : topologie d'onduleur permettant l'isolement de cellules défectueuses à l'aide de fusibles

En ce qui concerne les disjoncteurs conventionnels, ils ont comme inconvénients principaux une masse et un volume conséquent, une dynamique lente impliquant un temps d'ouverture important et la création d'un arc électrique.

Dans une perspective d'intégration, permettant d'envisager à terme un gain de masse, de volume et de fiabilité, il semble préférable d'utiliser des semi-conducteurs pour réaliser cette fonction d'isolement. De plus, la dynamique de l'interrupteur est alors suffisamment élevée pour permettre la déconnexion quasi-immédiate d'une cellule défectueuse afin de limiter les régimes de défaut, ainsi qu'une reconfiguration suffisamment rapide pour minimiser le transitoire de couple.

#### **b) Structures d'isolement**

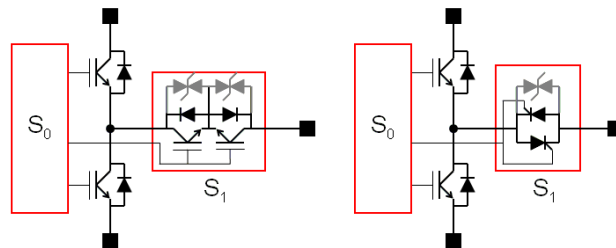
Dans le cas de la machine synchrone, le blocage de tous les transistors n'est pas suffisant pour isoler l'ensemble onduleur moteur puisque la rotation entretient le court-circuit intermittent. Dans le cas d'un onduleur à tolérance de pannes, il est nécessaire d'insérer un dispositif d'isolement entre la cellule de commutation défectueuse et la phase moteur pour maintenir un fonctionnement post-défaillance sécurisé sur le plan électrique et mécanique.

Différentes topologies d'onduleurs à tolérance de pannes ont été proposées dans la littérature. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite l'utilisation de fusibles déclenchés par thyristors, ce qui présente divers inconvénients, dispersion des paramètres intrinsèques, masse et volume des condensateurs calibrés pour le stockage de l'énergie nécessaire à la fusion, maintenance et coût notamment.

Il est donc préférable de réaliser l'isolement électrique de la cellule de commutation par un interrupteur électronique adapté à cet usage. En particulier, il doit être réversible en courant et en tension et naturellement réarmable par sa commande électronique. De plus, comme il conduit le courant en permanence, il doit présenter des pertes par conduction aussi faibles que possible.

Aujourd'hui, les semi-conducteurs de puissance commandables et bidirectionnels en tension présentant le minimum de chute de tension sont le thyristor et ses variantes. Récemment, les IGBT à tenue en tension inverse (RB-IGBT, MBS, ...) sont très attractifs car leur chute de tension n'est que de 20 à 30% supérieure à celle des thyristors de même calibre avec comme fonctionnalité supplémentaire la commande au blocage. Dans le cadre de cette étude, il n'est pas question de figer la structure de cet interrupteur ; nous employons simplement la symbolique IGBT.

Deux exemples très classiques sont rappelés en figure 15 : le dispositif  $S_1$  représente l'interrupteur d'isolement et  $S_0$  le dispositif de commande rapprochée et de surveillance de la cellule de commutation et de  $S_1$ . L'ensemble  $S_0$ - $S_1$  forme une fonction disjoncteur électronique. Un dispositif d'écrêtage doit être introduit pour éviter qu'une éventuelle énergie renvoyée par la machine soit dissipée dans les semi-conducteurs, ce qui risquerait de les dégrader fortement. [38] [39]



**Figure III.15** Exemples d'interrupteurs d'isolement 4 quadrants insérés entre la cellule et la phase moteur



### c) Structures de connexion de bras de secours

Une fois le bras défaillant isolé, l'organe superviseur connecte le bras secours au neutre de la machine. Celui-ci assure alors le retour des courants diphasés par le neutre et joue le rôle de diviseur de tension actif pour régler la tension du neutre.

Comme le convertisseur comporte peu de composants, sa fiabilité est assez bonne (MTBF donné par les constructeurs compris entre 4 et 5 ans). Du point de vue de la sûreté de fonctionnement, Un défaut d'ouverture est beaucoup moins contraignant puisque la sécurité de fonctionnement est assurée. Par contre la défaillance d'un interrupteur en court-circuit ne permet pas d'assurer la sécurité du système. En effet, même si des protections sont ajoutées à la structure (fusible, driver intelligent), celles-ci ne peuvent pas éviter la mise en court-circuit de la source de tension. Le défaut peut donc se propager à l'extérieur du convertisseur : risque de défaillance sur l'alimentation continue, endommagement de la partie mécanique. Le système n'est donc pas tolérant au défaut de court-circuit d'un interrupteur et l'arrêt très rapide du convertisseur est la stratégie la plus adaptée. L'adjonction à l'onduleur d'une redondance interne permet d'améliorer les performances du fonctionnement reconfiguré.

## Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier les différents modes de défaillances et que la majorité des défaillances sont dues à un défaut d'interrupteur, et grâce à la méthode d'analyse de la sûreté de fonctionnement (AMDE,ADf) on a :- mise en évidence les différents modes de défaillance pouvant apparaître au sein d'une cellule de commutation,-meilleure observation de l'enchaînement des défauts

Si un défaut d'ouverture n'a pas de conséquences néfastes sur le système lorsque l'on utilise un onduleur classique, il n'en est pas de même pour un défaut de court-circuit. Les conséquences sur la source de tension, le moteur, la charge et le convertisseur peuvent alors être touchantes. Pour y couvrir, il faut augmenter la fiabilité et la disponibilité du convertisseur.

Pour assurer la sûreté de fonctionnement de l'onduleur, des structures tolérantes à la défaillance d'un interrupteur sont proposées. Pour cela, la topologie du convertisseur doit faire apparaître des redondances pour pouvoir écarter le défaut et contenir ces effets. L'utilisation de la topologie de l'onduleur quatre bras à tolérance de pannes permet l'amélioration de la disponibilité du convertisseur.

# CHAPITRE IV

## Simulation

### IV.1 Introduction

Afin d'accomplir le fonctionnement non interrompus, pour les applications délicates, ainsi que les applications aéronautiques, les applications d'interconnexion et celui des véhicules électriques, il faut disposer des convertisseurs statiques à tolérance de pannes, dans notre cas on a adopté un onduleur à 4 bras reconfigurable ; ce dispositif a l'aptitude de détecter le défaut , isoler le bras défaillant, et connecter le bras de secours tout en fonctionnant automatiquement , pour assurer la continuité de l'alimentation en courant alternatif .

Dans ce chapitre nous réalisons une simulation des différents défauts à l'origine de circuit de commande, parmi ceci :

Les défauts Circuit ouvert (C-O d'un IGBT, C-O d'un bras, C-O des plusieurs bras).

Les défauts Court-circuit (C-C demi bras et C-C d'un bras).

Ensuite nous effectuons la simulation d'un défaut de commande dans un intercepteur d'un onduleur sécurisé a 4 bras reconfigurable.

### IV.2 Choix d'onduleur

Pour cette simulation on a choisi un onduleur a 2 niveaux commandé en modulation de largeur d'impulsion de type sinusoïdale /triangulaire. On a choisi celle de 2 niveaux pour la simplicité de manipulation qu'il fournit, nombre des organes de connexion et d'isolement minimale, en plus chaque structure qu'on a appliquée dans cet onduleur est aussi applicable dans toutes les autres

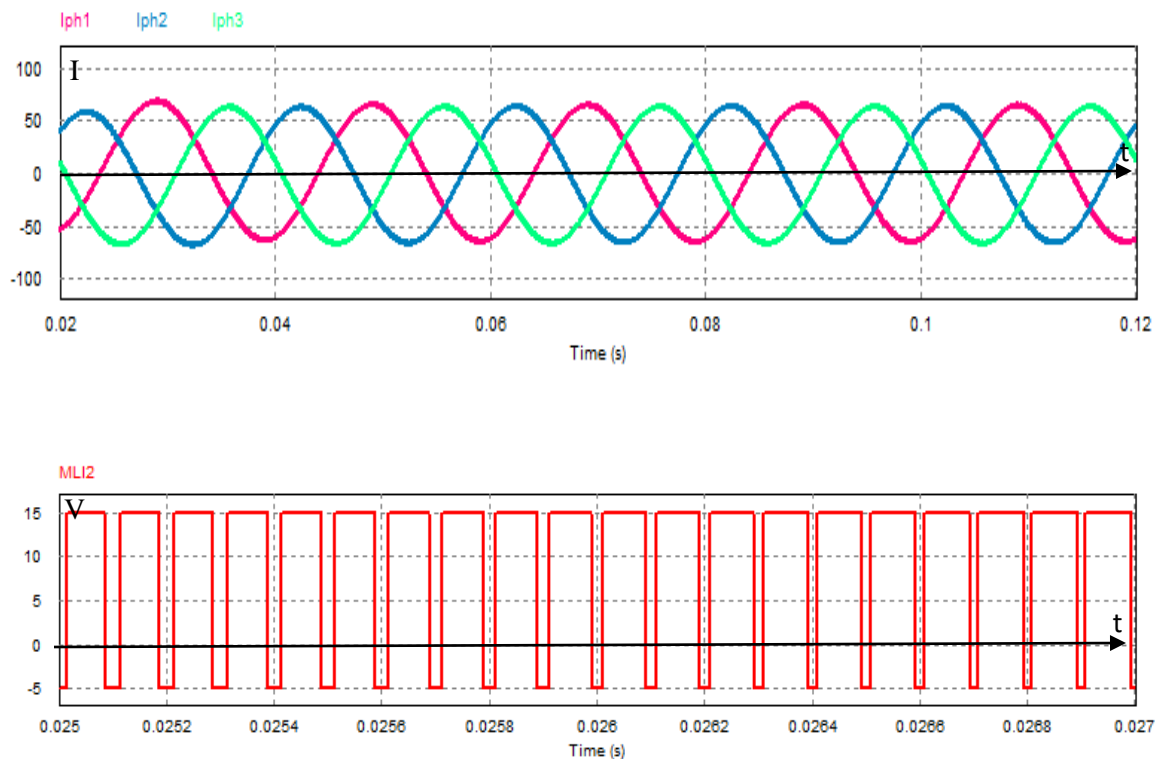
structures, la déférence réside dans le nombre d'intercepteur de connexion et d'isolement, selon le nombre de niveaux et la structure d'isolement .

### IV.3 Simulation des modes de défaillance les plus distingués dans un onduleur

D'après le tableau de l'AMDE d'un onduleur à deux niveaux (Tableau III.1), et l'arbre de défaillance réalisé pour le même onduleur (Figure III.1, Figure III.2, Tableau III.2), on distingue les défaillances suivantes :

- Défaut de type Circuit ouvert.
- Défaut de type court-circuit.

Avant ça, une simulation de régime sans défaut de notre onduleur et indispensable, elle serve comme référence pour les simulations qui suivent. Figure IV.1

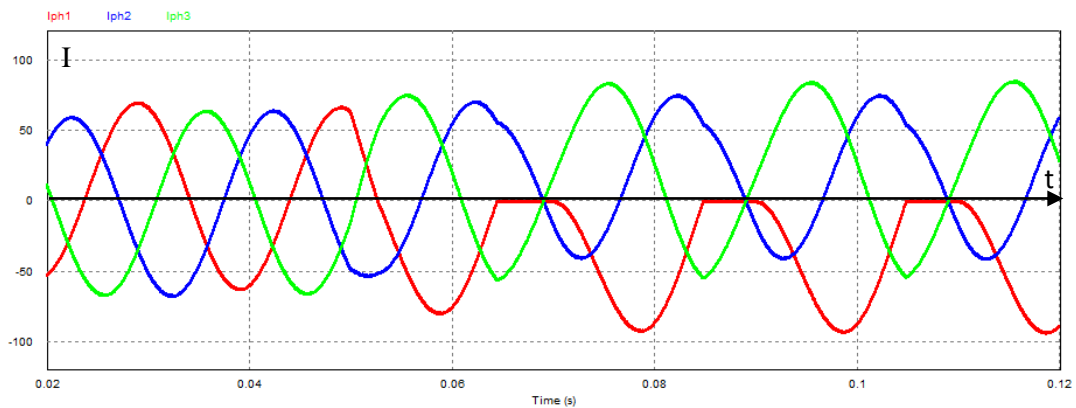


**Figure IV.1** : Forme d'onde de courant des phases et des signa l de commande MLI pour un fonctionnement sans défaut.

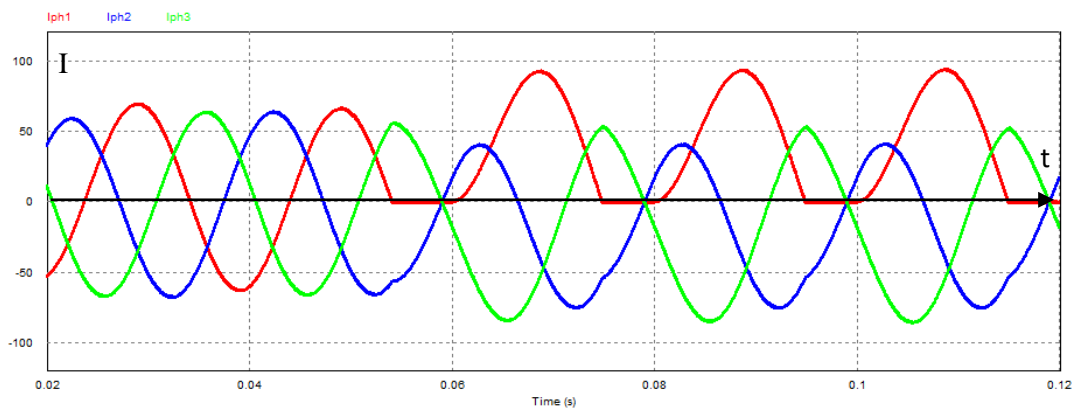
### IV.3.1 Défaut de type Circuit ouvert

#### IV.3.1.1 Défaut de type Circuit ouvert d'un transistor

La dégradation des intercepteurs de puissance due aux différentes contraintes thermiques ou mécaniques ou l'injection de signal de commande erroné ; provoque souvent un défaut de circuit ouvert dans l'interrupteur défaillant.



**Figure IV.2 :** Forme d'ondes des courants près un Défaut de circuit ouvert d'un transistor (supérieur)



**Figure IV.3 :** Forme d'ondes des courants près un Défaut de circuit ouvert d'un transistor (inferieur)

Le maintien à l'état ouvert d'un transistor entraîne une perte de réversibilité en courant de la cellule : en mode onduleur, le courant de phase est alors unipolaire et non sinusoïdal. En effet, la

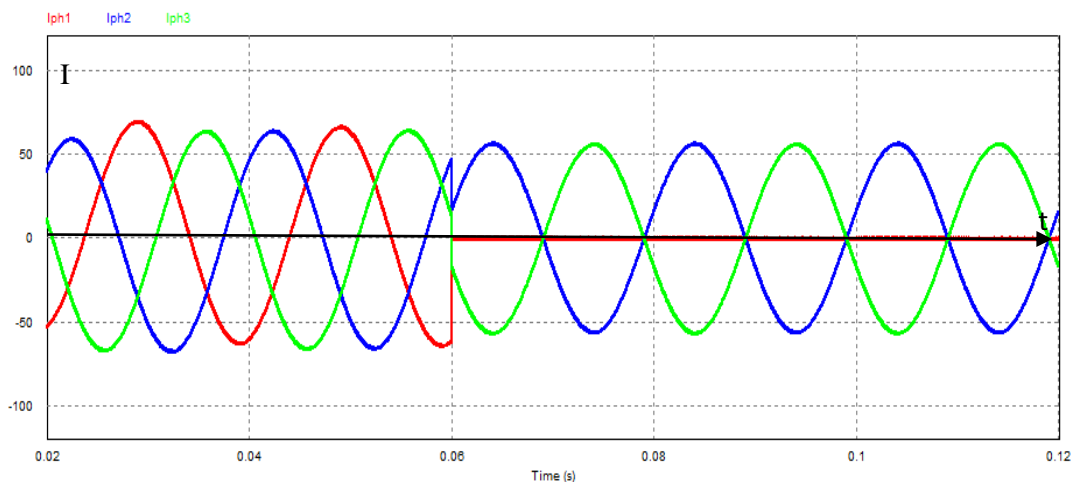
conduction spontanée de la diode en antiparallèle du transistor en défaut est conditionnée par le signe du courant dans la phase.

Par exemple, si le transistor supérieur d'une cellule reste ouvert, la phase correspondante de la machine reste connectée au potentiel négatif du bus par la diode du bas. Le courant dans la phase concernée (phase 1 sur la figure IV.2) s'annule pendant la moitié de la période de modulation, et le contraire pour le transistor inférieur (Figure IV.3). Comme le neutre de la machine est isolé, les courants dans les deux autres phases sont également déformés. La distorsion des courants est donc importante.

#### IV.3.1.2 Défaut de type Circuit ouvert d'une cellule

Lorsque les deux transistors d'une cellule de commutation sont bloqués à l'état ouvert, cela implique la perte des deux alternances de courant.

Ce défaut représente souvent l'étape ultime de défaut de court-circuit. Figure IV.4



**Figure IV.4 :** Forme d'ondes des courants près un Défaut de circuit ouvert d'une cellule

Ce mode de défaut correspond à la perte de la commande d'un bras, ses deux transistors restant ouverts. La phase n'est plus connectée qu'à travers les diodes antiparallèles de la cellule de

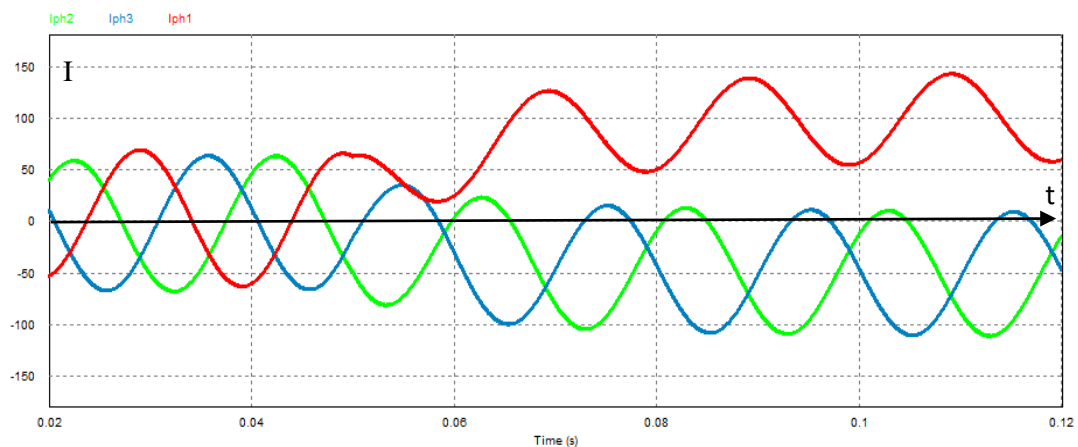
commutation; la conduction spontanée d'une des diodes du bras en défaut dépend des forces électromotrices développées par la machine et des commandes des bras restants.

Le courant dans la phase concernée est assez faible, voire quasiment nul, selon la commande effectuée et les courants dans les phases saines ont leurs fondamentaux en opposition de phase et rend le système biphasé ( $I_{ph2}$  et  $I_{ph3}$ ): ce mode de défaut est donc assez semblable au cas de l'ouverture d'une phase de la machine.

### IV.3.2 Défaut de type court-circuit

#### IV.3.2.1 Défaut de C-C d'un IGBT (Défaut de bras asymétrique)

Le défaut d'ouverture d'un transistor est à traiter beaucoup plus rapidement car la cellule de commutation se trouve court-circuitée. La commande rapprochée de la cellule doit alors réagir en quelques micro-secondes pour ouvrir le transistor en série sous peine de court-circuit définitif. Le courant dans la phase du bras en défaut devient alors incontrôlable car il existe des chemins de court-circuit avec les diodes antiparallèles.



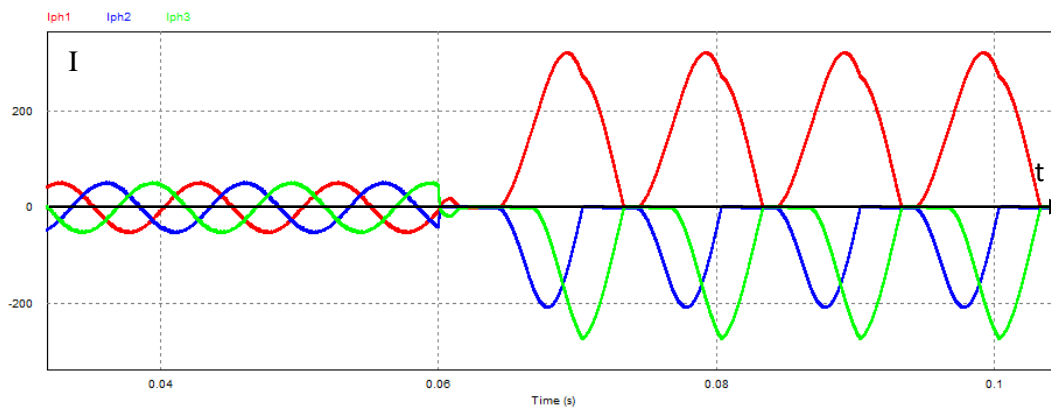
**Figure IV.5 :** Forme d'ondes des courants près un Défaut de C-C d'un IGBT (Défaut de bras asymétrique)

Le courant de court-circuit augmente brusquement (Son amplitude atteint ici le triple de la valeur nominale) (Figure IV.5) à partir du moment d'application de signal erroné de commande

de l'IGBT, mais garde sa forme sinusoïdale, nous constatons que le système reste équilibré bien que l'apparence de cet défaut (à chaque instant  $I_1+I_2+I_3=0$ ).

Donc les courants dans les deux autres phases sont également déformés, dont l'amplitude peut aller jusqu'à -110 A, ces valeurs posent un risque dramatique sur le matériel et l'utilisateur.

#### IV.3.2.2 Défaut de C-C d'un bras



**Figure IV.6 :** Forme d'ondes des courants près un Défaut de C-C d'un bras

La simulation d'un défaut asymétrique de bras d'onduleur montre que le courant de court-circuit est de type courant redressé mono-alternance (figure IV.6). Son amplitude atteint ici le triple de la valeur nominale et elle peut être encore plus élevée suivant le régime de fonctionnement pendant lequel elle survient.

Pour imposer une annulation plus rapide du courant et éviter des régimes transitoires de courant au convertisseur et à la machine, il est envisageable de profiter de l'annulation du courant dans l'une des phases restantes pour ouvrir celle-ci. Il ne subsiste alors qu'un seul chemin de court-circuit et le courant de phase peut s'exprimer comme la somme d'une sinusoïde et d'une exponentielle décroissante. Il s'annule donc plus rapidement.

## IV.4 Simulation de l'onduleur sécurisé avec détection et reconfiguration

### Onduleur à quatre bras

Une topologie habituel d'onduleur triphasé intégrant des interrupteurs d'isolement peut remédier une défaillance interne. La liaison à un onduleur d'une redondance interne permet d'améliorer les performances du fonctionnement reconfiguré. L'élément additionnel est de préférence une cellule de commutation plutôt qu'un diviseur capacitif.

Le bras secours peut être raccordé à chacune des 3 phases pour remplacer un bras défaillant. De la sorte après reconfiguration le fonctionnement reste celui d'un onduleur triphasé ; aucune modification de l'algorithme de commande n'est requise et l'intégralité de la puissance nominale peut être fournie. Cependant, cette topologie nécessite 3 dispositifs de connexion et 3 dispositifs d'isolement (un par phase), ce qui pénalise la compacité du convertisseur, mais assure la déconnexion rapide et avec minimum de fluctuation.

Il peut cependant sembler préférable d'adjoindre également un interrupteur d'isolement au bras secours pour ne le relier qu'en cas de défaut et éviter ainsi toute circulation de courant dans ce bras (voir ANNEX figure 1.4).

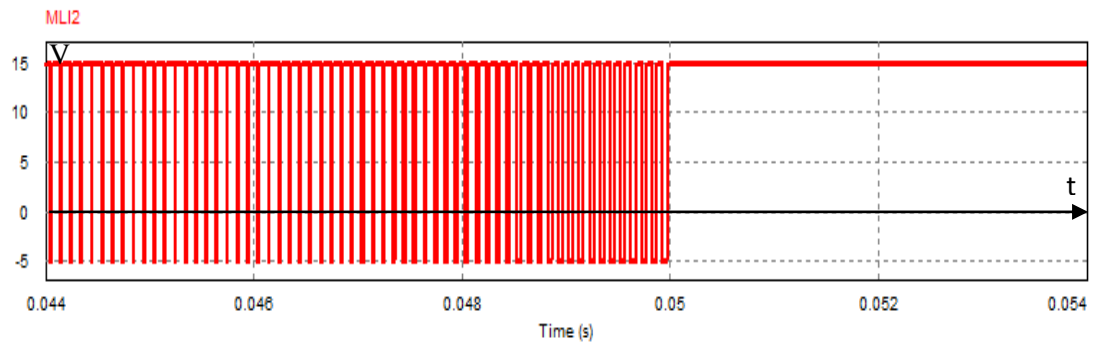
Ce qui concerne l'organe de détection (voir ANNEX figure 1.3), il faut disposer d'un système de détection de défaut, ce système doit être sensible ,rapide , sélective et fiable ; lorsque les défauts peuvent être détectés, nous devons savoir si, dans certains circonstances, ils pourraient être masqués ou remis à zéro involontairement par l'activation d'autres dispositifs du système ;dans le cas étudié ,c'est l'organe de détection qui donne lui-même l'ordre pour la déconnexion faite à travers des interrupteurs commandé à base des IGBT (voire ANNEX Figure 1.4) .

on a effectuer une simulation d'un onduleur a 4 bras , avec 3 organe de connexion/isolement , on a commencer par une simulation ou les étapes de reconfiguration sont distingués étape par étape , avec un délais entre étapes , ça ce n'est pas le cas dans la réalité , parce que dans l'industrie un retard de déconnexion de 1ms peut avoir des conséquences néfastes.

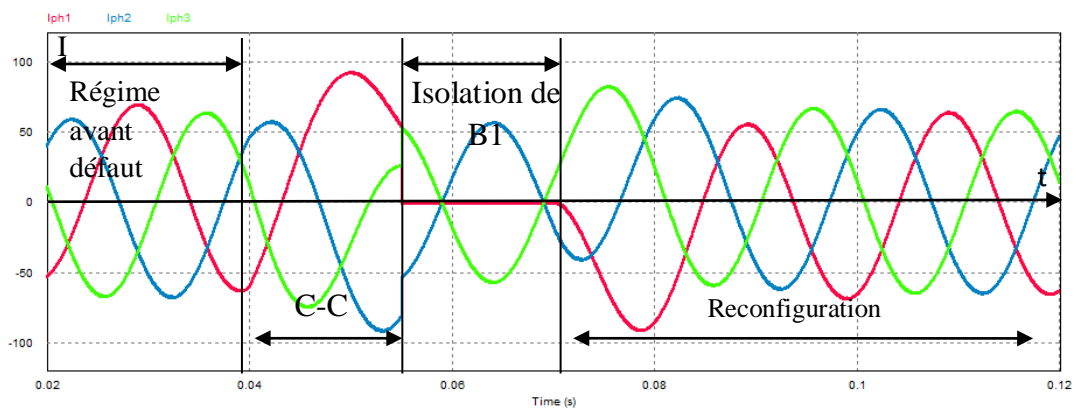


- **Essai I**

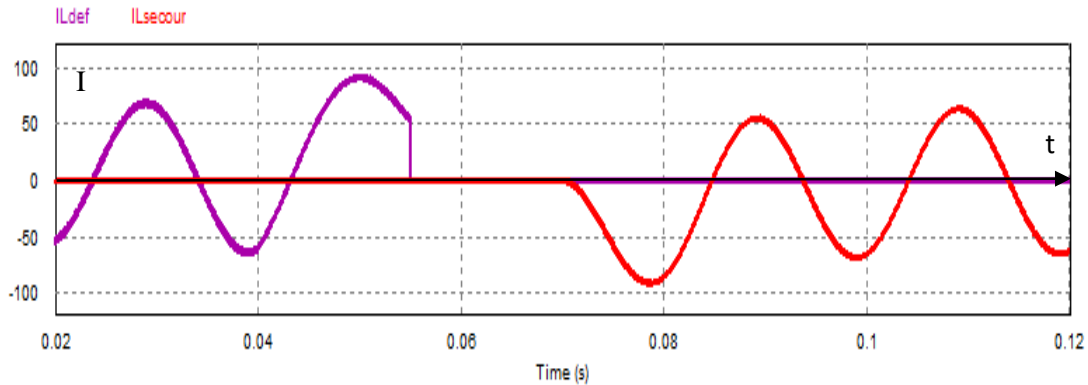
On applique a l'instant  $T=50$  ms une signale d'échelon a la sortie de générateur de signale ML I de l'IGBT1, ce signale va bloquer le transistor de l'IGBT1 en état fermée (blocage a l'état de commutation), ce qui va produire un court-circuit. (Figure IV.7, Figure IV.8, Figure IV.9)



**Figure IV.7 :** la commande erronée (l'origine de défaut).



**Figure IV.8 :** Court-circuit, isolation et reconfiguration pour un délai de 15 ms.

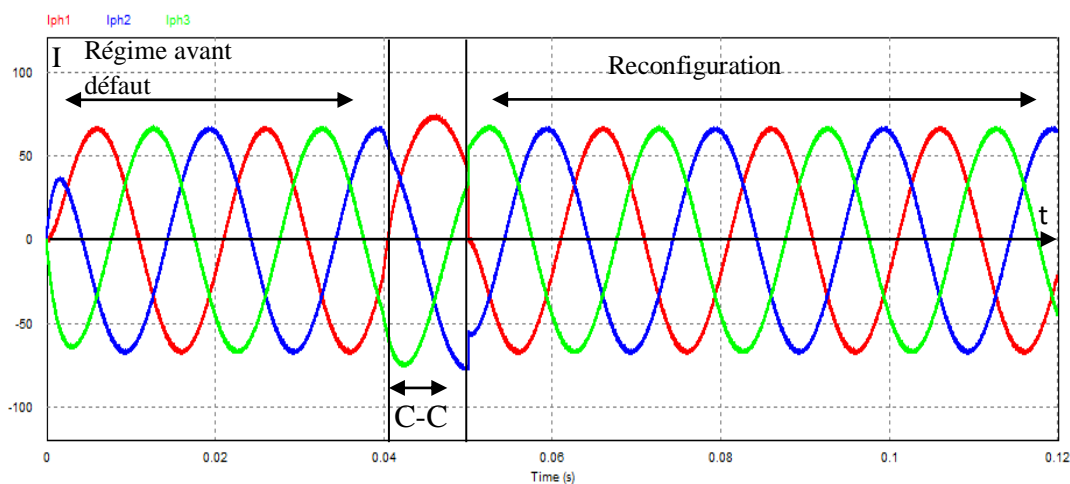


**Figure IV.9 :** Forme d’onde courant dans le bras défaillant et le courant de reconfiguration

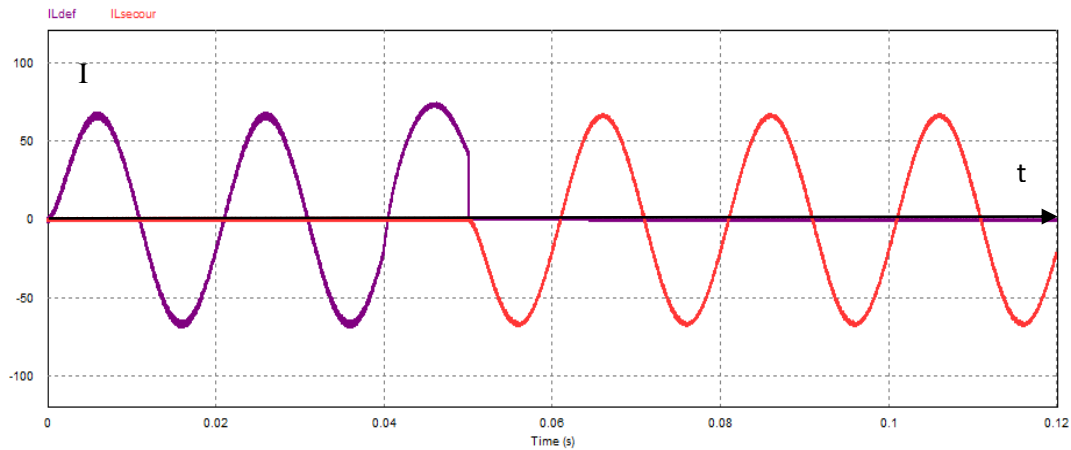
On a programmé un bloque Delay de l’isolement de bras défaillant pour retarder la déconnection de B1 de 15 ms ,et un autre pour retarder la connexion de BS1 de 15 ms. Figure IV.9

Pendant la période entre l’isolement de B1 et la reconfiguration, le système n’est plus triphasée (Figure IV.8), il devient biphasé, mais une fois le bras BS1 est connecté, on constate la restauration de composante triphasé de système, le courant passant dans le bras BS1 connaisse une augmentation similaire au celle de régime transitoire due au démarrage de moteur, cette anomalie est rapidement remise en fonctionnement normal.

- **Essai II**



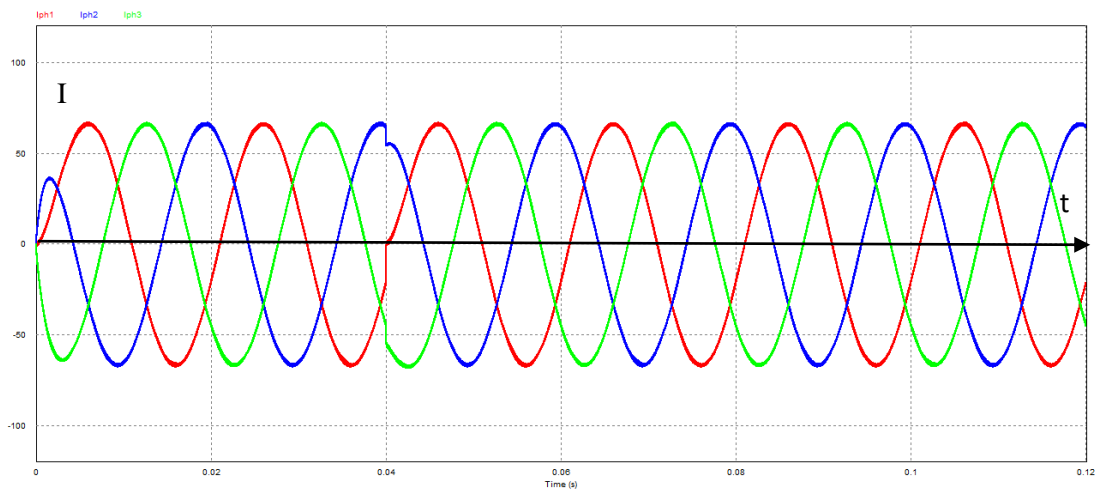
**Figure IV.10 :** Reconfiguration Rapide (pas de délai entre la déconnection et la connexion de bras BS1).



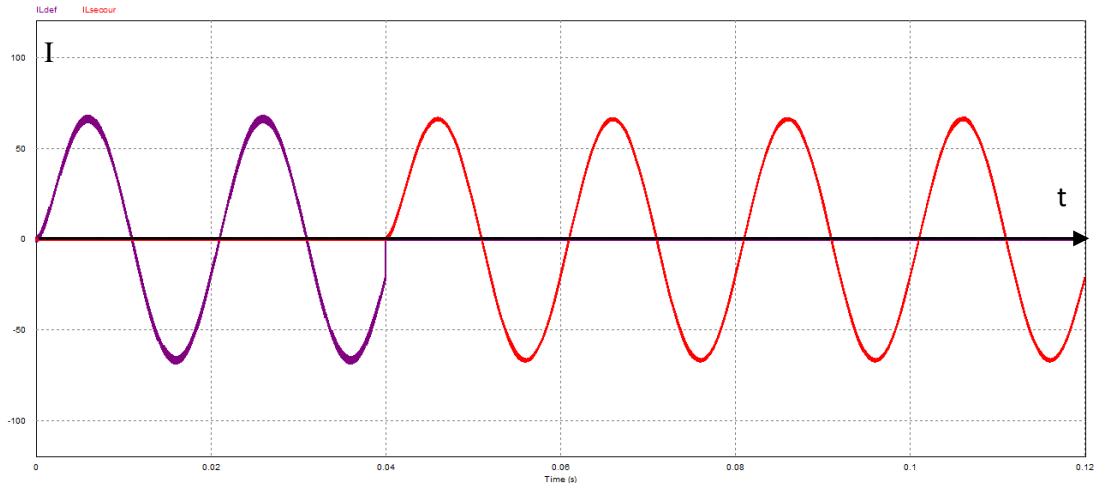
**Figure IV.11 :** Forme d'onde courant dans le bras défaillant et le courant de reconfiguration

Pour un délai de  $T_{\text{Délai}} = 0.01$  s entre le défaut et la reconfiguration (dans ce cas la déconnexion de bras défaillant et la connexion de bras de secours se fait simultanément), il n'existe pas un deuxième régime transitoire, donc le moteur n'a pas vraiment changer de vitesse lors la déconnexion de bras défaillante, c'est donc évidant que l'isolement et la connexion sont plutôt effectuées simultanément. (Figure IV.10, Figure IV.11)

- **Essai III**



**Figure IV.12 :** Reconfiguration parfaite (détection et intervention super vite).



**Figure IV.13 :** Forme d'onde courant dans le bras défaillant et le courant de reconfiguration.

Cette dernière essai montre les résultats désirables par l'utilisateur ; une reconfiguration immédiate lors les premier  $\mu$ s de court-circuit, mais ce n'est pas facile d'attendre des vitesses de reconfiguration pareille dans la réalité, pour approcher le fonctionnement parfaits du système, il est indispensable de choisir la technologie la plus modernes et efficaces, soit pour les structure d'isolation, les organes de détection et même les interrupteurs de puissances.(Figure IV.12,Figure IV.13)

## CONCLUSION :

Pour éviter les conséquences préjudiciables pour le système et son environnement, la commande rapprochée de la cellule doit pouvoir réagir assez promptement (dans les 10 microsecondes qui suivent) lors de l'apparition du défaut pour ouvrir le transistor concerné ou le transistor adjacent avant la fusion des puces. Pour cela, les circuits drivers modernes intègrent généralement une détection de désaturation des transistors par mesure de la tension collecteur-émetteur ou, plus rarement du courant.

Pour envisager une continuité de service avec ce type de défaut, une solution consiste à intégrer des interrupteurs d'isolement dans l'onduleur (ou dans les enroulements de la machine)

afin de confiner le défaut et de reconfigurer l'onduleur pour un fonctionnement secours. De plus, cela fournit un isolement électrique partiel ou total de l'ensemble onduleur machine.

Enfin, cela peut éviter aux différents composants de subir le régime de défaut dont les grandeurs électriques et mécaniques, élevées par rapport à celles du régime nominal.

# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire traite la sûreté de fonctionnement des onduleurs. Il porte des solutions visant à optimiser la fiabilité globale et la sécurité des convertisseurs continu-alternatif.

Après avoir décrit les notions de base sur les méthodes fondamentales de la sûreté de fonctionnement, on a passé à une introduction à l'état de l'art des composants semi-conducteurs, et baser sur les unes qui sont souvent utiles dans la conversion DC/AC, application des méthodes AMDE et ADF met en évidence les différents modes de défaillance pouvant apparaître au sein d'une cellule de commutation, Cette analyse nous a permis de déterminer quelles protections nous devrions mettre en place pour détecter et couper le premier défaut.

Ce mémoire constitue une contribution à la conception de modules génériques de conversion statique à tolérance de panne. Pour cela, un recensement des applications d'électronique de puissance pour les applications dont la perturbation de l'alimentation en courant alternatif peut avoir des conséquences graves et irréversibles, d'abord permis d'établir les besoins de conversion afin d'identifier des standards topologiques.

Les études de simulation ont confirmé l'intérêt de l'application retenue, ceci est de détecter les défauts avec précision et de faire la reconfiguration et la remise en état normal d'une façon efficace et rapide.

Sur le plan de la tolérance de panne, des topologies avec un niveau de redondance réduit (onduleurs 4 bras) ont été proposées pour bénéficier d'une tolérance de panne avec un nombre réduit de composants. L'insertion en redondance passive d'un bras secours pouvant se substituer à un bras défaillant a le mérite de la simplicité et d'un fonctionnement identique après reconfiguration ; ceci permet d'optimiser la disponibilité de l'onduleur.

Enfin, ce mémoire apporte quelques éléments de décision sur la conversion continu - alternatif. Les modèles de simulation ont été exploités pour dresser un besoin du dimensionnement électrique pour une structure de conversion plus disponible.

# **Références bibliographiques**



## Références Bibliographiques

- [1] I.BAZOVSKY “Reliability theory and practice”, Prentice Hall 1961
- [2] G.GALABRESE “Generating reserve capacity determined by the probability method”, AIEE Transaction, Vol. 66, 1947 p. 1493-50.
- [3] A.BLOCH “Murphy’s law and other reasons why things go wrong publishers”, Los Angeles 1982.
- [4] P.DT O’CONNOR “Practical reliability engineering”, London 1981.
- [5] U.S. Military Standard “Reliability demonstration, exponential distribution”, MIL-STD 781.
- [6] M.SCHWOB, G.PEYRACHE “Traité de fiabilité”, Masson et Cie Edition 1969.
- [7] S.LEVINE, F.STETSON « Applying the lessons of PRA (Probabilistic Risk Assessment), an American perspective Nuclear Engineering International », Jan.1984.
- [8] Alain Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, paris,Eyrolles, coll. « Collection de la direction des études et recherches d’Électricité de France », juillet 1988 page 744.
- [9] LIS sous la direction de J.-C. Laprie, Guide de la sûreté de fonctionnement, Toulouse, Cépaduès, mai 1995, 2<sup>e</sup> éd., P 369 .
- [10] “A survey of generator buck up protection practices IEEE committee report" IEEE transaction on power delivery, vol.5, No2, April 1990, p 575-584.
- [11] Gilles Zwinglstein, “Diagnostic des défaillances, théorie et pratique pour les systèmes industriels”, éditions Hermès1995.
- [11]Mathilde Bourrier, “Organiser la fiabilité”, édition L’Hammarattan 2001.
- [12] Norme NF EN 13306 Terminologie de la maintenance (juin 2001).
- [13] Norme NF EN 60300-3-3, décembre 2005, « Gestion de la sûreté de fonctionnement Partie 3-3 : Guide d'application – Evaluation du coût du cycle de vie ».

- [14] F.Khelifi « Sûreté de fonctionnement et fiabilité des circuits de l'électronique de puissance », thèse de Magistère UMBB 2008.
- [15] Karima Kanoun, "Rapport d'activité de recherche en Protection", LAASCNRS, Mai 2001.
- [16] Jean Noel Chatain, "Diagnostic par système expert", édition Hermès 1993.
- [17] Guy Séguier – Électronique de puissance - EDITION95.
- [18] Fournisseurs electricité (2010), brève intitulée Constat d'échec chez EDF pour la disponibilité des centrales nucléaires.
- [19]: Semicon index 95/6 21<sup>ième</sup> edition. (Data book).
- [20]: D.A.T.A digest 91 27<sup>ième</sup> edition. (Data book) .
- [21] P.W. Hammond. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49(5) :948-954, october 2002.
- [22] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [23] Onduleur de tension: mise en oeuvre et Structures-principes-applications. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [24] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [25] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [26] L.P.Lachauvinière ,ficher 'Convertisseur statique 'communication technique.
- [27] Thèse de magister BENSADDIK Othmane,DJALOUF Fethi «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque » Université de Ouargla 2012
- [28] Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph
- [29] Smet V., Forest F., Huselstein J., Richardeau F., Khatir Z., Lefebvre S., & Berkani M,(2011). Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High-Temperature Power Cycling. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 10, pp. 4931–4941.

- [30] Schwab H., Klönne A., Reck S., Ramesohl I., Sturtzer G. & Keith B., (2003). Reliability evaluation of a permanent magnet synchronous motor drive for an automotive application. *Power Electronics and Applications*. pp. 1–9.
- [31] Richardeau F., Baudesson P., & Meynard T.A., (2002). Failures-tolerance and remedial strategies of a PWM multicell inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.17, no.6, pp. 905–912.
- [32] Dulau L., Pontarollo S., Boimond A., Garnier J. F., Giraudo N., & Terrasse O., (2006). A New Gate Driver Integrated Circuit for IGBT Devices with Advanced Protections. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 1, pp. 38–44.
- [33] Kim H., Kim K., & Youn M. (2003). On-line dead-time compensation method based on time delay control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 2, pp.279-285.
- [34] Foch H., Forest F., & Meynard T., (2000). Onduleur de tension. Mise en oeuvre. *Technique de l'ingénieur*. D3177.
- [35] Yen-Shin L., & Fu-San S., (2004). Optimal common-mode Voltage reduction PWM technique for inverter control with consideration of the dead-time effects-part I: basic development. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.40, no.6, pp. 1605-1612.
- [36] Kolli A., De Bernardinis A., Béthoux O., Lallemand R., Coquery G., & Labouré E., (2011). Approche préliminaire de la défaillance et des contraintes critiques associées d'une cellule d'onduleur 6 bras dans une chaîne de traction pour véhicule électrique, *Conférence Electrotechnique du Futur EF2011*, Belfort.
- [37] B.A. Welchko, T.A. Lipo, T.M. Jahns, S.E. Schulz, "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies; a comparison of features, costs, and limitations", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, pp. 1108-1116, July 2004.
- [38] T.H. Liu, J.R. Fu, T.A. Lipo, "A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 29, pp. 910-918, Sept. 1993.
- [39] J.R. Fu, T.A. Lipo, "A strategy to isolate the switching device fault of a current regulated motor drive", *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, vol. 2, pp. 1015-1020, 1993.

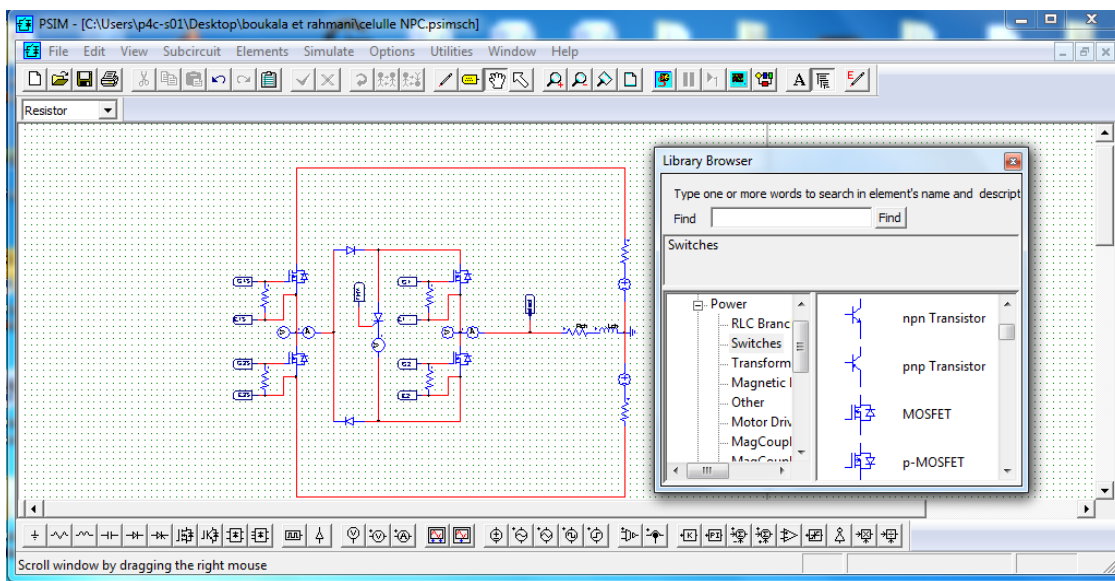
**Annexe**

# Annexe

## Logiciels utilisés

### Power SIM (PSIM)

Pour ce travail on a choisie PSIM comme interface de simulation, PSIM est un logiciel de simulation typiquement conçu pour l'électronique de puissance et commande de moteur. En simulation rapide et interface utilisateur amicale, PSIM fournit un environnement puissant de simulation pour la commande de l'électronique de puissance, analogue et numérique, l'entraînement des moteur et bien plus.



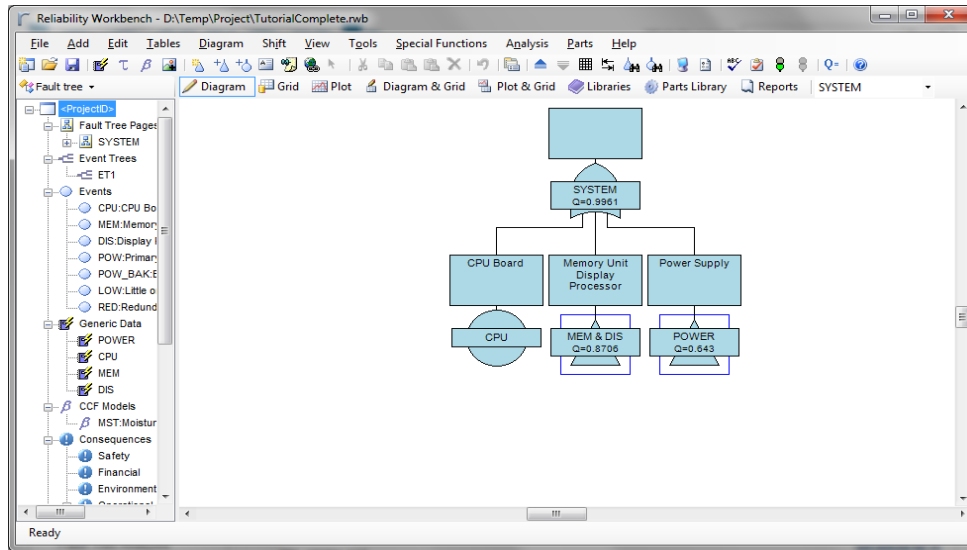
Interface de PSIM

### Fault Tree 11 ISOGRAPH

Un logiciel pour réaliser les arbres de défaillance, des diagrammes qui représentent la relation logique entre les sous- systèmes et les défaillances des composants et comment ils se combinent pour provoquer des défaillances du système. L'événement TOP d'un arbre de défaillance représente un événement système d'intérêt et est relié par des portes logiques à des défaillances de composants connus comme des événements de base.

Après avoir créé le diagramme, l'échec et la réparation de données est attribué aux composants du système. L'analyse est ensuite effectuée, pour calculer la fiabilité et la disponibilité des paramètres du système et identifier les composants critiques.

# Annexe



Interface de Fault Tree 11

## Schéma de simulation

Le schéma de simulation est constitué de 4 bloques (partie), un onduleur à deux niveaux sécurisé à 4 bras, une charge qui est un modèle de MASP (moteur asynchrone à aimant permanent).

Un bloque de commande et détection, dont le système de commande MLI qui contrôle les IGBT, et associé avec le système de détection de court-circuit dans le bras défaillant. Et un bloque d'isolement de bras défaillant et connexion de bras de secours.

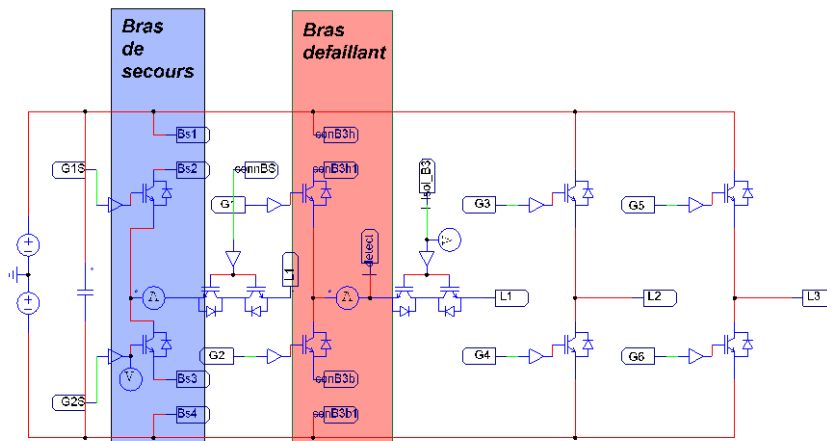
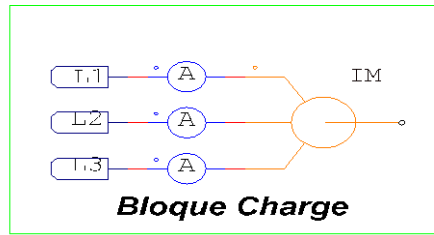
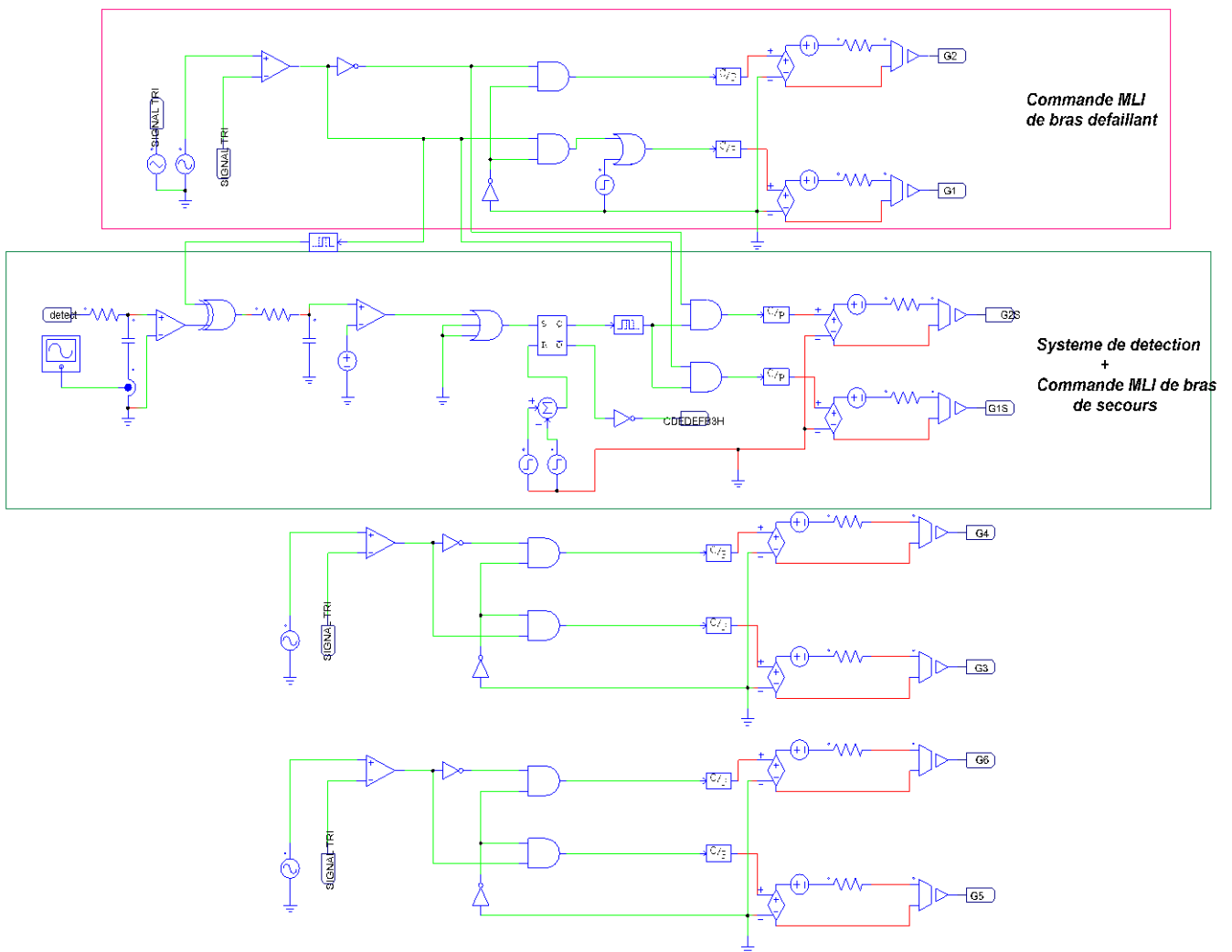


Figure 1.1: Schéma d'onduleur a 4 bras conçu sur PSIM

# Annexe

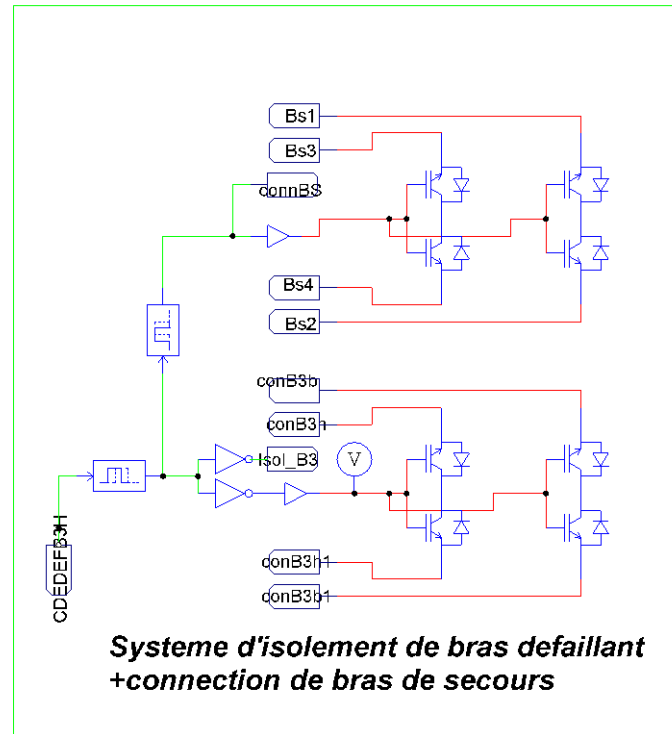


**Figure 1.2 :** Schéma de charge (model de MASP)



**Figure 1.3 :** Schéma de circuit de commande MLI + système de détection de C-C

## Annexe



**Figure 1.4 :** Schéma de structure d'isolement et de connexion

### Paramètres de simulation :

On à utiliser comme charge un moteur asynchrone a aimant permanent, pour ces caractéristiques favorables. Dont ces paramètres sont :

Résistance du rotor : 0.28  $\Omega$

Inductance magnétisante :  $50 \cdot 10^{-6}$  H

Résistance du stator : 0.4  $\Omega$

Nombre de paire de pole : 3

Inductance du rotor :  $5.5 \cdot 10^{-6}$  H

Moment d'inertie : 0.19 Kg\*m<sup>2</sup>

Inductance du stator:  $1.6 \cdot 10^{-6}$  H



## Annexe

Les autres paramètres de simulation :

$$V_{\text{source}} = 2 \cdot 175 \text{V.}$$

$$T_{\text{simulation}} = 0.12 \text{S.}$$

$$T_{\text{def}} = 0.04 \text{S.}$$

$$\text{Délais de réponse} = 0.01 \text{S.}$$

$$C_{\text{filtrage}} = 0.0003 \text{ F.}$$

$$V_{\text{porteuse tri}} = 2 \text{V.}$$

$$F_{\text{porteuse tri}} = 10 \text{KHZ.}$$

$$V_{\text{modulatrice sinu}} = 0,8 \text{V.}$$

$$F_{\text{modulatrice sinu}} = 50 \text{HZ.}$$