



AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE  
ELECTRIQUE DE L'AEROGARE DE COTONOU PAR  
L'UTILISATION D'UN ONDULEUR MLI.

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER SPECIALISE M2 EN GENIE ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET ENERGIE  
RENOUVELABLES (GEER)  
OPTION : Production et distribution d'électricité.

---

Présenté et soutenu publiquement le 12 Mars 2013 par

**Aristide DADE**

**Travaux dirigés par : ATAYI Tsatsi**

Titre Ingénieur

ENTREPRISE DE TRAVAUX ELECTRIQUE CAFE-BENIN

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Hamed Sankara**

Membres et correcteurs : **Marie Sawadogo**  
**Henri Kottin**

**Promotion [2011/2012]**

## REMERCIEMENTS

Je rends grâce à mon Dieu, le TOUT PUISSANT, qui prend soins de moi et de tous mes proches tous les jours ; que ma vie entière soit sous son contrôle tous les jours de ma vie.

J'exprime ma profonde gratitude à tout le personnel d'encadrement de la formation à distance de 2ie.

Je rends un vibrant hommage à madame OUEDRAOGO Sylvie pour son grand dévouement.

A toute ma promotion je dits merci pour l'ambiance qui a régné tout au long de la formation.

# DEDICACE

Je dédie le présent mémoire :

A ma mère pour son affection et son amour pour moi,

A mes sœurs et frères pour leurs encouragements et leurs soutiens,

A Toute ma famille,

A tous mes amis,

A tous ceux et celles que j'aime de près comme de loin.

# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>05</b>
<b>I. Qualité de l'énergie électrique</b>	<b>06</b>
I.1 Creux de tension et coupure	06
I.2 Harmonique et interharmonique	07
I.3 Surtensions	08
I.4 Variations et fluctuations de tension	09
I.5 Déséquilibre et tension	10
<b>II. Dégradation de la qualité de l'énergie électrique</b>	<b>11</b>
II.1 Paramètre d'appréciation de la qualité de l'énergie électrique	11
II.2 Régime de neutre et dégradation de la qualité de l'énergie électrique	11
<b>III. Amélioration de la qualité de l'énergie électrique</b>	<b>13</b>
III.1 Les sources de remplacement	13
III.2 Précaution d'installation	14
<b>IV. l'onduleur tryphasé à commande MLI</b>	<b>16</b>
IV.1 Généralité sur les onduleur commande MLI	16
IV.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur	16
IV.3 Onduleur monophasé	18
IV.4 Montage en demi-pont	19
IV.5 Montage en pont	19
IV.6 Onduleur triphasé en pont	20
IV.7 Classification des onduleurs	21
IV.8 Modélisation de l'onduleur triphasé	21
IV.9 Modulation pré-calculée	<b>25</b>
VI.9.1 Modulation pré-calculée monophasé	26
VI.9.2 Modulation pré-calculée triphasée	31
<b>V. Analyse de la qualité de l'énergie électrique de l'aérogare</b>	<b>35</b>
V.1 Présentation de l'environnement de travail	35
V.2 Problème d'exploitation technique	35
V.3 Présentation du réseau électrique	36
V.4 Analyse du réseau électrique	38
V.5 Analyse de la consommation électrique	38
V.6 Amélioration du réseau électrique	<b>43</b>
V.7 Dimensionnement de la section du câble alimentant le réseau non secouru	48
V.8 Autres travaux d'assainissement du réseau électriques	49
<i>CONCLUSION</i>	<b>50</b>
Bibliographie	51
Annexes	51



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure (I-1) :</b> creux de tension électrique.	<b>09</b>
<b>Figure (I-2):</b> Exemple de charge informatique montrant la déformation du courant et son spectre en harmonique.	<b>10</b>
<b>Figure (I-3):</b> surtension électrique.	<b>11</b>
<b>Figure (I-4):</b> variation de tension.	<b>11</b>
<b>Figure (I-5):</b> déséquilibre de tension.	<b>12</b>
<b>Figure (III-1) :</b> secours électrique avec volant d'inertie.	<b>15</b>
<b>Figure (III-2) :</b> Association onduleur et groupe électrogène.	<b>16</b>
<b>Figure (IV-1) :</b> Symbole et signal d'un onduleur.	<b>19</b>
<b>Figure (IV-2) :</b> Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1 <sup>er</sup> demis cycle.	<b>19</b>
<b>Figure (IV-3) :</b> Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2 <sup>ème</sup> demis cycle.	<b>20</b>
<b>Figure (IV-4) :</b> Signal complet de l'onduleur.	<b>20</b>
<b>Figure (IV-5):</b> Montage d'un onduleur monophasé.	<b>20</b>
<b>Figure (IV-6) :</b> Montage d'un onduleur en demi –pont.	<b>21</b>
<b>Figure (IV-7) :</b> Montage d'un onduleur en pont complet.	<b>21</b>
<b>Figure (IV-8) :</b> Montage d'un onduleur triphasé.	<b>22</b>
<b>Figure (IV-9) :</b> Allure des tensions simples de l'onduleur triphasé.	<b>23</b>
<b>Figure (VI-10) :</b> Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.	<b>24</b>
<b>Figure (V-1) :</b> MLI d'une simple impulsion.	<b>27</b>
<b>Figure (V.2) :</b> MLI multiple.	<b>30</b>
<b>Figure (V.3.a) :</b> MLI sinusoïdale, génération des signaux de commande par une porteuse triangulaire sinusoïdale.	<b>31</b>
<b>Figure (V.3.b) :</b> MLI sinusoïdale, génération des signaux de commande par une porteuse triangulaire unidirectionnelle.	<b>32</b>
<b>Figure (V.3.d) :</b> Indice de modulation M.	<b>33</b>
<b>Figure (V.4)</b> MLI sinusoïdale modifiée.	<b>34</b>
<b>Figure (V.5) :</b> Contrôle par déplacement de phase.	<b>35</b>
<b>Figure (V.6) :</b> Onduleur MLI sinusoïdale triphasée.	<b>36</b>
<b>Figure VI-1 :</b> Signal MLI.	<b>38</b>
<b>Figure (VI-2) :</b> Bloc de simulation de l'onduleur a SHE.	<b>44</b>
<b>Figure (VI-3) :</b> Tensions simple de l'onduleur SHE.	<b>45</b>
<b>Figure (VI-4) :</b> Tensions composée de l'onduleur SHE.	<b>45</b>
<b>Figure (VI-5) :</b> Spectre d'harmonique VAN.	<b>46</b>
<b>Figure (VI-7) :</b> Spectre d'harmonique VAB.	<b>46</b>
<b>Figure (VII-1)</b> Réseau de distribution de l'aérogare de Cotonou.	<b>49</b>

<b>Figure (VII-2) : analyse du facteur de puissance du réseau.</b>	<b>53</b>
<b>Figure (VII-3) : analyse des distorsions harmoniques du réseau.</b>	<b>54</b>
<b>Figure (VII-4) : réseau d'alimentation de haute disponibilité.</b>	<b>55</b>

## Introduction

Depuis quelques années, on observe sur les réseaux électriques, une augmentation des charges dites non-linéaires liées aux équipements informatiques et à l'électronique de puissance. Ces charges contribuent à la dégradation de la tension d'alimentation. Elles génèrent des perturbations dont les principales sont :

- Les creux de tension ;
- Les surtensions ;
- Les déséquilibres de tension ;
- Les harmoniques et inter harmoniques.

Ces perturbations nuisent au bon fonctionnement des équipements et procédés industriels.

Dans le domaine aéroportuaire, les dysfonctionnements ou arrêt de récepteurs du à la mauvaise qualité de l'énergie électrique peut avoir des conséquences allant du simple retard des vols à la mise en cause de la sécurité des personnes.

En effet, le dysfonctionnement de récepteurs prioritaires tels que les ordinateurs des banques d'enregistrement, la chaîne des bandes de traitement et convoyage de bagages, les équipements radioélectriques d'aide à la navigation (VOR, VHF, ILS) peut voir des conséquences graves aussi bien économiques que sur la vie des passagers. Un retard dans les opérations d'enregistrement se répercute sur les programmes des vols et peut même entraîner des annulations des vols. De même un mauvais fonctionnement des équipements de radiocommunication peut occasionner de mauvais atterrissages ou décollages des avions mettant en danger les passagers. Il est donc capital d'avoir sur les aéroports une énergie électrique de qualité et de haute disponibilité.

Le présent mémoire a pour thème « contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique de l'Aéroport International Cardinal Bernardin de Cadjehoun par usage d'onduleur à commande MLI ».

Pour l'étude de ce thème, nous avons effectué notre stage dans une entreprise spécialisée dans le domaine des onduleurs ayant pour raison sociale CAFE informatique. Le thème sera développé en faisant d'abord un état des lieux du réseau de distribution électrique et l'analyse de la qualité du signal électrique dans le réseau, ensuite nous procéderons à l'analyse des résultats obtenus et enfin nous proposerons une solution pour améliorer la qualité de l'énergie et augmenter sa disponibilité.

## **I- Qualité de l'énergie électrique**

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion des sites tertiaires ou industriels et les constructeurs d'équipements, essentiellement pour les raisons suivantes :

- la nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises;
- la généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et eux mêmes générateurs de perturbations;
- l'ouverture du marché de l'électricité.

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste à caractériser les perturbations des paramètres qui définissent la tension électrique. Il s'agit de :

- Les creux de tension et coupure;
- Les harmoniques et inter harmoniques;
- Les surtensions;
- Les variations et fluctuations de tension;
- Les déséquilibres de tension.

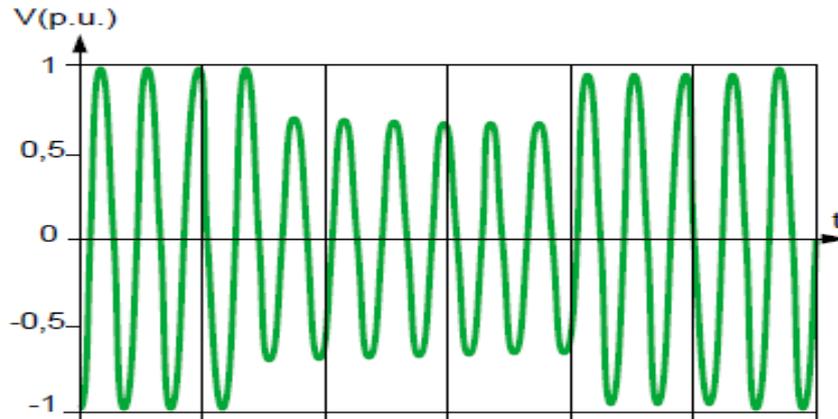
Dans cette partie de notre mémoire, nous allons définir sommairement ces différents concepts, leurs effets et les solutions pour y remédier dans les réseaux de distribution basse tension.

### **I.1- Creux de tension et coupures.**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de demi période à 50 Hz d'après la norme EN 50160. La coupure brève est un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90% pendant une durée inférieure à 3 mn.

Les creux de tension et coupures brèves sont causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension. Ces phénomènes peuvent être des défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution.

La conséquence des creux de tension et coupures, sont les perturbations ou arrêt de procédés tels que les ralentissements ou décrochages de moteurs, ouvertures de contacteurs, pertes de données etc.



**Figure (I-1) : creux de tension électrique.**

Pour palier aux creux de tension et coupure, dans les installations BT, il faut :

- Désensibiliser le contrôle commande par alimentation de toutes les bobines des contacteurs par une alimentation sûr;
- Désensibiliser l'installation en compensant le manque d'énergie par un dispositif à réserve d'énergie notamment les ASI.

Dans le cas où le réseau comporte plusieurs moteurs, il faut échelonner le démarrage des moteurs et utiliser si besoin un compensateur électronique pour la compensation de l'énergie réactive.

## **I.2- Harmoniques et inter harmoniques.**

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence du signal fondamentale (50Hz).

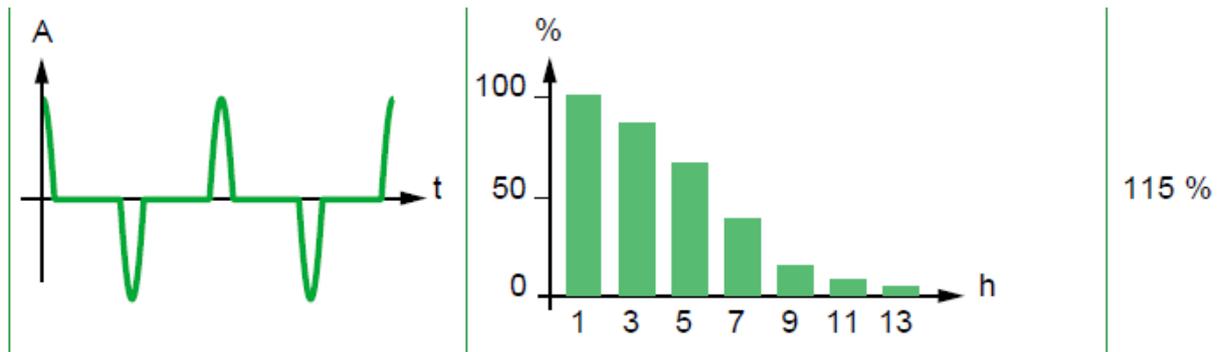
Ils sont générés par des charges dites non linéaires. On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou courant :

$$D\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (I.1)$$

**Y<sub>n</sub>** : valeur efficace de l'harmonique de rang n;

**Y<sub>1</sub>** : valeur efficace du signal fondamental;

C'est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamentale.



**Figure (I-2): Exemple de charge informatique montrant la déformation du courant et son spectre en harmonique.**

Les inters harmoniques sont des signaux non multiples de la fréquence fondamentale. Elles sont générées par les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrone et les fours à arcs.

Les harmoniques et inters harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement des équipements électriques. Parmi ces effets on peut retenir:

- Les claquages diélectriques;
- Les échauffements supplémentaires (neutre, transformateur);
- Les vibrations et fatigues mécaniques;
- Distorsion de la tension.

Pour réduire les harmoniques et inters harmoniques, trois catégories de solutions sont utilisées :

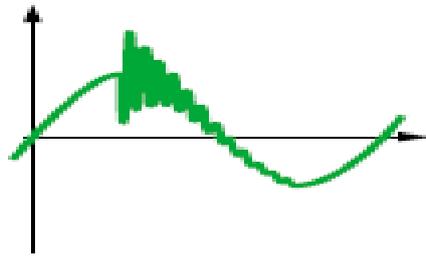
- Usage de filtres passifs;
- Usage de filtres actifs;
- Usage de transformateurs d'isolement.

### **I.3- Surtensions.**

Une surtension est toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification. Les surtensions sont de trois natures :

- Les surtensions temporaires à la fréquence industrielle qui prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, à la rupture du conducteur de neutre, à la ferrorésonance ou à la surcompensation.
- Les surtensions de manœuvres qui résultent d'une modification de la structure du réseau : mise en service d'un gradin de condensateurs, d'une ligne capacitive, l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs.

- Les surtensions atmosphériques provoquées par la foudre soit directement soit par augmentation du potentiel de la terre.



**Figure (I-3): surtension électrique**

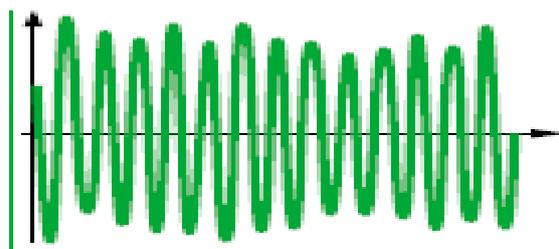
Les surtensions sont à l'origine de la dégradation du matériel par vieillissement prématuré, des claquages diélectriques et des perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible.

Pour lutter contre les surtensions dans les installations basse tension, on utilise des selfs de choc pour limiter les surtensions transitoires. L'utilisation de disjoncteurs de branchement différentiels et sélectifs type S et des disjoncteurs de type SI permet d'éviter les déclenchements intempestifs. Contre les surtensions atmosphériques on utilise les parafoudres.

#### **I.4- Variations et fluctuations de tension.**

Les variations de tension sont des variations de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10% de la tension nominale. Les fluctuations sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente de charges connectées au réseau. Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc.



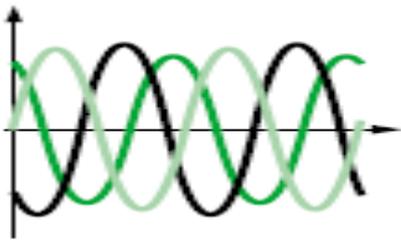
**Figure (I-4): variation de tension**

Vu que les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas  $\pm 10\%$ , la plupart des appareils ne sont pas perturbés. L'effet principal est la fluctuation de la luminosité des lampes.

Une alimentation sans interruption permet de remédier aux variations et fluctuations provenant du réseau de distribution électrique. Dans les installations il faut et utiliser un compensateur automatique au niveau des perturbateurs comme les moteurs à démarrage fréquents.

### **I.5- Déséquilibre de tension.**

Il y a déséquilibre de tension lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et ou ne sont pas déphasées les unes des autres de  $120^\circ$ .



**Figure (I-5): déséquilibre de tension**

Les déséquilibres sont provoqués par les défauts monophasés ou biphasés. Ils ont pour principal effet, le sur échauffement des machines asynchrones triphasées. Ils sont aussi à la base de vibration des moteurs.

Pour lutter contre les déséquilibres, il faut équilibrer les charges, utiliser des régulateurs électroniques dynamiques de tension, augmenter la puissance de court circuit du réseau.

## II- Dégradation de la qualité de l'énergie électrique.

### II.1- Paramètres d'appréciation de la qualité de l'énergie électrique :

L'énergie électrique est dite dégradée lorsque la valeur des paramètres qui la caractérisent sort d'une certaine tolérance donnée. Les tolérances généralement admises pour le bon fonctionnement d'un réseau comprenant des charges sensibles aux perturbations sont données dans le tableau suivant :

PARAMETRES DU RESEAU	TOLERANCES
Tension en régime établi (charges constantes)	$\pm 2\%$
Tension en régime dynamique (charge variables)	$\pm 10\%$
Fréquence	$\pm 1\%$
Taux global d'harmonique	$< 5\%$
Dissymétrie de tension	$< 4\%$
Déphasage en tension	$120^\circ \pm 3^\circ$
Microcoupures	$< 10\text{ms}$

### II.2- Régime du neutre et dégradation de l'énergie électrique.

#### II.2.1 Les différents régimes de neutre :

- Régime « neutre à la terre » : TT

Dans ce régime le neutre du transformateur est mis à la terre ainsi que les masses des récepteurs électriques.

Le courant d'un défaut d'isolement est limité par l'impédance des prises de terre. La protection est assurée par des dispositifs à courant résiduel DDR. **La coupure est obligatoire au premier défaut.**

- Régime « mise au neutre » TN

Le neutre du transformateur est mis à la terre et la masses des récepteurs sont reliées au neutre. Un défaut d'isolement dans ce régime se transforme en court circuit et la partie en défaut est déconnectée par un dispositif de protection contre les courts circuits DPCC.

- Régime « neutre isolé »

Le neutre du transformateur est relié à la terre à travers une impédance de valeur d'environ  $1500\Omega$ . Les masses des récepteurs sont reliées à la terre.

Si un premier défaut survient sur une phase, un faible courant se développe et la tension de contact qui en résulte ne présente aucun danger.

Si un deuxième défaut survient sur une autre phase, alors que le premier n'est pas éliminé, les masses des récepteurs sont portées à un potentiel dangereux. La coupure est alors obligatoire et s'effectue grâce aux organes de protection contre les surintensités ou par les dispositifs différentiels.

### **II.2.2- Régime du neutre et disponibilité de l'énergie.**

Les trois schémas de liaison à la terre offrent le même niveau de sécurité aux utilisateurs contre les contacts indirects.

Les trois régimes peuvent coexister. Le choix de l'un ou l'autre dépend des caractéristiques de l'installation et des conditions et impératifs d'exploitation.

Dans les régimes TT et TN, la coupure est obligatoire au premier défaut. Néanmoins la sélectivité au déclenchement est plus facile à mettre pour le régime TT ce qui minimise le dégât et le rend meilleur par rapport au régime TN.

Seul le régime IT permet de continuer l'exploitation en présence d'un défaut d'isolement.

C'est un avantage indéniable qui a pour contrepartie des contraintes de recherche de premier défaut donc de personnel qualifié.

### III- Amélioration de la qualité du réseau.

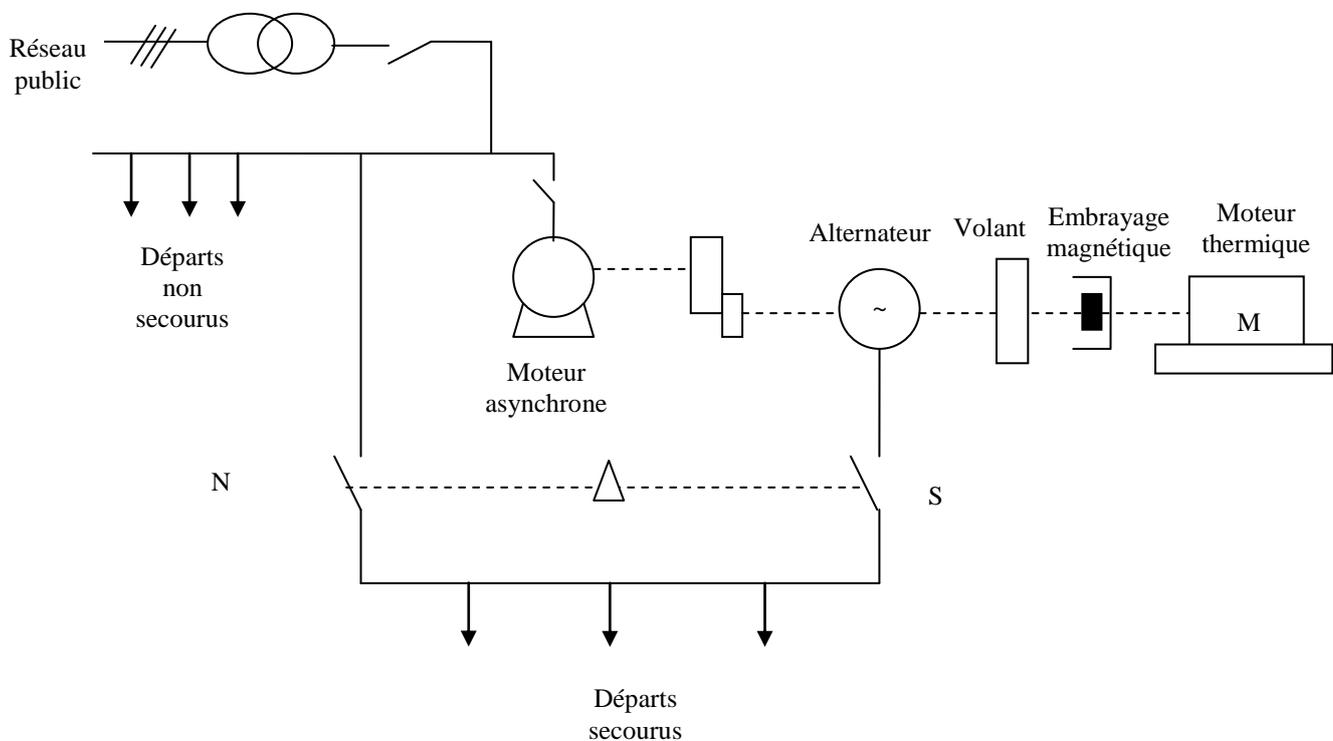
Pour arriver à maintenir dans les tolérances requises les valeurs qui caractérisent l'énergie électrique, plusieurs précautions sont à prendre au niveau de l'installation.

#### III.1- les sources de remplacement.

Plusieurs types de source remplacement peuvent être utilisés en fonction des besoins :

- **Groupes tournants alimenté par le réseau.**

Il est constitué d'un volant d'inertie couplé à un alternateur, d'un moteur synchrone et d'un moteur thermique.



**Figure (III-1) : secours électrique avec volant d'inertie**

L'alternateur et son volant sont maintenus en vitesse par un moteur asynchrone alimenté par le réseau. Dès que la source normale disparaît, l'alternateur continue la fourniture de l'énergie grâce au volant d'inertie. Le moteur thermique démarre et vient prendre la relève du volant d'inertie.

- **Les groupes générateurs autonomes.**

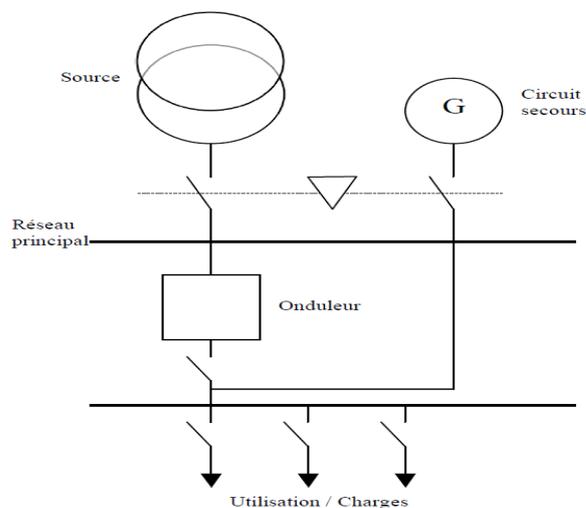
Ils sont efficaces contre toutes les perturbations avec une interruption de l'alimentation pendant le basculement normal/secours.

- **Alimentation Sans Interruption (ASI).**

Une **alimentation sans interruption** est un dispositif de l'électronique de puissance qui permet de fournir à un système électrique ou électronique une alimentation électrique stable et dépourvue de coupure ou de microcoupures.

Elle est constituée de la mise en cascade d'un montage redresseur, d'un dispositif de stockage de l'énergie (batterie d'accumulateurs) et d'un onduleur fonctionnant à fréquence fixe.

- **Association onduleurs et groupes électrogènes.**



**Figure (III-2) : Association onduleur et groupe électrogène**

Cette solution couvre les types de perturbations.

### III.2-Précautions d'installation.

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique plusieurs précautions peuvent être prises :

#### Isolation des charges perturbantes :

Plusieurs précautions sont à prendre pour isoler les charges perturbantes :

- Alimenter les charges importantes par un réseau séparé en partant d'une arrivée HT spécifique.
- Subdiviser les circuits pour qu'un défaut sur un circuit affecte le moins possible un autre circuit ;
- Séparer les circuits comportant des charges perturbantes des autres circuits au niveau le plus haut possible de l'installation BT pour bénéficier de l'affaiblissement des perturbations par l'impédance des câbles.

#### Choix du régime de neutre adapté :

Le régime IT garantie comme vu précédemment, une continuité d'exploitation en évitant par

exemple, l'ouverture des circuits par déclenchement intempestif d'un dispositif différentiel à la suite d'une perturbation transitoire.

**Assurer la sélectivité des protections :**

La sélectivité permet d'avoir une continuité d'exploitation sur le reste du réseau car elle limite la coupure au circuit en défaut.

## **IV- L'onduleur triphasé a commande MLI**

### **IV.1- Généralité sur les onduleurs en MLI.**

La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée.

La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant. D'autre part, si la tension d'entrée est fixe et qu'elle soit non contrôlable, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur.

Il y a plusieurs techniques pour obtenir cette variation ; la technique de modulation des largeurs d'impulsion MLI est la plus répandue. Elle consiste à changer de largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur.

La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur idéale doit être sinusoïdale. Cependant, cette forme d'onde n'est pas sinusoïdale en pratique et contient quelques harmoniques. Pour des applications de faible et moyenne puissances, les tensions de forme d'onde carrée ou quasi-carrée pourront être acceptables ; alors que pour des applications de forte puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion harmonique est exigé.

Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse, l'harmonique contenue dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement par des techniques de commande.

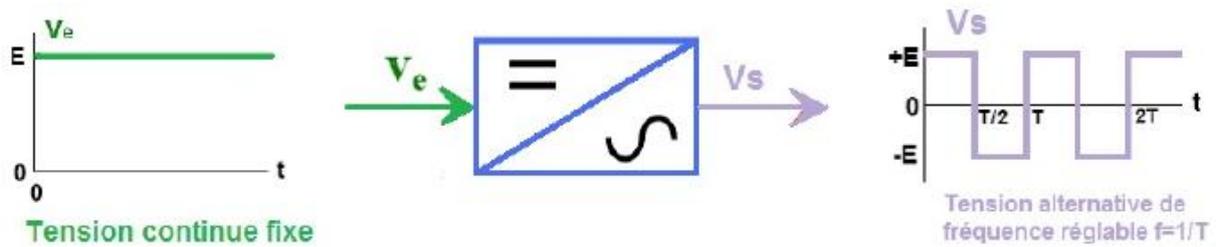
Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles :

- Les alimentations non interrompues (UPS) ;
- les variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif, le chauffage par induction.

L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue de panneaux solaires ou toute autre source de tension continue.

### **IV.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur.**

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation. Une onde alternative est générée à partir d'une tension continue comme le montre la figure (VI-1).

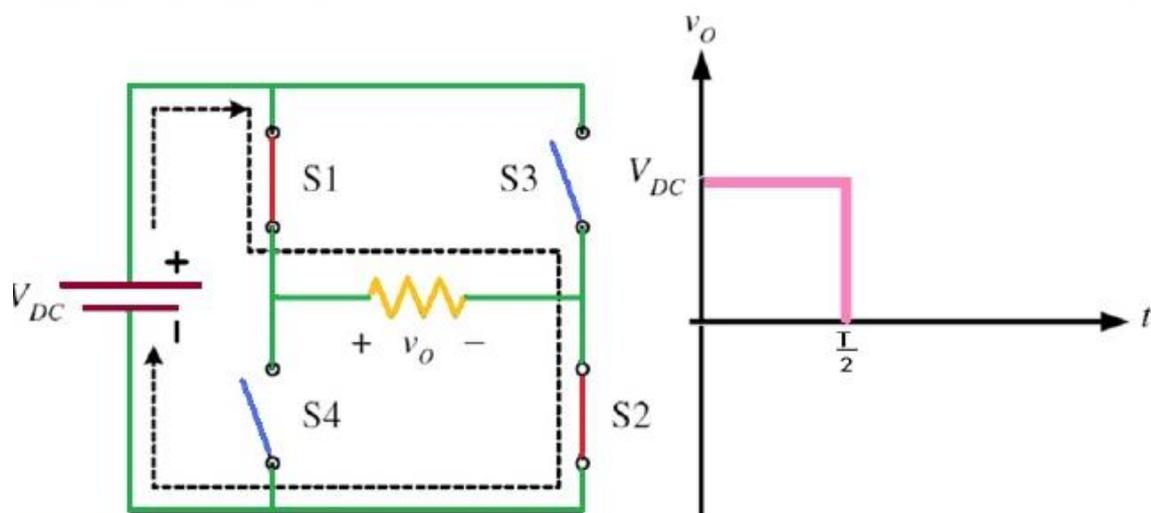


**Figure (IV-1) : Symbole et signal d'un onduleur**

La tension de sortie peut être obtenue de deux façons :

- l'utilisation d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie.
- Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Soit la figure (IV-2). On peut noter que les interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$  sont Fermés et  $S_3$  et  $S_4$  sont ouverts. Pour un temps compris entre 0 et  $T/2$  on obtient une alternance positif et  $V_o(t) = V_{DC}$ .



**Figure (IV-2) : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1<sup>er</sup> demis cycle**

De même lorsque  $S_1$  et  $S_2$  sont ouverts et  $S_3$  et  $S_4$  sont fermés (voir figure IV-3), pour le

temps compris entre  $T/2$  et  $T$ , on obtient une alternance négative et  $V_o(t) = -V_{DC}$ .

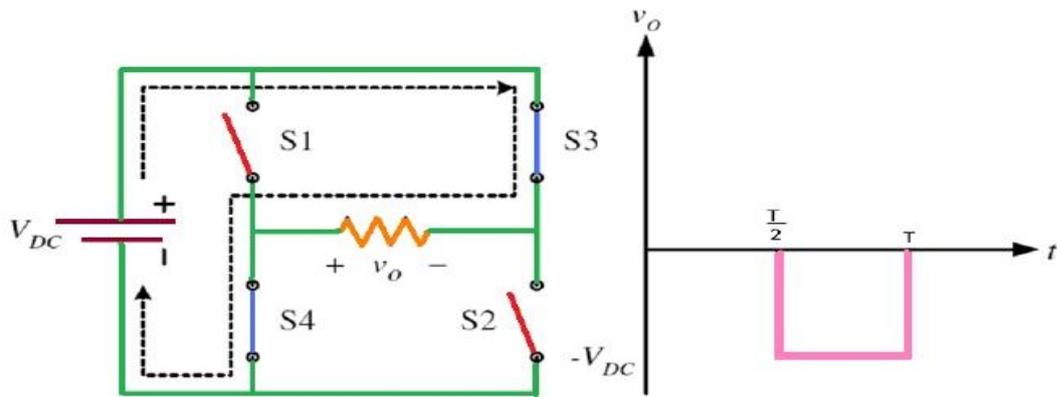


Figure (IV-3) : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demi cycle

Le signal résultant sur une période est présenté sur la figure (IV-4)

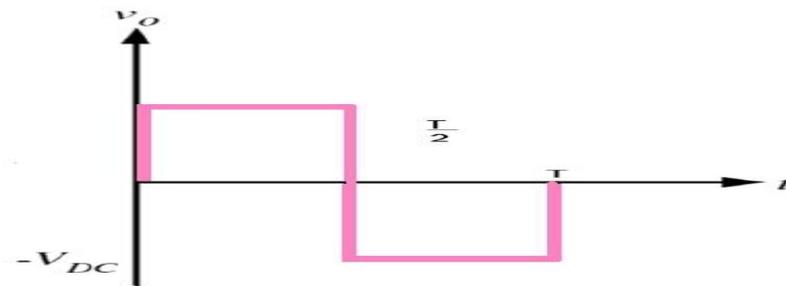


Figure (IV-4) : Signal complet de l'onduleur

### VI.3- Onduleur monophasé

Pour réaliser un onduleur monophasé il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur  $K$  et d'une source de tension continue  $E$  comme le montre la figure (IV-5).

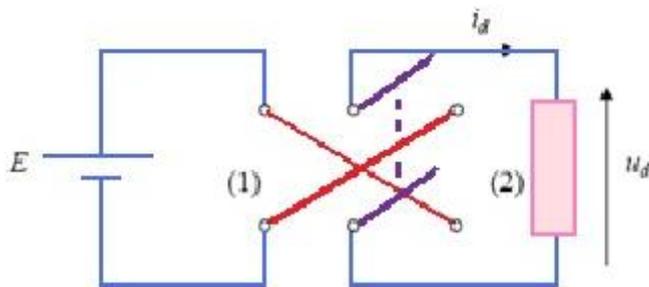


Figure (IV-5): Montage d'un onduleur monophasé.

Dans la pratique, deux types de montages sont utilisés :

#### IV.4- Montage en demi-pont.

Dans ce type de montage (figure IV-6), on fait l'hypothèse que la capacité « C » des condensateurs est suffisamment grande pour considérer qu'en régime permanent, la tension à leur bornes reste toujours égale à  $E/2$ .

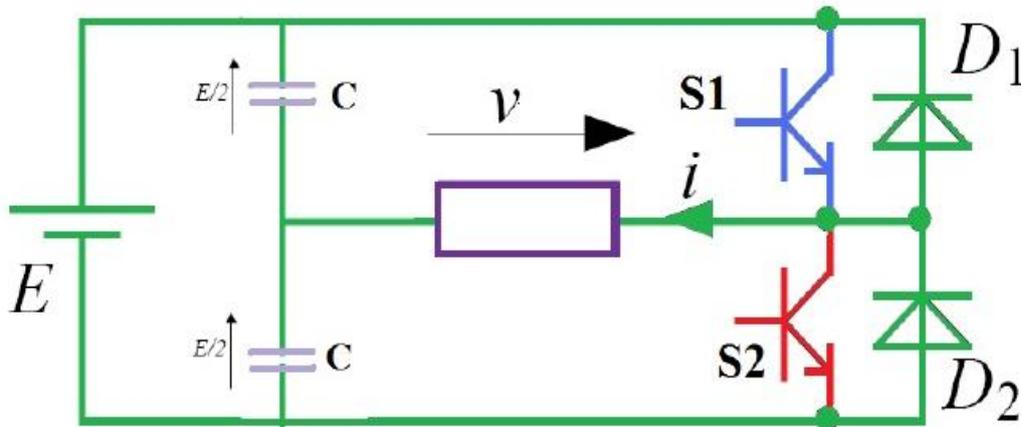


Figure (IV-6) : Montage d'un onduleur en demi -pont

#### VI.5-Montage en pont

Il est constitué de deux cellules de commutation et la charge est connectée entre les sorties S1 et S2 de chacune des deux cellules (figure IV-7). La tension de sortie est donc la différence entre les tensions élémentaires  $v_{s1}$  et  $v_{s2}$  de chaque cellule.

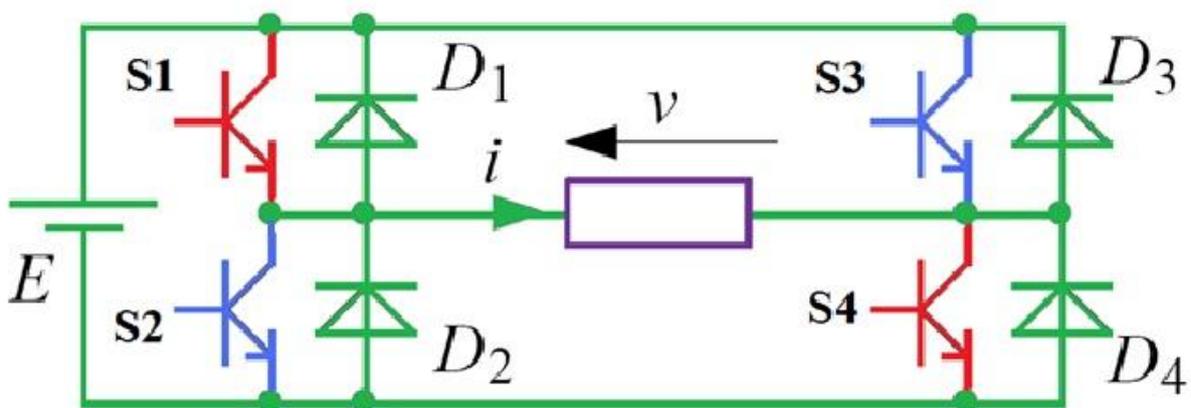


Figure (IV-7) : Montage d'un onduleur en pont complet

L'intérêt des montages en pont ou en demi-pont réside dans l'utilisation d'une seule source de

tension  $E$ .

La diode parallèle est utilisée quand le courant dans le commutateur est négatif.

La diode inverse est décentrée quand le courant est positif dans le commutateur.

#### IV.6- Onduleur triphasé en pont

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation (figure : IV-8). On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime normal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré.

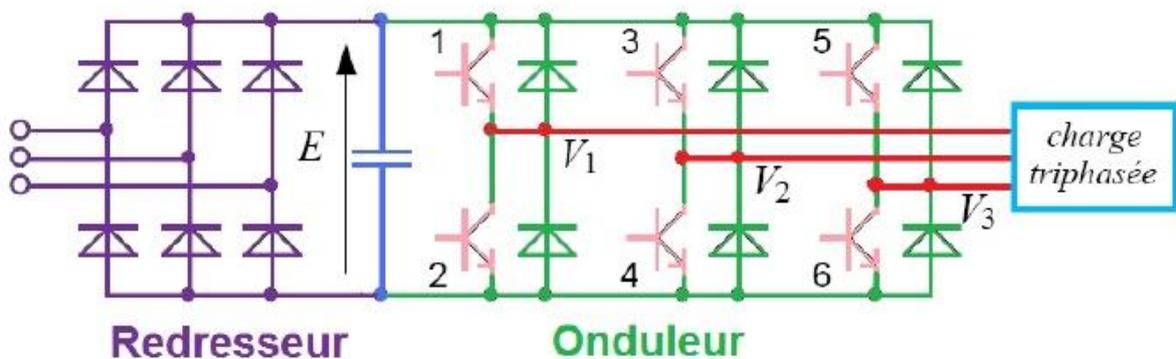
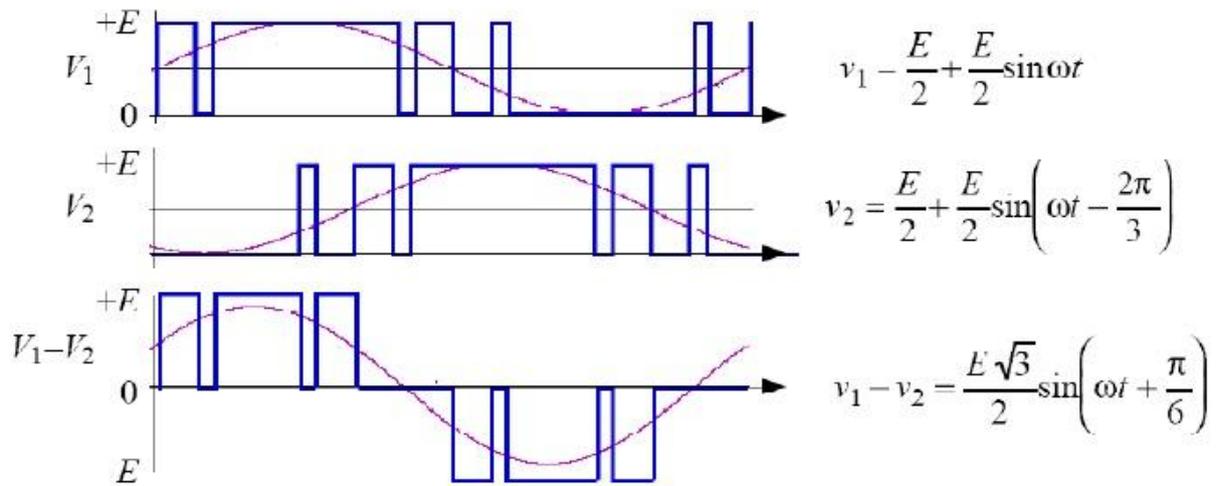


Figure (IV-8) : Montage d'un onduleur triphasé.

#### Principe de fonctionnement (une phase):

Dans la configuration différentielle de l'onduleur triphasé, la cellule de commutation peut donc être considérée comme une phase de l'onduleur, la composante alternative de sa tension de sortie constituant une tension simple comme le montre la figure (IV-9) ci-dessous pour chaque tension.



**Figure (IV-9) : Allure des tensions simples de l'onduleur triphasé.**

#### IV.7 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

##### a. Onduleur autonome :

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La Charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

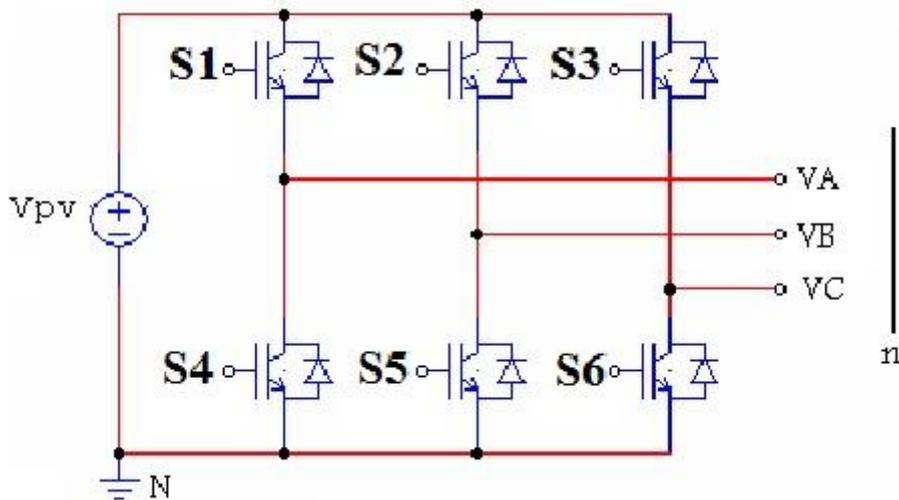
##### b. Onduleur non autonome :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "**naturelle**" contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

#### IV.8 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la figure (IV-10). On doit distinguer d'une part les tensions de branche  $V_{An}$ ,  $V_{Bn}$ ,  $V_{Cn}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{pv}$ , d'autre part, il y a les tensions de

phases  $V_{An}$ ,  $V_{Bn}$  et  $V_{Cn}$  mesurées par rapport à un point neutre flottant (n) représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  et  $V_{CA}$ .



**Figure (IV-10) : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé**

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure (IV-10), il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit :

$$\begin{aligned} V_{AN} &= S_1 V_{Pv} \\ V_{BN} &= S_2 V_{Pv} \\ V_{CN} &= S_3 V_{Pv} \end{aligned} \tag{IV-1}$$

Où  $S_1, S_2$  et  $S_3$  désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement.

- les tensions composées sont :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = (S_1 - S_2) V_{Pv} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = (S_2 - S_3) V_{Pv} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = (S_3 - S_1) V_{Pv} \end{aligned} \tag{IV-2}$$

On peut l'écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

(IV-3)

- Les tensions simples sont :

$$V_{AN} = \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN})$$

$$V_{BN} = \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{AN})$$

$$V_{CN} = \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN})$$

$$\begin{pmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

(IV-4)

#### IV.9-Commande MLI pré calculé.

Pour qu'un onduleur élimine les fluctuations de la tension continue d'entrée en maintenant la relation tension/fréquence constante tout réglant l'amplitude de la tension requise par la charge, plusieurs méthodes sont utilisées. La méthode MLI est l'une des plus efficaces. En plus de régler l'amplitude, cette méthode contrôle le contenu harmonique de la tension de sortie de l'onduleur en repoussant les harmoniques d'ordre inférieur vers les fréquences les plus élevées, ce qui rend le filtrage plus facile et moins coûteux car la taille des composants du filtre est réduite.

Cependant, on note que la technique MLI a des limites par rapport à la fréquence d'opération des onduleurs. Plus cette fréquence est élevée, plus le sont aussi les pertes dues à la commutation des interrupteurs à semi-conducteur. En plus, la fréquence d'opération des onduleurs MLI est également limitée par la vitesse de commutation propre des interrupteurs à semi conducteur.

Plusieurs techniques de contrôle à MLI ont été développées. Les plus utilisées sont les suivantes :

- Modulation MLI simple,
- Modulation MLI multiple,
- Modulation MLI sinusoïdale,

- Modulation MLI sinusoïdale modifiée,
- Commande par déplacement de phase.

D'après les études faites par les chercheurs, on déduit qu'aucune de ces techniques ne réduit de façon significative ce problème d'harmoniques. La MLI permet de se rapprocher du signal désiré; cependant cette technique est imparfaite. Le contenu des harmoniques généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans les transformateurs, pertes joule dans la ligne et le convertisseur), dans la charge (pertes joule, pertes fer et pertes par courant de Foucault). Elle génère dans les machines tournantes des oscillations du couple, des bruits acoustiques et des résonances électromagnétiques.

Elles injectent du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. Il est donc impératif de minimiser les harmoniques; ce qui a conduit à la mise au point de techniques dites avancées dont la MLI pré calculé.

#### **IV.9-1 MLI pré calculé monophasée**

Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables.

Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi- période. Cette onde est caractérisée par le nombre de créneaux ou d'impulsions par alternance. Que ce soit impair ou pair, ces angles suffisent pour déterminer la largeur de l'ensemble des créneaux ; On représente aussi le nombre d'angles de commutation par quart de période. Ces angles de commutation sont déterminés de telle façon à éliminer certains harmoniques.

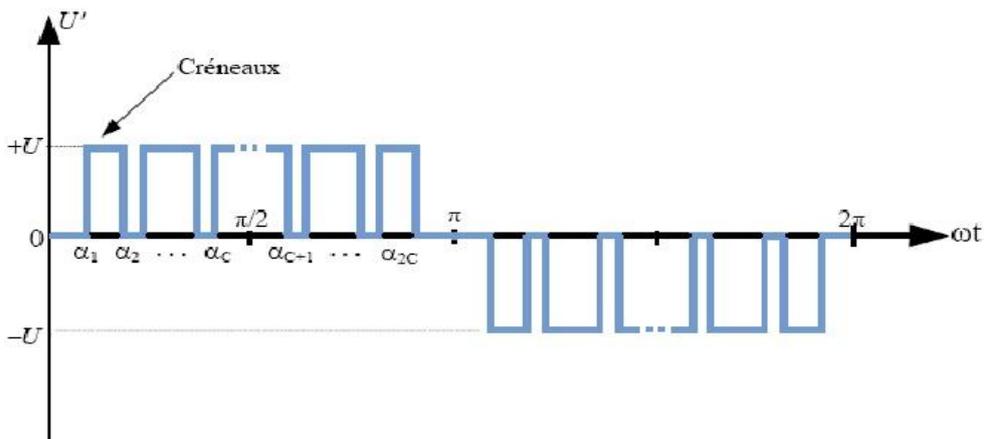
On peut s'intéressé par exemple à éliminer les premiers harmoniques (ex : 3, 5, 7, 9,11,...pour le monophasé et 5, 7, 11, 13, 17, ... pour le triphasé) qui sont les plus gênants et donc indésirables pour le fonctionnement des charges telles que les moteurs électriques.

##### **a. Décomposition en série de Fourier d'un signal MLI**

Généralement, on utilise une onde qui présente une symétrie par rapport au quart de période puis, déduire les autres angles par symétrie. La figure VI.1, nous montre après décomposition en série de fourrier d'un signal MLI symétrique par rapport au quart de période et antisymétrique par rapport à la demi période. L'existence d'harmoniques d'ordre impaires.

Les angles de commutations  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_c, \alpha_{c+1}$  nous permettent, en les contrôlant, d'éliminer

les harmoniques et de contrôler la fondamentale.



**Figure IV-11 : Signal MLI.**

La transformée de fourrier d'un signal alternatif périodique est donnée par :

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n \omega t) + b_n \sin(n \omega t)) \quad (\text{VI.1})$$

Avec :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(n \omega t) d(\omega t) \quad (\text{VI.2})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(n \omega t) d(\omega t) \quad (\text{VI.3})$$

Pour un signal périodique avec une symétrie sur le quart de période et une antisymétrie sur la demi-période, on a :

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_n &= 0 \end{aligned}$$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{2/\pi} u(t) \sin(n \omega t) d(\omega t)$$

Si on suppose que le signal  $U(t)$  a une amplitude  $E$  égal à  $\pm 1$  alors  $b_n$  sera égal à :

$$b_n = \left[ \int_0^{\alpha_1} (+1) \sin(n wt) d(wt) + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (-1) \sin(n wt) d(wt) + \dots \right. \\ \left. + \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} (-1)^{k-1} \sin(n wt) d(wt) + \int_{\alpha_k}^{\frac{\pi}{2}} (-1)^{k-1} \sin(n wt) d(wt) \right] \quad (\text{VI.4})$$

Et en utilisant l' expression suivante :

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin(n wt) d(wt) = \frac{1}{n} (\cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2) \quad (\text{VI.5})$$

Les premiers et les derniers termes deviennent:

$$\int_0^{\alpha_2} (+1) \sin(n wt) d(wt) = \frac{1}{n} (1 - \cos n\alpha_1) \quad (\text{VI.6})$$

$$\int_{\alpha_k}^{\frac{\pi}{2}} (-1)^k \sin(n wt) d(wt) = \frac{1}{n} (\cos n\alpha_1 (-1)^k) \quad (\text{VI.7})$$

En intégrant les autres termes et en utilisant les équations (VI.6) et (VI.7) on obtient:

$$b_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2 (-\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 - \cos n\alpha_3 + \dots + (-1)^k \cos n\alpha_k)]$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[ 1 + 2 \sum_1^k ((-1)^k \cos n\alpha_k) \right] \quad (\text{VI.8})$$

Cette équation contient k équations à k inconnues, le fondamental peut être contrôlé et (k-1) harmoniques peuvent être éliminés.

Nous avons donc :

$$u(t) = \sum_{n=1}^k \left[ \frac{4}{n\pi} \left( 1 + 2 \sum_{i=1}^k ((-1)^i \cos n\alpha_k) \right) \sin nwt \right] \quad (\text{VI.9})$$

Sachant que la valeur efficace est donnée par:

$$U'_{10} = \frac{b_1}{\sqrt{2}}, U'_{12} = \frac{b_3}{\sqrt{2}}, \dots, U'_{1n} = \frac{b_n}{\sqrt{2}} \quad (\text{VI.10})$$

On a le système d' équation suivant:

$$\begin{cases} U'_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} [1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 + \dots + (-1)^k 2 \cos \alpha_k] \\ U'_3 = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} [1 - 2 \cos \beta \alpha_1 + 2 \cos \beta \alpha_2 + \dots + (-1)^k 2 \cos \beta \alpha_k] \\ \vdots \\ U'_n = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} [1 - 2 \cos n\alpha_1 + 2 \cos n\alpha_2 + \dots + (-1)^k 2 \cos n\alpha_k] \end{cases} \quad (\text{VI.11})$$

Pour une commande onde pleine à 180°, la fondamentale pour un montage en pont à pour valeur efficace :

$$U'_{10} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \quad (\text{VI.12})$$

En substituant les équations (VI.10) et (VI.12) dans le système ci-dessus en comparant la valeur efficace de la sortie obtenue avec la MLI à celle de la commande à onde pleine, le système à résoudre devient :



Le choix des conditions initiales reste toujours une tâche délicate du fait que le système est non linéaire.

#### Application de la méthode:

Pour un système triphasé, les harmoniques de rang trois ou multiple de trois disparaissent. On calcule les K angles de façon à annuler les (K-1) premiers harmoniques impairs autre que ceux de rang trois ou multiple de trois. Si on veut éliminer seulement les trois premiers (5,7,11). Le système ci-dessous sera constitué de quatre équations à quatre variables.

$$\begin{cases} \frac{P}{2} = \frac{U_1'}{2U_{10}} = \left[ \frac{1}{2} - \cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 - \cos \alpha_3 + \cos \alpha_4 \right] \\ 0 = \left[ \frac{1}{2} - \cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 - \cos 5\alpha_3 + \cos 5\alpha_4 \right] \\ 0 = \left[ \frac{1}{2} - \cos 7\alpha_1 + \cos 7\alpha_2 - \cos 7\alpha_3 + \cos 7\alpha_4 \right] \\ 0 = \left[ \frac{1}{2} - \cos 11\alpha_1 + \cos 11\alpha_2 - \cos 11\alpha_3 + \cos 11\alpha_4 \right] \end{cases} \quad (\text{VI.15})$$

Avec :

$$U_{10} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E$$

#### IV.9. MLI triphasé

Le point milieu de la source de tension est fictif. Les commandes des interrupteurs d'une même branche sont disjointes (et complémentaire pour l'onduleur monophasé). La décomposition en série de Fourier donne :

$$V_{AO} = \frac{E}{n\pi} \left[ \sin \left( \frac{n\pi}{2} \right) + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \sin n\alpha_k \right] \quad (\text{VI.16})$$

Dans ce cas aussi, on cherche à annuler les harmoniques sachant que ceux d'un rang multiple de 3 sont naturellement éliminés.

Les critères usuellement retenus sont pour la MLI recalculer :

- Élimination d'harmoniques de rang spécifié,

- Élimination d'harmoniques dans une bande de fréquence spécifiée,
- Minimisation d'un critère d'harmoniques global.

La modulation est caractérisée par  $M$  angles électriques.

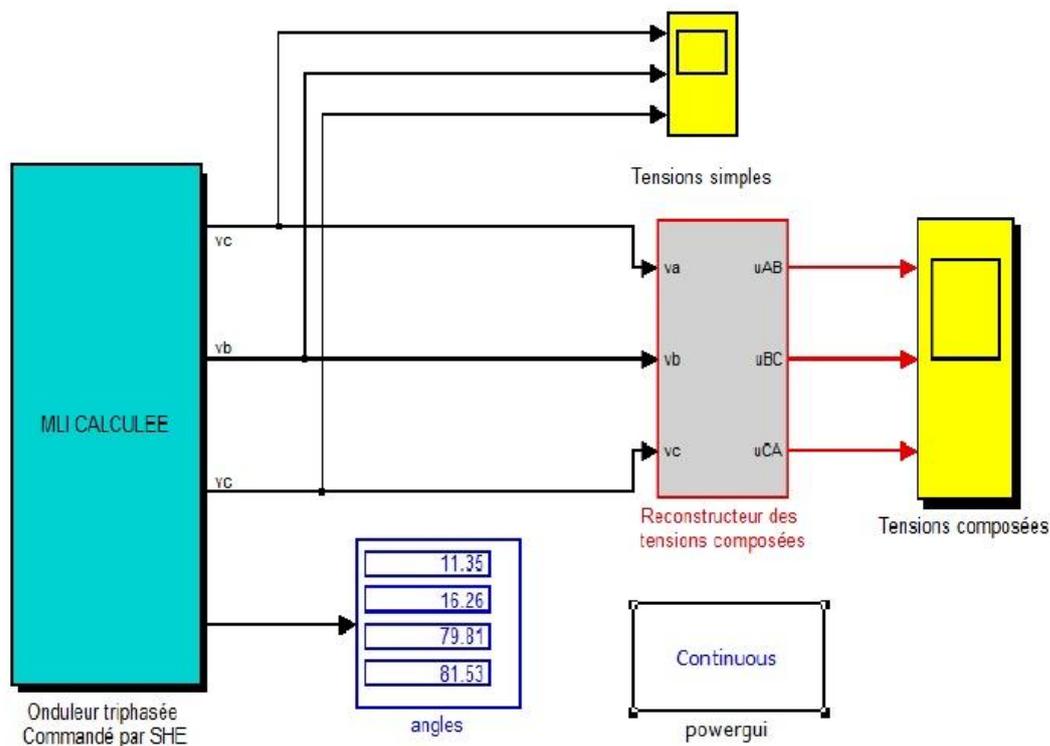
Ces angles  $M$  permettent:

- Soit d'annuler  $M$  harmoniques
- Soit d'annuler  $M-1$  harmoniques et de fixer L'amplitude de la fondamentale.

### Simulation de l'onduleur triphasé

On a pu effectuer la simulation de l'onduleur triphasé sous environnement MATLAB commandé par la stratégie d'élimination d'harmonique (SHE).

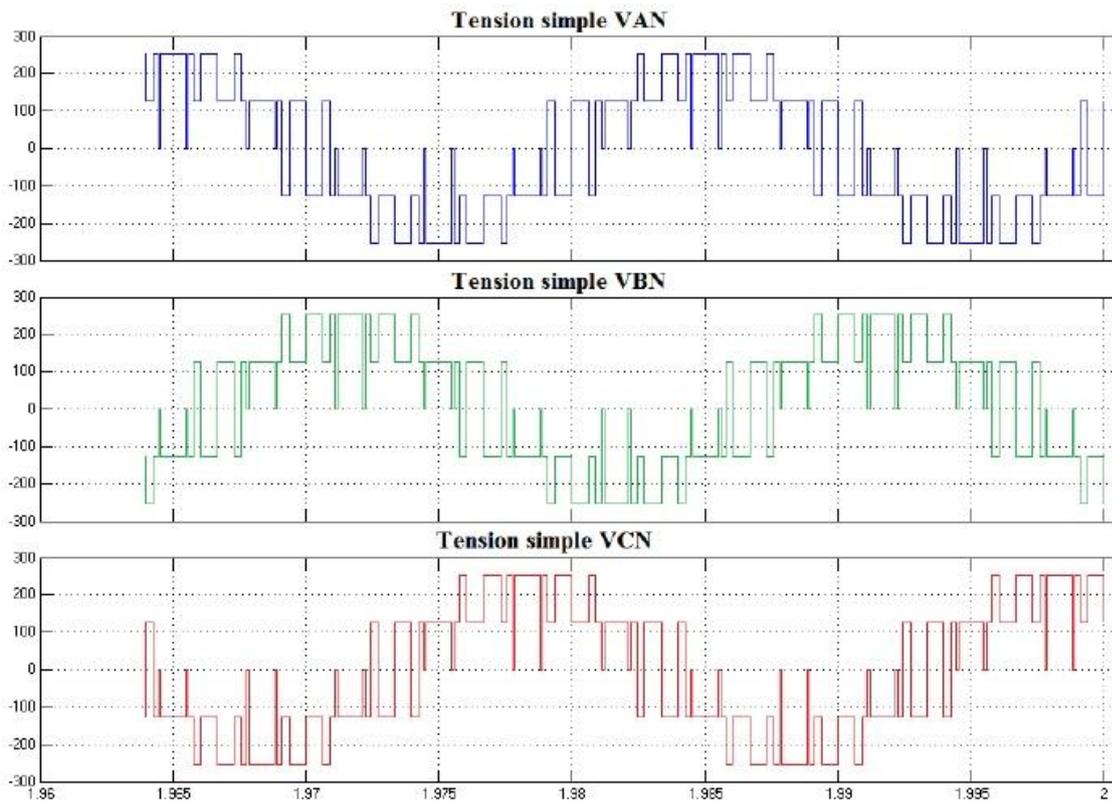
Sur la figure ci-dessous on présente le schéma bloc de l'onduleur triphasé sous environnement MATLAB/ SIMULINK avec la tension d'entrée 380 V continu et un rapport de valeur efficace 0.9.



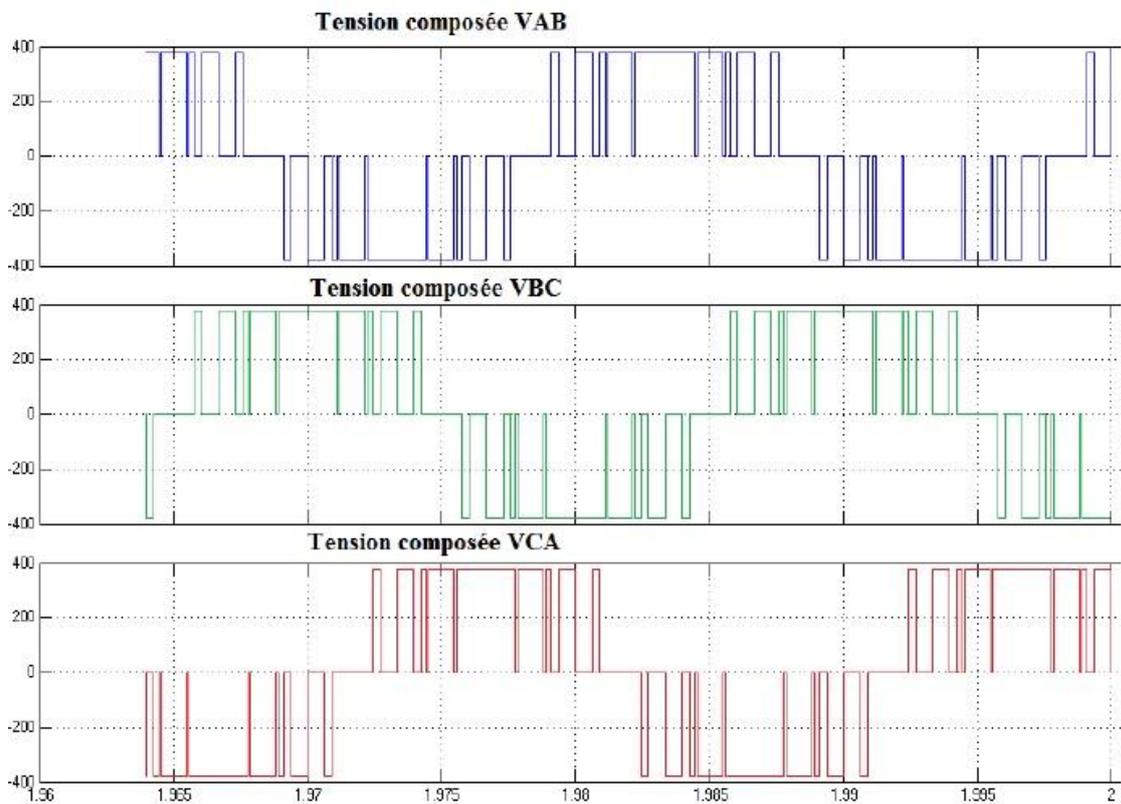
**Figure (IV-12) : Bloc de simulation de l'onduleur a SHE**

Cette simulation nous donne les résultats suivant pour les tensions simples et les tensions composées comme la montre les deux figures (IV-13) et (IV-14) ci-dessous :

A la sortie on a une tension simple VAN de valeur 216.4 V et une tension composée VAB de 376.7 V.



**Figure (IV-13) : Tensions simple de l'onduleur SHE**



**Figure (IV-14) : Tensions composée de l'onduleur SHE**

## Analyse du spectre d'harmonique pour les tensions simples et composées

### A – Tension simple VAN

La figure (IVI15) nous montre le spectre d'harmonique pour la tension simple avec un THD important de 53.56% avec une tension simple de sortie 216.4 V.

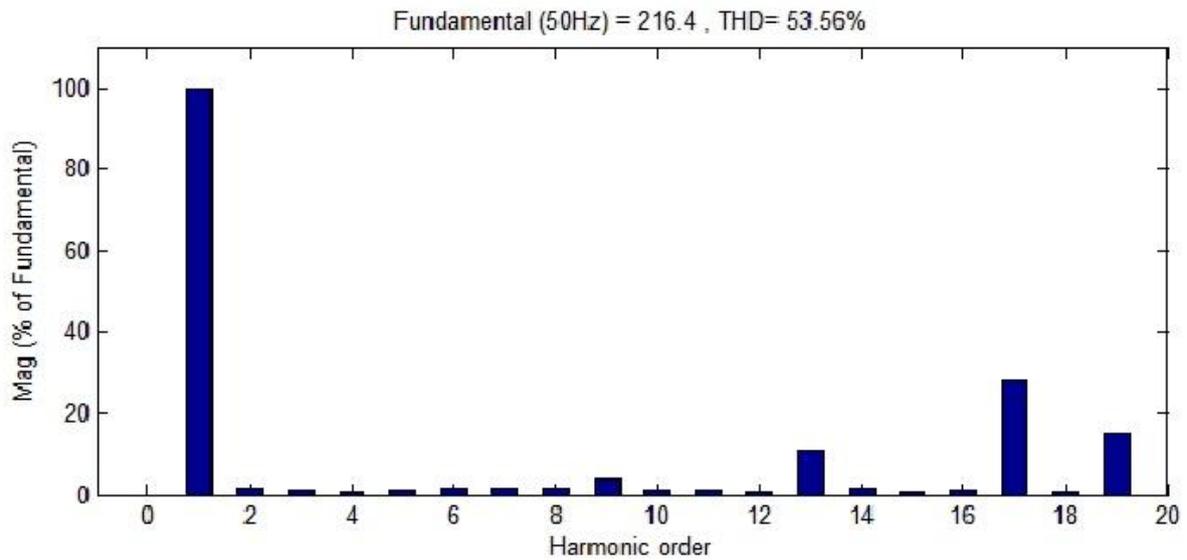


Figure (IV-15) : Spectre d'harmonique VAN

Les harmoniques 5 – 7 – 11 sont presque éliminées

### B- Tension composée VAB

La figure (IV-16) nous montre le spectre d'harmonique pour la tension simple avec un THD important de 52.32% et une tension VAB composée de 376.7 V.

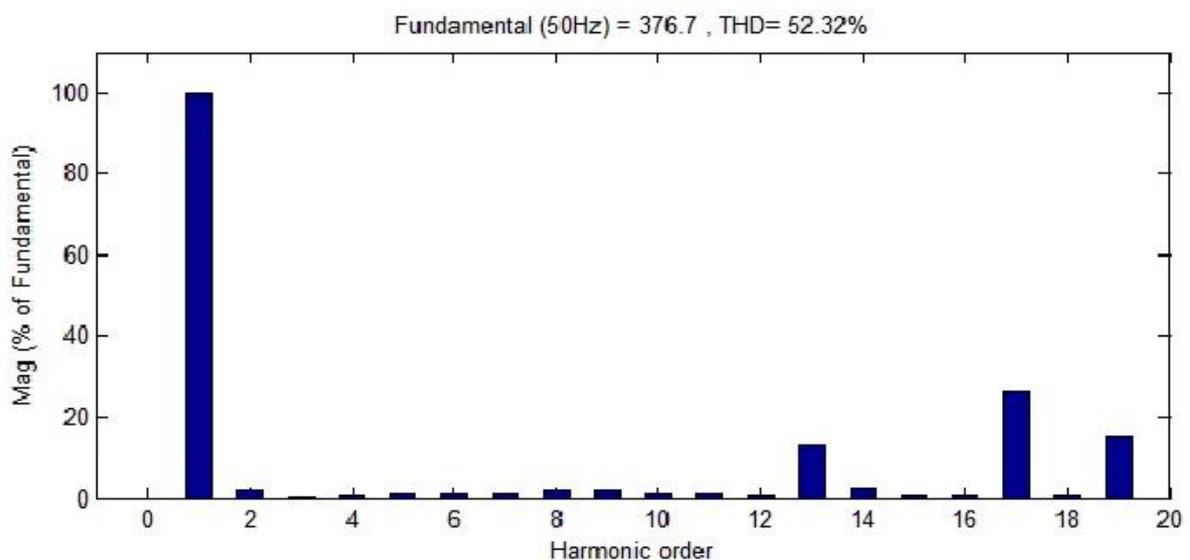


Figure (IV-17) : Spectre d'harmonique VAB

## **V-Analyse et amélioration de la qualité de l'énergie électrique de l'aérogare de Cotonou.**

### **V.1-Présentation de l'environnement de travail procédure d'analyse.**

La présente étude se déroule à l'Aéroport International Cardinal Bernardin Gantin de Cadjèhoun de Cotonou. C'est un Aéroport dont la Gestion est assurée par l'ASECNA à travers une structure nommée Délégation de gestion aux Activités Aéronautiques Nationales du Bénin (DAANB). Cette structure a pour mission, entre autres, de mettre en place tous les équipements nécessaires aux opérations d'enregistrement et d'embarquement des passagers.

L'Aéroport est un milieu à fonctionnement contraignant. En effet, les vols d'avions de transports de passagers se déroulent suivant des programmes préétablis. Les opérations d'enregistrements de passagers et de leurs bagages s'effectuent en fonction de ces programmes. Tout dysfonctionnement dans les opérations d'enregistrement a une répercussion sur les plans de vols avec des pertes économiques et de fiabilité pour les compagnies aériennes. Etant entendu que les équipements fonctionnent grâce à l'électricité, il est primordial d'attacher un grand prix à la qualité de l'énergie qui les alimente.

Les objets poursuivis dans les présents travaux sont :

- Faire un résumé des dysfonctionnements électriques survenus sur le réseau de distribution de l'aérogare ;
- Analyser l'architecture du réseau la qualité de l'énergie ;
- Proposer des solutions en vue d'améliorer la qualité de l'énergie qui alimente les équipements ;
- Mettre en œuvre dans la mesure du possible les solutions recommandées.

### **V.2-Problèmes liés à l'exploitation technique.**

De la lecture du registre des événements survenus sur le réseau de distribution nous pouvons résumer les pannes comme suit :

- Coupure d'électricité provenant du distributeur public qu'est la SBEE ;
- Fréquents déclenchements des disjoncteurs de commande ;
- Baisse de tensions ;
- Les lampes se grillent très fréquemment ;
- Les moteurs de groupe de climatisation qui se grille régulièrement ;
- Fréquents départs de feu sur les circuits électriques ;

- Facture de consommation électrique élevée.

Le réseau électrique qui alimente les installations électriques est un réseau qui a évolué au fil du temps. Il n'existe aucun schéma électrique de ce réseau ; nous allons d'abord établir ce schéma à partir de relevés sur le terrain.

### V.3-Présentation du réseau de distribution électrique.

Le réseau est alimenté par trois sources :

- deux sources principales qui sont des abonnements BT au près de la SBEE ; c'est un abonnement triphasé BT de 800A, 220/400V avec un régime du neutre TT
- Un groupe électrogène de secours de 400KVA.

L'une des sources principale est secourue par le groupe électrogène. La gestion des deux sources est faite par un inverseur de source automatique.

#### a. Evaluation des charges du réseau :

Les charges alimentées sont résumées dans le tableau ci-après :

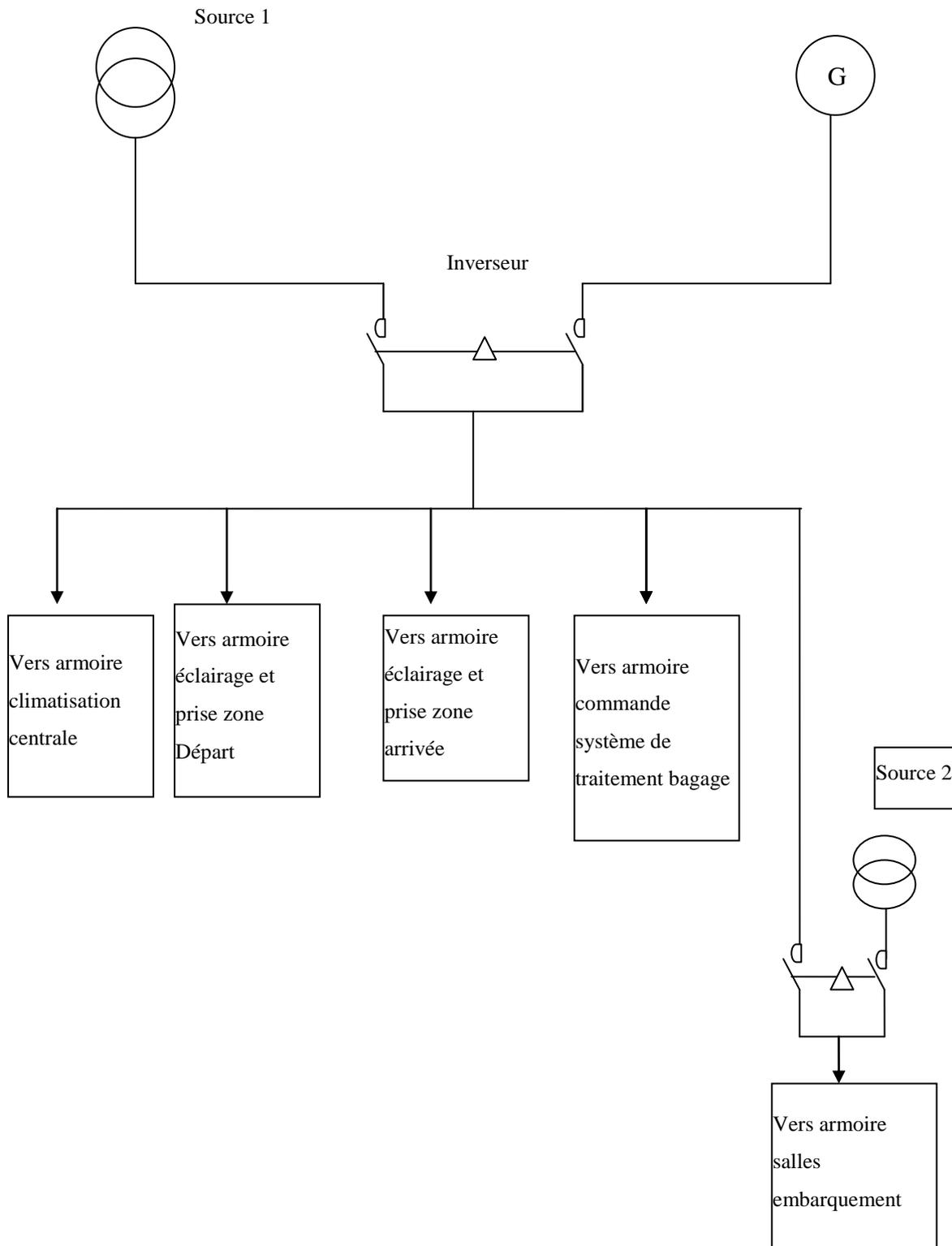
Nature des charges	Zone d'implantation	Puissance (w)	Facteur cosinus	Nombre	Puissance apparente KVA
Eclairage	Hall arrivée et retrait bagages	18	0.9	252	5.04
Eclairage	Hall enregistrement	18	0.9	41	1.46
		36		20	
Eclairage	Salles d'embarquement	18	0.9	29	2.98
		36		60	
Eclairage	Parking payant	250	0.9	36	10
Enseignes lumineux	Intérieur et extérieur de l'aérogare	1500	0.9	06	10
Eclairage de bureaux		18	0.9	400	0.8
Projecteur et feu de balise	Air de stationnement aéronefs		0.9		80
Centrale de climatisation	Dans l'aérogare	2500	0.8	8	25
Chaine de traitement bagage	Hall enregistrement et arrivée	45	0.77	01	58.45
Armoire de climatisation	Aérogare	4800	0.77	27	168.4
Matériels informatiques.		500	0.5	150	150
<b>TOTAL</b>					<b>512.13</b>

**La charge totale peut être donc évaluée 513 KVA**

**b. Schéma du réseau électrique de l'aérogare.**

Un schéma de réseau étant inexistant nous l'avons ressorti d'après nos relevés sur site.

Le schéma peut être représenté comme suit :



**Figure (V-1) Réseau de distribution de l'aérogare de Cotonou.**

#### V.4- Analyse du réseau de distribution électrique.

D'après le schéma de la figure (VII-1) on peut noter les points faibles suivants pour le réseau :

- Plusieurs compteurs qui alimentent le même réseau. Hors ces compteurs sont desservis par la même ligne de la distribution électrique publique. Par ailleurs la puissance apparente disponible sur un compteur est de 554,25 KVA ( $P = UI\sqrt{3}$  AN : U = 400V ; I = 800A). Cette puissance couvre les besoins qui s'élèvent à 513 KVA ;
- Avec cette configuration, une coupure sur le réseau public entraîne l'arrêt des équipements. En effet, dès qu'il y a coupure sur le réseau, le groupe démarre automatiquement et débite 30 s après. La coupure est donc ressentie au niveau des équipements ;
- A des points donnés du réseau électrique, nous avons constaté que l'alimentation des climatiseurs est prise sur le circuit lumière. Ceci explique les baisses de tension à la base de la faible luminosité des lampes du circuit concerné.

#### V.5- Analyse de la consommation électrique.

Pour pouvoir apprécier la consommation énergétique, nous avons analysé les factures d'électricités sur une période de quatre ans (2009 à 2012) dont voici un récapitulatif dans le tableau suivant :

MOIS	Consommation d'énergie active (KWh)	Consommation d'énergie réactive (KVARh)	Facteur cosinus	Pénalité en FCFA
<b>ANNEE 2009</b>				
Janvier	48753	31858	0.83	312330
Février	88401	53250	0.85	404523
Mars	79501	47772	0.85	363796
Avril	70490	42994	0.85	322540
Mai	80917	50493	0.84	444328
Juin	74167	47828	0.84	407262
juillet				
Aout	76132	51362	0.82	639750
Septembre	71398	46173	0.83	524969
Octobre	53709	33809	0,84	338493
Novembre	71899	43574	0,85	377609
Décembre				
<b>ANNEE 2010</b>				
Janvier	11 0918	71 576	0.84	699045
Février	75 997	47210	0.84	478958
Mars	81 065	50358	0.84	510900
Avril	91 728	55152	0.85	529453
Mai	56 222	33735	0.85	324509
Juin	69 122	44911	0.83	
Juillet	53 331	35919	0.82	492520
Aout	65 698	43236	0.83	
Septembre	68 412	45871	0.83	552820
Octobre				
Novembre	58 492	43236	0.85	
Décembre	58 909	45871	0.88	136008
<b>ANNEE 2011</b>				
Janvier	66519	40054	0.85	383943

Février				
Mars	86 874	50937	0.86	401145
Avril	99 581	279169	0.33	6552494
Mai	71860	47341	0.83	580683
Juin	84800	49741	0.86	391572
Juillet	78045	46323	0.85	450471
Aout				
Septembre	86960	48789	0.87	301159
Octobre	87468	49464	0.87	302937
Novembre	87515	48957	0.87	303080
Décembre	89780	47549	0.88	207284
ANNEE2012				
Janvier	114717	59423	0,88	264857
Février	95827	50735	0,88	221245
Mars	94341	46993	0,89	108907
Avril				
Mai				
Juin	96800	52270	0,87	355238
Juillet	65157	38544	0,86	300868
Aout	67750	39839	0,86	
Septembre	76611	43105	0,87	265318
Octobre	77805	42905	0,87	269454
Novembre				
Décembre				

D'après ces relevées des factures d'électricité, on note une mauvaise consommation de l'énergie électrique.

En effet, le facteur de puissance de l'installation varie entre 0,82 et 0,89 ; la moyenne étant de 0,86 ; cela entraine des pénalités mensuelles allant de 108907 à 6552494 FCFA.

Le facteur cosinus du mois d'avril 2011 est de 0,33 ; le gap par rapport à la moyenne est de 0,53. En cherchant la cause de cette valeur anormale, nous avons remarqué des valeurs non concordantes au niveau des index réactifs des mois d'avril et de mai. Sachant que le nouvel index d'un mois donné devient l'ancien index du mois suivant, le nouvel index du mois d'avril serait bien 80694 au lieu de 308694 qui ne se trouve pas sur la facture du mois de mai. Avec cette nouvelle valeur, la consommation d'énergie réactive serait de 51169 KVARH ce qui ramènerait le facteur de puissance à environ 0,82 et induirait par comparaison aux autres valeurs du tableau, une pénalité d'environ 600000FCFA. Nous avons en conséquence introduit auprès de la SBEE un courrier pour réclamer une correction de la facture du mois d'avril.

En dehors de cette erreur de facturation, le facteur de puissance est globalement mauvais et nécessite une correction. Sachant que les moteurs sont généralement à la base des mauvais facteurs de puissance, l'éclairage étant compensé au niveau de la commande, nous avons procédé à la mesure du facteur de puissance sur l'armoire de distribution basse tension de la chaîne de traitement des bagages. Les résultats sont donnés sur la figure (VI-2). On remarque que le facteur de puissance est très faible : 0,241 sur la phase 1 ; 0,297 sur la phase 2 ; 0,453 sur la phase 3.

La mesure de la distorsion harmonique figure (VI-3) donne les taux suivant :

- 2,53 % sur la phase 1 ;
- 2,38 % sur la phase 2 ;
- 2,27 % sur la phase 3 ;

Ces taux sont inférieurs à la tolérance de 5% admise.

Sur la même figure on a la mesure des déséquilibres de tension qui donne une moyenne de 1,9 ; inférieure à la valeur de 4% admise.

La vérification des autres paramètres de la tension tels que les fluctuations, les surtensions sont donnés dans le document annexe.

Dans la pratique lorsque nous avons essayé d'établir le schéma électrique du réseau et nous nous sommes rendus compte que sur un départ, plusieurs équipements sont alimentés à la fois. Ce qui crée une surcharge des câbles électriques.



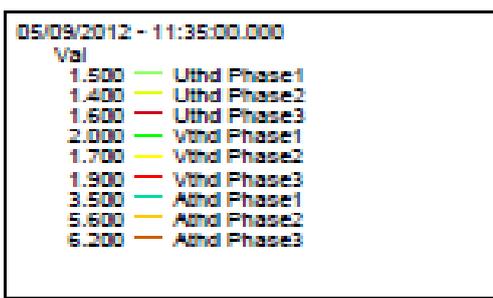
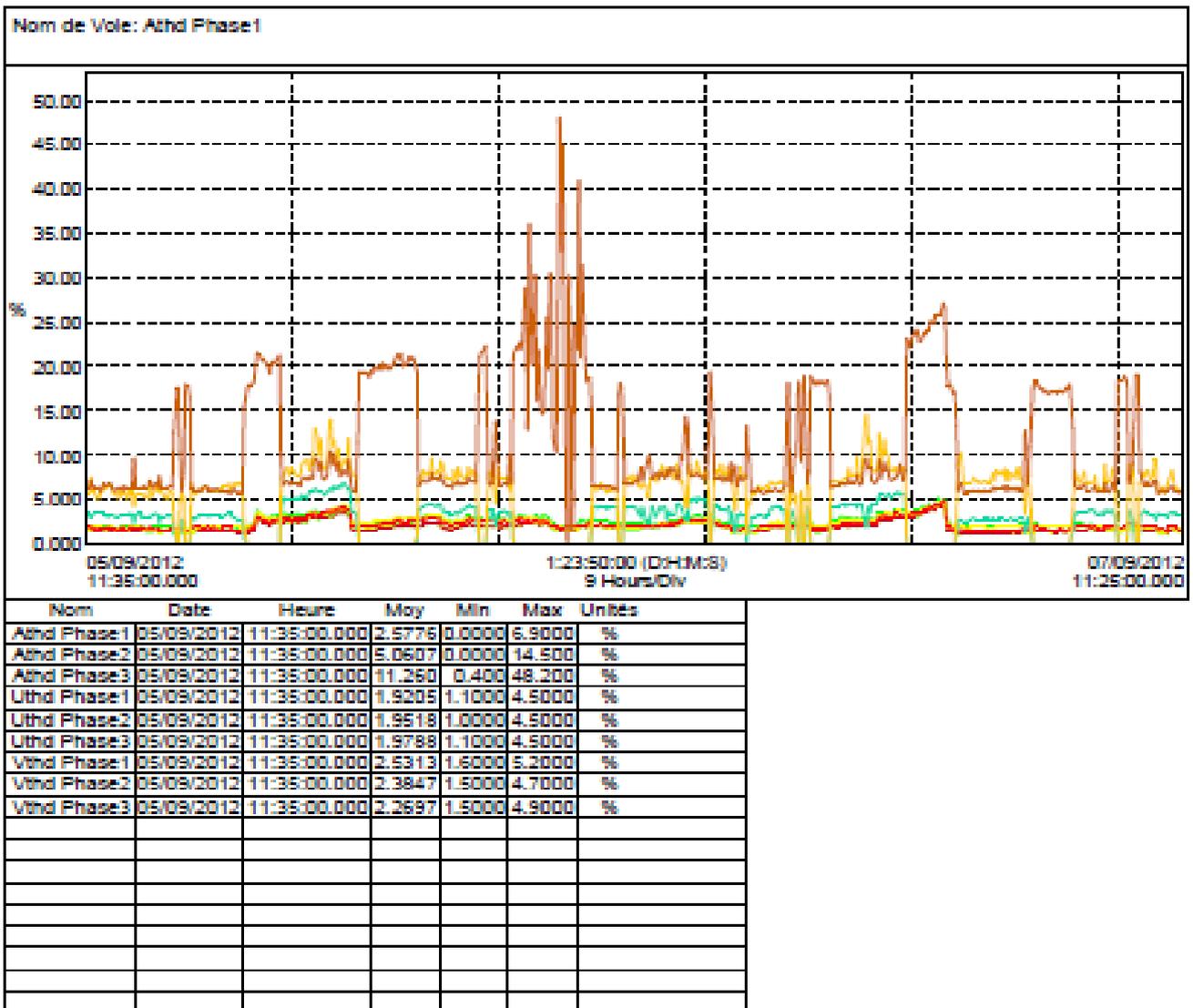


Figure (V-3) : analyse des distorsions harmoniques du réseau.

## V.6- Amélioration du réseau électrique.

Pour une haute disponibilité de l'énergie de qualité, nous proposons le schéma d'alimentation suivant :

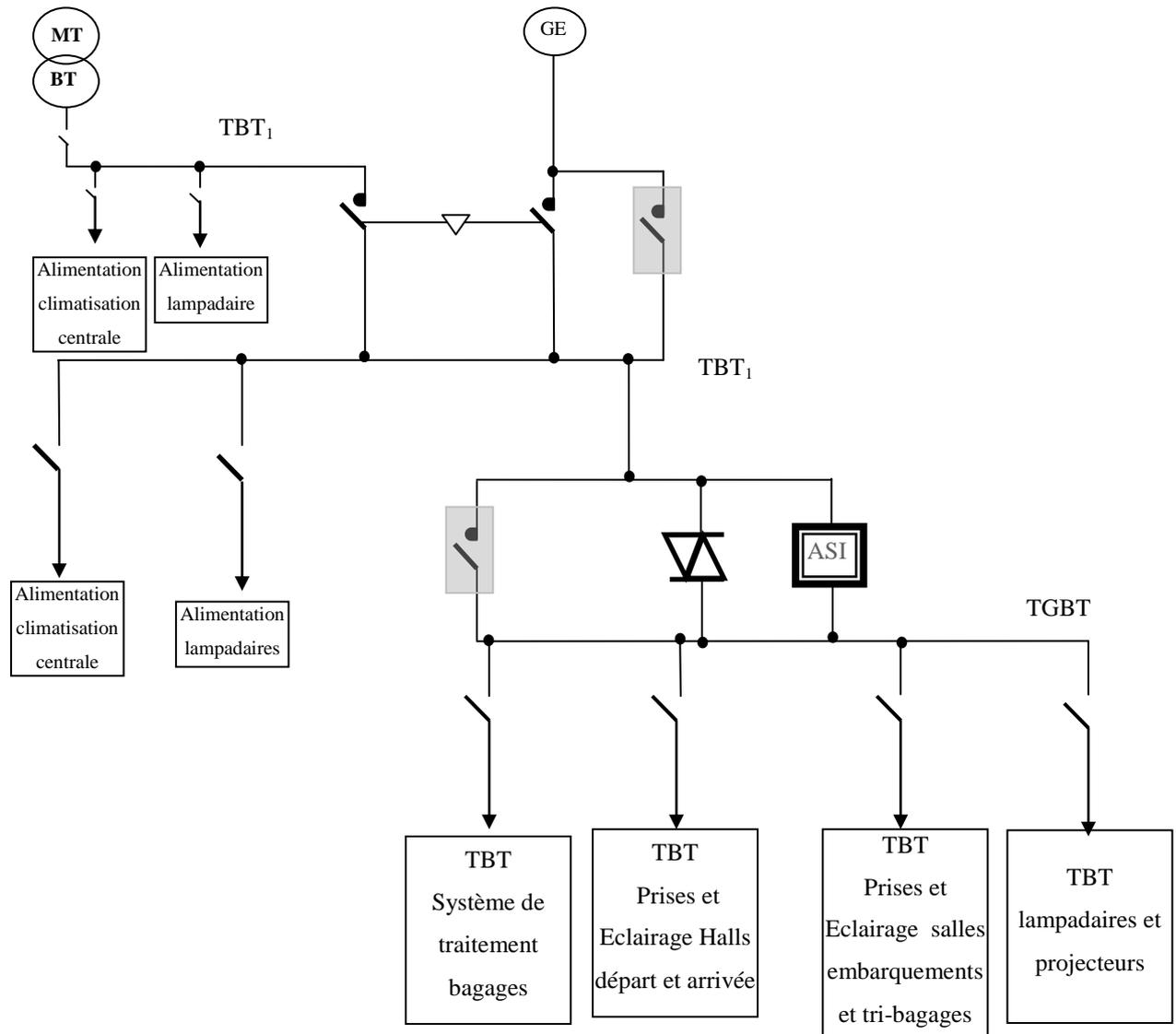


Figure (V-4) : réseau d'alimentation de haute disponibilité.

Le schéma comprend :

- Un abonnement BT de 600 KVA ;
- Un groupe électrogène de 400KVA ;
- Un onduleur de 300KVA ;
- Un inverseur de source ;
- Des tableaux de distribution.

### V.6-1 Abonnement électrique BT :

L'abonnement est fait par un poste de livraison MT/BT de 600KVA ; Le disjoncteur de livraison se trouve dans un tableau de distribution qui comporte également deux départs :

- Un départ pour alimenter une partie des centrales de climatisation ;
- Un second départ pour alimenter une partie des lampadaires.

### V.6-2 Un groupe électrogène de 400KVA

Le groupe est couplé au secteur par un inverseur de source (secteur/groupe) commandé par un relais de contrôle de présence de tension sur le normal et sur le secours. Un by-pass manuel permet d'assurer la continuité de la fourniture de l'énergie en cas de panne de l'inverseur. La sortie de l'inverseur alimente une armoire de distribution qui comporte deux départs vers les lampadaires et les centrales de climatisation.

### V.6-3 l'onduleur.

#### Dimensionnement de la puissance :

Pour dimensionner la puissance de l'onduleur, nous avons tenu compte des charges jugées prioritaires, soient :

- Le matériel informatique 150 KVA
- La chaîne de traitement de bagages 59 KVA ;
- Une partie de l'éclairage évaluée à 70 KVA

Soit un total 279KVA, d'où la puissance normalisée supérieure immédiate de **300KVA**.

Suite à un appel d'offre, c'est un onduleur de marque EATON qui a été retenu. Il présente les caractéristiques ci-après :

C'est un onduleur appelé Powerware 9395 dont une vue de face est présentée ci-contre :

C'est un onduleur de dernière génération :

- Très haute performance
- Fiabilité accrue
- Entretien facile
- Technologie Double Conversion
- Isolation totale des sorties vis à vis des entrées
- La meilleure protection électrique des charges critiques



Figure (V-5) Vue de face de l'onduleur installé

Son schéma synoptique se présente comme suit :

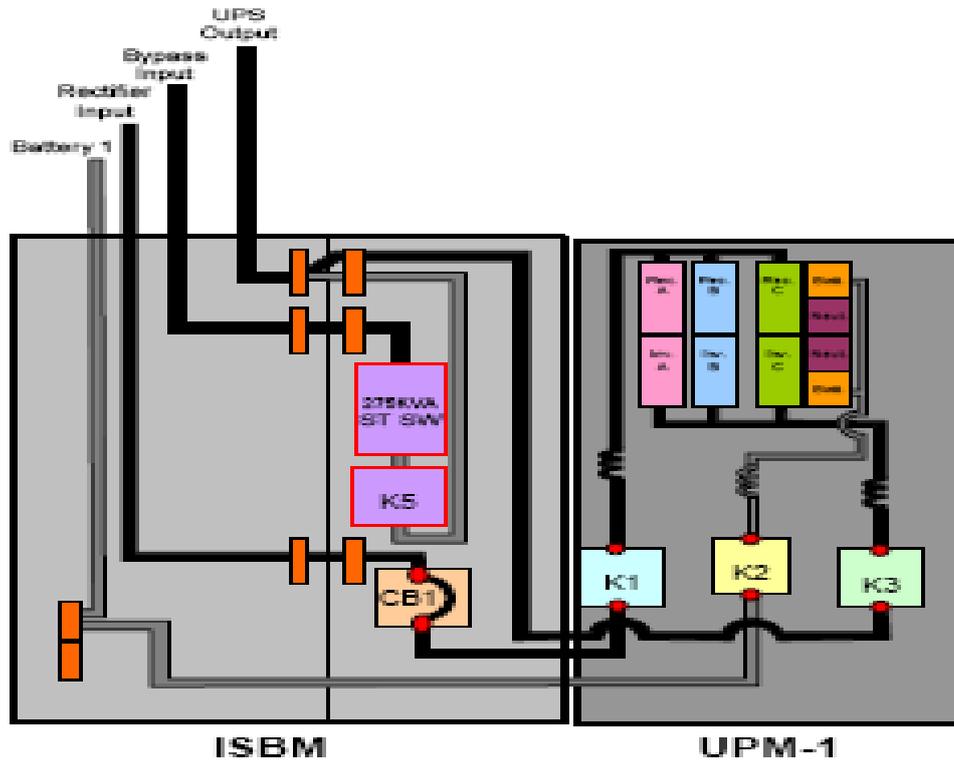


Figure (V-5) Synoptique de l'onduleur installé

Différent mode de fonctionnement :

### UPS mode Normal

Mode de fonctionnement où le redresseur alimente la charge et recharge la batterie.

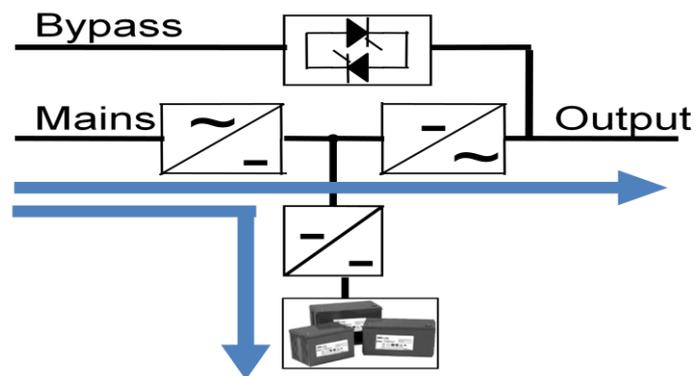


Figure (V-6) mode de fonctionnement normal

### UPS en Mode batteries

Mode de fonctionnement où l'énergie est tirée de la batterie et la charge alimentée par le chargeur.

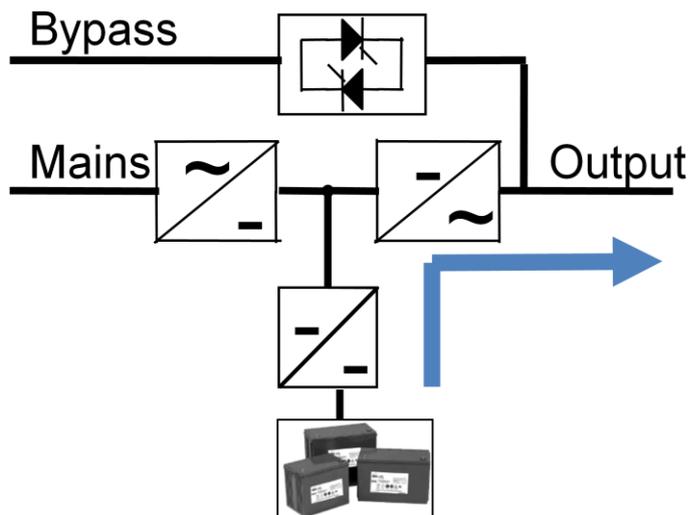


Figure (V-7) mode de fonctionnement sur batteries

### Mode by-pass automatique

Mode de fonctionnement où la charge est alimentée par la dérivation sous condition de surcharge soudaine.

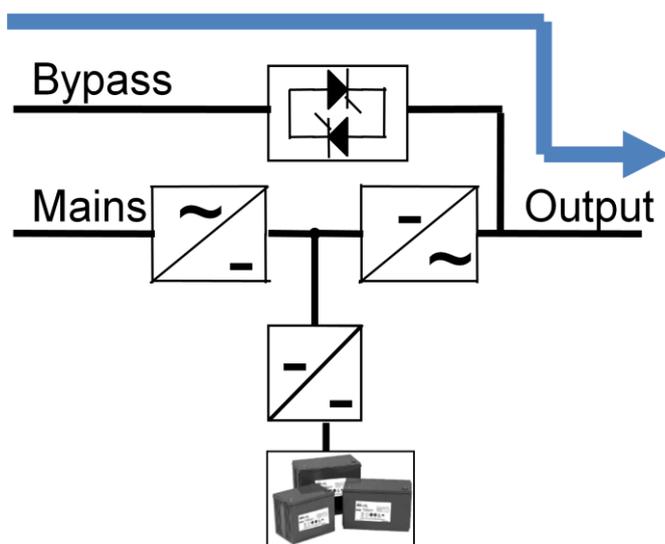


Figure (V-8) mode de fonctionnement en by-pass automatique

### Mode bypass de maintenance

L'interrupteur mécanique et le mode opératoire utilisé par l'agent de service autorisé au service onduleur tout en alimentant le chargement par la dérivation d'entretien.

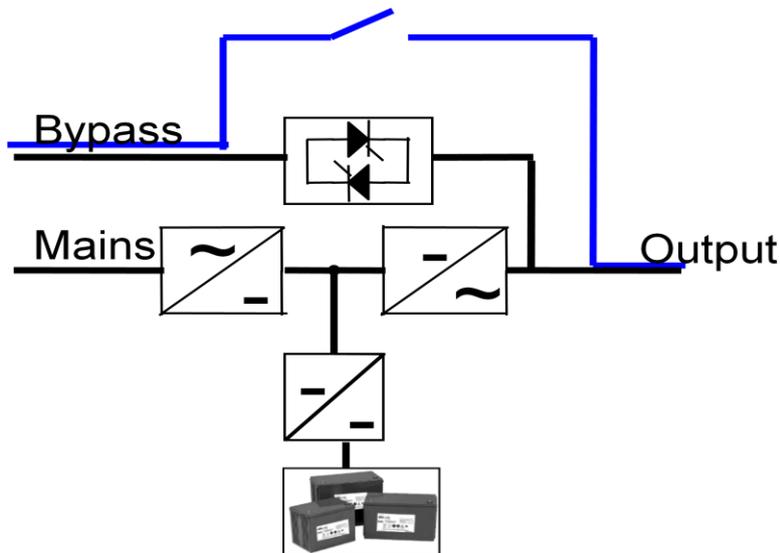


Figure (V-9) mode de fonctionnement en by-pass de maintenance

D'une autonomie de 20mn, il permet l'alimentation des applications prioritaires pendant la séquence de reprise de l'alimentation par le secours longue durée assuré par le groupe électrogène. L'onduleur comporte un by-pass manuel et un by-pass automatique qui permettent la fourniture de l'énergie en cas de problème de l'onduleur.

L'onduleur est fourni par EATON et nous avons eu l'occasion de faire sa recette en usine en Finlande. Le procès verbal de recette est dans l'annexe n°2. Le taux de distorsion en courant et en tension est respectivement de 2,8 et 0,8 à 100% de charge. Les autres paramètres ont été aussi testés et répondent bien au critère de qualité de l'énergie électrique.

### V.7 Dimensionnement de la section du câble alimentant le réseau non secouru.

Nous avons placé dix centrales de climatisation d'une puissance apparente totale de 63 KVA et dix lampadaires d'une puissance totale de 2,8 KVA sur le réseau non secouru, soit une puissance apparente totale de 65,8 KVA.

L'alimentation étant triphasé, le courant nominal dans chaque phase se calcul par :

$$S = UI\sqrt{3} \rightarrow I = \frac{S}{U\sqrt{3}}$$

$$AN : I = \frac{65,8}{400\sqrt{3}} = 95A$$

**Pour une longueur totale évaluée à 5m et une chute de tension admissible de 2%, nous relevons sur les abaques de dimensionnement un câble en cuivre de section 35mm<sup>2</sup>.**

### V.8 Autres travaux d'assainissement du réseau électriques.

Nous avons constaté que plusieurs climatiseurs sont alimentés à partir du même disjoncteur

différentiel de 30mA. Dans nos travaux d'assainissement, nous avons repris le réseau en mettant en tête de chaque climatiseur un disjoncteur différentiel calibre 25A sensibilité 30mA et un disjoncteur magnétothermique de 20A.

Nous avons également réduit la charge des circuits lumière en augmentant le nombre de départ alimentation lumière avec des câbles de section 1,5mm<sup>2</sup> protégé par des disjoncteurs magnétothermiques courbe D de 16A.

## **CONCLUSION.**

Aux termes de cette étude, nous pouvons conclure que la qualité de l'énergie électrique de dépend pas uniquement du distributeur publique. Les perturbations peuvent prendre naissance dans l'installation de l'utilisateur voisin comme dans celle de l'utilisateur perturbé.

Les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. A chaque type de perturbation, correspond une solution appropriée ; l'alimentation sans interruption (ASI) est efficace contre toutes les perturbations sauf les coupures longues, aussi l'associe-t-on avec les groupes autonomes. Cependant le choix de l'ASI doit se faire en fonction des objectifs fixés en termes de qualité d'énergie. En effet la qualité de l'énergie n'est pas la même suivant les technologies utilisés dans l'onduleur des ASI. Selon les techniques de commande des commutateurs de mutateur, la tension ondulée peut comporter des harmoniques nuisibles au bon fonctionnement des équipements. Notre voyage sur la Finlande en Helsinki a été une riche expérience car nous visité les ateliers d'assemblage des onduleurs. Nous avons aussi eu l'occasion d'effectuer des tests sur les onduleurs en grandeur nature.

La qualité de l'énergie dépend aussi de la structure du réseau, une bonne architecture du réseau permet de circonscrire les éventuels défauts aux seuls circuits en cause.

La nature du régime du neutre conditionne la disponibilité de l'énergie électrique.

Dans le présent mémoire nous n'avons pas pu mettre en œuvre le régime du neutre IT compte tenu de l'ampleur du travail. Nous le recommandons néanmoins car comme nous l'avons étudié cela augmentera sensiblement la disponibilité de l'énergie électrique.

## Bibliographie

CAHIER TECHNIQUE Schneider Electrique N° 199 et 200.

NATHAN, Machines électriques électronique édition 1986

Stefan Laurentiu CAPITANEANU Ingénieur de l'ENSEEIH de TOULOUSE, option Génie Electrique THÈSE présentée pour obtenir le titre de DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE Spécialité : Génie Electrique N° d'ordre 1925 année 2002.

Cours d'électronique de puissance 2IE promotion 2011-2012

## ANNEXES

1. **Analyse du réseau de l'aérogare de cotonou.**
2. **Test de l'onduleur en usine**