

N° d'ordre :  
N° de série :

56  
M/418/01  
198/02  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

550  
M/417/03  
CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

2835  
M/R/11/03  
Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electriques

Presenté par : LAIB Madjeda

Thème

Amélioration de la qualité d'énergie  
électrique dans le site industriel

Soutenu le 29 Juin 2011

Devant le jury composé de :

Mr. LABDANI Rafik  
Mr. ZELLOUMA Laid  
Mr. DJEGHADER Yacine

MC  
MC  
MC

Président  
Examinateur  
Rapporteur

2010-2011

718  
M/R/11/03  
جامعة الشهيد حمزة لخضر - الوادي  
مكتبة كلية العلوم والتكنولوجيا  
رقم الجرد .....  
رقم التصنيف .....  
تاريخ الدخول .....

## Résumé

L'objectif de ce travail est consiste à améliorer la qualité de l'énergie électrique, dans les sites industriels, c'est-à-dire atténuer les différent phénomènes perturbatrices (les harmoniques, le flicker , les déséquilibres, creux de tension ....).

Dans l'aciérie électrique le four à arc est un outil de fusion destiné à fondre un métal primaire qui est, en général, de la ferraille. Et considéré comme un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité, la non linéarité et la dissymétrie de l'arc électrique.

Pour minimiser les harmoniques générées par les fours à arc, la compensation et le filtrage passif des harmoniques sont utilisée. Dans notre étude on a amené à utilise des filtres résonnant sur les rangs des harmoniques caractéristiques (11, 13), avec un filtrage amorti raccordé sur les rangs supérieurs en plus d'une batterie de condensateur.

## الخلاصة :

الهدف من هذا العمل هو تحسين نوعية الطاقة الكهربائية في المواقع الصناعية، أي التخفيف من الظواهر التشويشية المختلفة (التوافقيات، الاضطراب، عدم الاتزان، هبوط الجهد....).

في مصانع الصلب، فرن القوس الكهربائي هو أداة للذوبان مخصص لصهر المعادن الأولية، بشكل عام، الخردة. وتعتبر كجهاز كهربائي جد مشوش بسبب عدم الاستقرار، والخطية والتماثل للقوس الكهربائي .

اتقليل التوافقيات التي تم إنشاؤها بواسطة أفران القوس، نستخدم التعديل والترشيح الغير فعال للتوافقيات. في دراستنا اخترنا استخدام المرشحات الرنانة على صفوف التوافقيات الخاصة (11، 13)، مع ترشيح مثبت متصل بالرتب العليا، بالإضافة إلى مكثفة.

Liste des abréviations

MATLAB :	Logiciel distingue principalement au calcul scientifique à la modulation et à la Simulation.
FAE :	Four à Arc Electrique
AC :	Alternative Courant
DC :	Direct Courant
EAF :	Electric Arc Furnace
THD :	Le taux de distorsion harmonique
QEE :	La Qualité d'Energie Electrique
HT :	L'Haute Tension
MT :	Le Moyen Tension
VTHD :	Le taux de distorsion harmonique de la tension
ITHD :	Le taux de distorsion harmonique de la tension
$I$ :	La valeur de courant
$h$ :	Le rang d'harmonique
BT :	La Base Tension
$V$ :	La valeur de tension
$f$ :	La fréquence
$U$ :	Tension continue a la secondaire de redresseur
$q$ :	Le nombre de phase
thq :	Thyristors nombre q
$U_{\text{moy}}$ :	La valeur moyenne de la tension redressé
$U_{\text{eff}}$ :	La valeur efficace de la tension
$U_{\text{max}}$ :	La valeur maximum de la tension
$i_s$ :	La valeur du courant de source
$I_d$ :	La valeur du courant redressé
$I_{\text{eff}}$ :	La valeur du courant efficace
PD3 :	Montage parallèle double triphasé
S3 :	Montage série triphasé

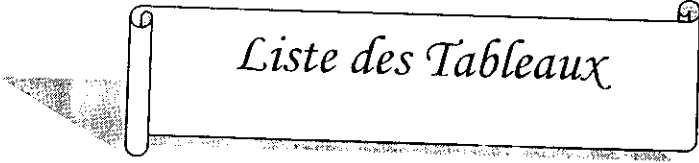
$i_{ch}$	La valeur du courant de charge
$\alpha$ :	Fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors
$P$ :	La puissance active
$Q$ :	La puissance réactive
$U_d$ :	La valeur de la tension redressée
HVDC :	Heat voltage direct courant
$R_{arc}$ :	La résistance d'arc
$A_R$ :	La réactance d'arc
$\alpha, X_{arc}, A_X, B_X$ :	Constantes expérimentaux qui dépendent de la tension secondaire et la distance entre les électrodes
$Z_f$ :	L'impédance du filtrage
$R_f$ :	La résistance du filtrage
$L_f$ :	L'inductance du filtrage
$\omega$ :	La pulsation de tension en (rad/s).
$C_f$ :	La capacité du filtrage
$\omega_r$ :	La pulsation de la résonance
$F_r$ :	La fréquence de résonance
$X_r$ :	La réactance inductive ou capacitive de résonance
$Q$ :	Le facteur de qualité
$q_c$ :	La puissance réactive d'un condensateur en (VAR).
$Q_\Delta$ :	La puissance réactive du montage ( $\Delta$ ) en (VAR).
$C$ :	La capacité d'un condensateur en (farad).
$Q_Y$ :	La puissance réactive du montage étoile en (VAR).
FRh:	Filtrage résonant du rang h
FAh:	Filtrage amorti du rang h

# Liste des Figures

Figure I-1	Exemple de fluctuation de la fréquence	8
Figure I-2	Les creux de tension	8
Figure I-3	Variations rapides de tension	9
Figure I-4	Décomposition d'un signal périodique 50 Hz	11
Figure I-5	Les surtensions transitoires	14
Figure I-6	Oscillation transitoire amortie due à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs	14
Figure I-7	Déséquilibre de tension	15
Figure II-1	Les quatre types de convertisseur statique.	19
Figure II-2	Différents types de redresseurs.	21
Figure II-3	Schémas d'un redresseur Dodécaphasé	24
Figure II-4	Courant d'entrée de pont du redresseur S3	25
Figure II-5	Redresseur PD3 commandé	26
Figure II-6	Courant d'entrée de pont du redresseur	27
Figure II-7	Courant d'entrée de pont du redresseur PI2	28
Figure III-1	Déformabilité de l'acier en fonction de la température	33
Figure III-2	Vue extérieure d'un four à courant alternatif	35
Figure III-3	Caractéristique V-I de l'alimentation d'un four à arc à courant continu	39
Figure III-4	Diagramme énergétique pour un four à arc à courant continu.	40
Figure III-5	Aciérie électrique (DC EAF)	41
Figure III-6	Schéma monophasé du modèle de DC EAF	42
Figure III-7	Forme du courant de PD3	42
Figure III-8	Forme du courant de S3	43
Figure III-9	Forme du courant de P12	43
Figure III-10	Schémas triphasés du four à arc	44
Figure III-11	Forme du courant du DC EAF	45
Figure III-12	Spectre de courants harmoniques d'un four à arc à courant continu alimenté par un pont redresseur dodécaphasé.	47
Figure IV-1	Structure en schéma bloc de DC EAF	55

Figure IV-2	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec filtre.	52
Figure IV-3	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec batterie.	50
Figure IV-4	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après la compensation.	50
Figure IV-5	Forme du courant du DC EAF après la compensation.	50
Figure IV-6	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh13.	57
Figure IV-7	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 13.	57
Figure IV-8	Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 13.	58
Figure IV-9	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11.	58
Figure IV-10	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11.	59
Figure IV-11	Structure en schéma bloc de DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11.	59
Figure IV-12	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11 et 13.	60
Figure IV-13	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13.	60
Figure IV-14	Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13.	60
Figure IV-15	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FAh11	61
Figure IV-16	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage amorti de l'harmonique 11.	61
Figure IV-17	Forme du courant du DC EAF après le filtrage amorti de l'harmonique 11.	62
Figure IV-18	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11 et 13 et FAh14.	62
Figure IV-19	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14.	63
Figure IV-20	Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14.	63

Figure IV-21	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh5 et 7 et FAh11.	64
Figure IV-22	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11.	64
Figure IV-23	Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11.	64
Figure IV-24	Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11 et 13 avec batterie et FAh14.	65
Figure IV-25	Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti.	65
Figure IV-26	Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti.	66



*Liste des Tableaux*

Tableau I-1	Les principaux effets des harmoniques	12
Tableau I-2	Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives	16
Tableau III-1	Valeurs des harmoniques de courant.	46
Tableau IV-1	Valeurs des harmoniques de courant après la compensation.	57
Tableau IV-2	Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant après le filtrage résonant de l'harmonique 13.	58
Tableau IV-3	Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 11.	59
Tableau IV-4	Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13.	61
Tableau IV-5	Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage amorti de l'harmonique 11.	62
Tableau IV-6	Valeurs des harmoniques de courant d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14.	63
Tableau IV-7	Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11.	65
Tableau IV-8	Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti.	66



## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I : Généralité sur la qualité d'énergie électrique</b>	
I-1- Introduction	3
I-2- La qualité de l'énergie électrique	3
I-2-1- Contexte	3
I-2-2- Notions de Power Quality	4
I-2-3- Problématique et domaine d'étude	5
I-2-4- Dégradation de la QEE (Perturbations électriques)	6
I-2-4-1- Généralités	6
I-2-4-2- Fréquence-Déviations	7
I-2-4-3- Amplitude	8
I-2-4-3-1- Creux de tension et coupures brèves	8
I-2-4-3-2- Fluctuations de tension –Flicker	9
I-2-4-4- Forme d'onde	10
I-2-4-4-1- Harmoniques et inter-harmoniques	10
I-2-4-4-2- Les surtensions transitoires	13
I-2-4-5- Symétrie-Déséquilibre	14
I-2-5- La solution pour chaque perturbation et l'origine et la conséquence	15
I-3- Conclusion	17
<b>Chapitre II : Etude les charges polluantes</b>	
II-1- Introduction	18
II-2- Les convertisseurs statiques	18
II-2-1- Quelques applications des convertisseurs statiques	19
II-2-2- Les avantages	20
II-3- Etude d'une charge polluante	20
II-3-1- Classement des redresseurs	20
II-3-2- Redresseur triphasé à thyristor	21
II-3-3- Etude analytique en générale « pour q phase »	22
II-3-4- Redresseur Dodécaphasé	24
II-3-4-1- Etude du S3	25
II-3-4-2- Etude du PD3	26
II-3-4-3- Pour le P12 on fait la somme de deux courants	27
II-4- Conclusion	29



<b>Chapitre IV : Réduction des perturbations harmoniques</b>	
IV-1- Introduction	47
IV-2- Pourquoi c'est nécessaire de filtrer les harmoniques ?	47
IV-3- Principe de compensation	47
IV-4- Solutions de dépollution des réseaux électriques	48
IV-4-1- Solutions de dépollution traditionnelles	48
IV-4-1-1- Filtrage passif	48
IV-4-1-1-a- Filtrage passif résonnant	49
IV-4-1-1-b- Filtrage passif amorti (passe Haut)	50
IV-4-1-2- Compensation de puissance réactive	52
IV-4-1-2-a- Les batteries de condensateurs	52
IV-4-1-2-b- La puissance réactive d'une batterie de condensateurs	52
IV-4-1-3- Inconvénients du filtrage passif	53
IV-4-2- Solutions de dépollution modernes	54
IV-5- Simulation du filtre passif parallèle	54
IV-6- Bloc de simulation	54
IV-7- Résultats de simulation	55
IV-7-1- Compensation	56
IV-7-2- Filtrage résonant de l'harmonique 13	57
IV-7-3- Filtrage résonant de l'harmonique 11	58
IV-7-4- Filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13	60
IV-7-5- Filtrage amorti de l'harmonique 11	61
IV-7-6- Filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14	62
IV-7-7- Filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11	64
IV-7-8- Filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti	65
IV-8- Analyses et commentaires	66
IV-9- Conclusion	67
<b>Conclusion générale</b>	68
<b>Références bibliographique</b>	69

## Introduction Générale

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques tels que : fours à arc, convertisseurs statiques de puissance, ou encore certains types d'éclairage.... etc.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la *qualité du courant et de la tension* des réseaux électriques. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de *courants harmoniques*.

Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance.

La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. De plus, des incidents du type -coups de foudre- ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. On nommera ce type d'incident : *creux de tension*. Ces perturbations ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.[1]

Les fours à arc électrique (FAE) représentent des récepteurs électriques spécifiques avec une charge continue cyclique, caractérisée par la succession des fusions, avec l'arrêt pour changer le métal liquide, pour enfourner et le chargement. Pendant le fonctionnement, le FAE provoque des chocs aléatoires de puissance réactive.

en déterminant l'apparition sur les jeux de barres du centre d'alimentation des perturbations, qui affectent le fonctionnement normal des autres consommateurs, raccordés au même point avec le four.[2]

Dans ce mémoire, on présente une étude détaillée du concept de filtrage passif, et des démonstrations ses contributions dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique influencée par le raccord avec des charges non-linéaires. Pour ce faire, on a réparti le manuscrit en quatre chapitres:

- ♣ Le 1<sup>ère</sup> chapitre contiendra la définition de la qualité d'énergie électrique, et les différents type de perturbation et leur conséquences néfastes sur les équipements électriques.
- ♣ Le 2<sup>ème</sup> chapitre consacrera à l'étude analytique en générale des convertisseurs statiques, et en suite le fonctionnement des convertisseurs AC-DC (les redresseurs).
- ♣ Le 3<sup>ème</sup> chapitre présentera le site industriel « Aciérie électrique » surtout le four à courant continu (DC EAF) et dans ce chapitre, on montre le mauvais impacte du four sur le réseau. Qui représente par l'apparaitre des harmoniques, et la déformation de la forme d'onde.
- ♣ Le 4<sup>ème</sup> chapitre présentera des applications de filtres passifs (résonant, amorti), accompagnées par des simulations numériques sous *Matlab-Simulink*,\*et d'études comparatives des différents cas traités.

Et nous finissons par une conclusion générale.

(\*) Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette application, surtout coté qualité d'énergie (amélioration de la forme d'onde, atténuation des harmoniques spécifiques et réduction du THD).

## **Chapitre I : Généralité sur la qualité d'énergie électrique**

### **I-1- Introduction**

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes [2].

Ce chapitre permet de comprendre c'est quoi la qualité d'énergie électrique, quelles en sont les causes les plus fréquentes et quels sont les effets induits. Il indique quelles sont les précautions à prendre.

### **I-2- La qualité de l'énergie électrique**

#### **I-2-1- Contexte**

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de 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/ou eux-mêmes générateurs de perturbations,
- L'ouverture du marché de l'électricité. [3]

### 1-2-2- Notions de Power Quality

Le courant électrique est peut-être la matière première la plus indispensable pour le commerce et l'industrie. Le courant électrique est un produit particulier, dans la mesure où il est requis en flux continu, où il n'est pas facile de le stocker en grande quantité et où il est impossible de le soumettre à des contrôles d'assurance qualité avant utilisation.

C'est en fait comme un produit qui doit être délivré en temps et en heure : il est acheminé à une ligne de production au moment et au lieu de l'utilisation, par un fournisseur de confiance, sans exigence d'inspection. Afin de satisfaire aux exigences imposées par ce principe de "juste à temps" il est nécessaire d'avoir un bon contrôle des spécifications de ce produit, une grande confiance dans la capacité du fournisseur à produire et à fournir ce produit à temps et selon ses spécifications. Enfin, il faut avoir une connaissance du comportement général du produit et de ses limites.

Pour l'électricité la situation est comparable : il faut connaître la fiabilité de l'alimentation et comprendre la souplesse du processus par rapport aux fluctuations ou en d'autre terme sa résilience. En réalité bien sûr, l'électricité est très différente de tous les autres produits. Elle est produite loin du point d'utilisation, le réseau est alimenté à partir de nombreux générateurs et l'électricité atteint le point d'utilisation via plusieurs transformateurs, à travers de nombreux kilomètres de câbles aériens et éventuellement souterrains. Lorsque l'industrie de production est privatisée, les ressources du réseau sont détenues, gérées et entretenues par un certain nombre d'organisations différentes.

Garantir la qualité du courant fourni à son point d'utilisation n'est donc pas une tâche aisée et il est très difficile de retirer de la chaîne d'approvisionnement de l'électricité non conforme ou d'imaginer qu'elle puisse être refusée par le client [3].

Du point de vue du consommateur, la question est encore plus **problématique**. Bien que limitées, il existe quelques statistiques sur la qualité du courant délivré, mais le niveau acceptable de qualité tel qu'il est perçu par le fournisseur peut être très différent de celui demandé, ou peut-être souhaité, par le consommateur. En matière d'électricité, les défauts les plus perceptibles sont les interruptions complètes (qui peuvent durer de quelques secondes à plusieurs heures) et les creux ou fléchissements de tension, pendant lesquels la tension chute à une valeur plus basse pendant une courte durée.

Les coupures de courant constituent bien évidemment un problème pour tous les utilisateurs, mais de nombreuses opérations sont très sensibles à des coupures même de très courtes durées. Voici quelques exemples d'opérations sensibles :

- Les processus continus où les coupures brèves peuvent désynchroniser les machines et entraîner l'apparition de gros volumes de produits à demi finis.

Exemple type : l'industrie de la fabrication du papier où l'opération de nettoyage est longue et chère.

- Les opérations successives et continues sur des lots, où une interruption lors d'un processus peut détruire la valeur des opérations précédentes. Exemple de ce type : l'industrie des composants électroniques où la production des plaques de semi-conducteurs requiert une douzaine d'étapes étalées sur plusieurs jours et où une défaillance lors d'une étape est catastrophique.

- Le traitement de données, où le montant des transactions est élevé mais où le coût du traitement informatique est faible, comme les opérations de change et de vente de titres.

L'interruption des transactions peut entraîner ici de fortes pertes excédant largement le coût de l'opération. Exemple récent : une réclamation à hauteur de 15 millions d'Euros de compensation demandée suite à une coupure de courant de 20 minutes. [4]

### I-2-3- Problématique et domaine d'étude [5]

Idéalement, l'alimentation des réseaux se fait par un système sinusoïdal triphasé et symétrique, constant en fréquence et en amplitude. Toute déviation est considérée comme une perturbation de la tension d'alimentation et fait partie de la problématique de la qualité d'énergie.

Selon l'IEEE (U.S.A.) : On appelle « **Power Quality Problem** » toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs (creux de tension, surs tension, transitoire, harmoniques, déséquilibre, ...).

A l'exception des creux de tension et interruptions, les perturbations sont la plupart du temps occasionnées par les utilisateurs de réseau, lorsqu'ils consomment ou produisent un courant qui n'est pas parfaitement symétrique, sinusoïdal et constant,



alors par interaction avec l'impédance du réseau la qualité de la tension au point de raccordement va être détérioré.

Les perturbations de la tension peuvent résulter de

- **Défauts** dans le réseau électrique ou dans les installations des clients (court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, ...); ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête), matérielles (vieillessement d'isolants, ...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers, ...).
- **Installations perturbatrices** : Fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes les applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils,...etc.

Les perturbations ne peuvent jamais être complètement éliminées, la plupart des installations sont en effet caractérisées par une consommation de courant qui n'est pas sinusoïdale, qui varie au cours du temps ou qui est déséquilibrée. Quand la pollution de la tension est vraiment trop grande, le fonctionnement des installations des utilisateurs de réseau électriquement voisins peut être détérioré.

**La problématique** de la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs en actions, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou consommateurs d'électricité), ou intervenants divers (fournisseurs d'électricité ou de services) et parmi ces secteurs on trouve les aciéries électriques.

## I-2-4- Dégradation de la QEE (Perturbations électriques)

### I-2-4-1- Généralités

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées :

- basse fréquence ( $< 9$  kHz),
- haute fréquence ( $\geq 9$  kHz),
- de décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) :

- creux de tension et coupures,
- harmoniques, inter-harmoniques,
- surtensions temporaires,
- surtensions,
- surtensions transitoires,
- fluctuations de tension,
- déséquilibres de tension,
- variations de la fréquence d'alimentation,
- tension continue dans les réseaux alternatifs,
- tensions de signalisation.

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations. [3]

Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent:

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde. qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- Le déséquilibre. la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.[4]

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme une perturbation. En pratique, on classe ces perturbations selon la durée du phénomène. On peut alors distinguer:

- Les altérations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes.
- Les creux de tension, surtension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes.
- Les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période.[7]

#### **I-2-4-2- Fréquence-Déviations**

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1%) au sein du réseau synchrone européen en régime normal de fonctionnement et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques.

La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir

des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours improprement conçu.

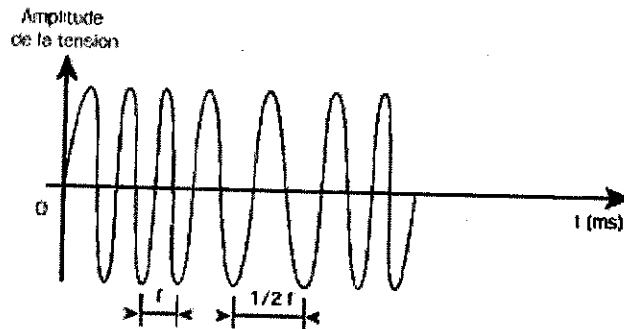


Figure I-1 Exemple de fluctuation de la fréquence

### I-2-4-3- Amplitude

#### I-2-4-3-1- Creux de tension et coupures brèves

Les creux de tension sont dus aux courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Seules les chutes de tension supérieures à 10% sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT). Les courts-circuits sont des événements aléatoires : ils peuvent résulter de phénomènes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), de défaillances d'appareils ou d'accidents.

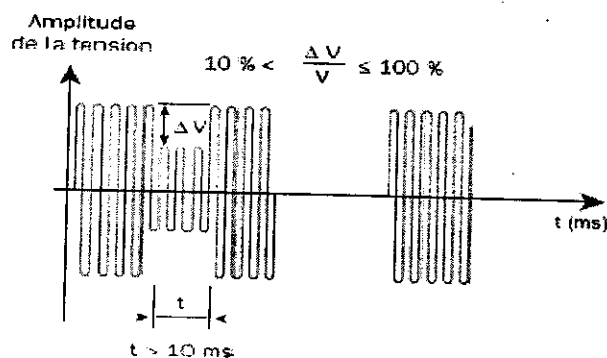


Figure I-2 les creux de tension

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

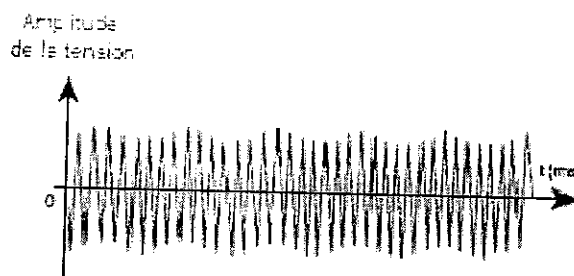
Notons que les coupures brèves peuvent être considérées comme des creux de tension de sévérité maximale.

De façon un peu arbitraire, liée à la durée des cycles de déclenchement-réenclenchement des liaisons en cas de défaut, on distingue :

- les coupures longues ( $> 3$  min) : problème de continuité (ou de fiabilité) de la tension,
- les coupures brèves ( $< 3$  min) : problème de qualité de la tension, rangé dans la même catégorie que les creux de tension.

#### I-2-4-3-2- Fluctuations de tension –Flicker

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.



*Figure I-3 variations rapides de tension*

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10%.

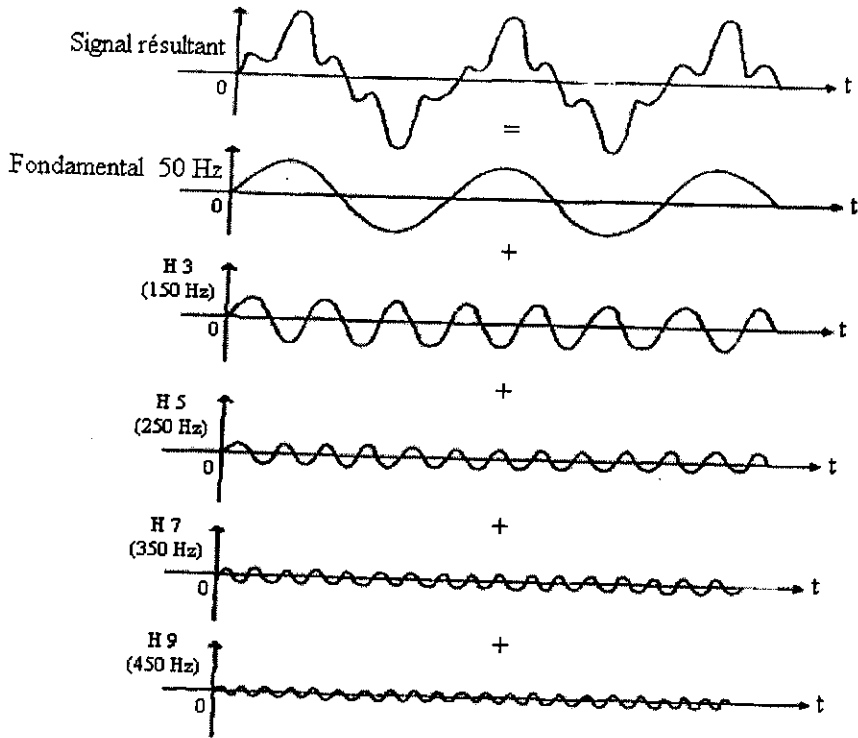
**Remarque :**

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites contractuelles. On parle souvent de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites. Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins 10 % de la tension nominale.

L'acuité du problème varie en fonction de la sensibilité des lampes utilisées par la clientèle. Or l'UE a programmé l'interdiction progressive des lampes à incandescence (les ampoules de 100 W dès le 1er septembre 2009, celles de 75W en 2010, interdiction totale en 2012). Au-delà de 2012, le flicker pourrait n'être plus un souci pour la qualité de l'électricité.

**I-2-4-4- Forme d'onde****I-2-4-4-1- Harmoniques et inter-harmoniques**

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fondamentale (50Hz), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, l'éclairage, les inductances saturées, etc. Leur amplitude peut être amplifiée par des phénomènes de résonance, en particulier lorsque des batteries de condensateurs ne sont pas installées avec les précautions nécessaires.



*Figure I-4 Décomposition d'un signal périodique 50 Hz*

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par ex. de condensateurs ou de machines tournantes, et peuvent perturber le fonctionnement de systèmes électroniques. Dans les immeubles de bureaux, avec un grand nombre d'ordinateurs et un éclairage fluorescent, la surcharge du neutre par courants harmoniques homopolaires (principalement h3) est devenue courante (courant de valeur efficace supérieure à celle des courants de phase, alors que la section de cuivre est moindre). D'autres phénomènes moins fréquents ont déjà été observés, par exemple la destruction de disjoncteurs.

Les composantes dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fondamentale se rencontrent moins souvent sans être rares. Elles sont appelées inter-harmoniques. Les inter-harmoniques sont le plus souvent dus à des installations produisant des harmoniques rapidement variables, tels que fours à arc, cyclo-convertisseurs, variateurs de vitesse employés dans certaines conditions (la "modulation" des harmoniques provoque l'apparition de "bandes latérales" à des fréquences intermédiaires) : la présence de filtres d'harmoniques peut considérablement

aggraver le phénomène (amplification de fréquences intermédiaires; phénomènes d'instabilité dans les convertisseurs...).

Les interharmoniques provoquent des variations de la valeur crête de la sinusoïde et des déplacements de son point de passage par zéro ; ils sont de ce fait plus gênants que les harmoniques ordinaires et justifient des limitations plus sévères. [8]

<i>Nature du matériel électrique</i>	<i>Effet de la pollution harmonique</i>
Machines tournantes. Moteurs triphasés. Alternateurs.	Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. augmentation du bruit
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques paires.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6 Pertes diélectriques supplémentaires
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistor,...etc.)	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation)
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillessement prématuré des condensateurs
Ordinateurs.	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.
Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques.)	Fonctionnement intempestif.
Compteur d'énergie.	Erreur de mesure.
Téléviseurs.	Déformation d'image.
Lampes à décharge.	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2.

*Tableau I-1 Les principaux effets des harmoniques*

### \* Taux de Distorsion Harmonique global

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique *THD* en tension ou en courant. Cette notion permet de caractériser la déformation apportée par les harmoniques, par rapport à une onde sinusoïdale. Les taux de distorsion harmonique de la tension (*THDV*) et du courant (*THDI*) dans la suite de ce rapport sont définis respectivement par les relations suivantes:

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (I.1)$$

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (I.2)$$

Dans la plupart des cas, les appareils générant des harmoniques ont un spectre limité à 2500 Hz.

C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques et du *THD* sur les réseaux électriques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire de rang 2 à 50. Mais on peut également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [9].

#### I-2-4-4-2- Les surtensions transitoires

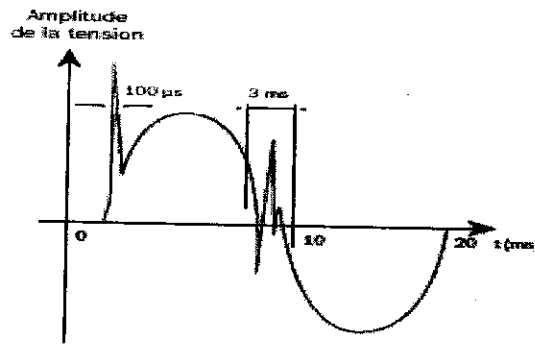
Les surtensions transitoires les plus fortes pour la clientèle- mais heureusement les moins fréquentes- sont dues à la foudre. Leur amplitude peut atteindre plusieurs kV dans les réseaux BT aériens. En outre, de tels transitoires peuvent se propager jusque dans les réseaux BT souterrains.

Des surtensions transitoires plus fréquentes se produisent dans les installations des clients, par exemple lors du déclenchement d'appareils BT. Leur contenu énergétique est moindre que pour les surtensions de foudre, mais leur amplitude peut dépasser 1 kV en BT, avec des fronts très raides (temps de montée de l'ordre de 1 ns, c-à-d  $10^{-9}$  s) ce qui présente un danger pour les circuits électroniques.

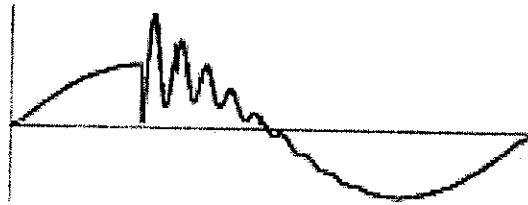
Les surtensions risquent de provoquer des dégâts importants, vis-à-vis desquels on peut se prémunir au moyen de parasurtenseur. Par ailleurs, d'autres phénomènes transitoires peuvent provoquer des dysfonctionnements gênants, sans impliquer de surtension d'amplitude très élevée.



Quelques exemples de transitoires provenant de sources diverses sont illustrés ci-après.



*Figure I-5 les surtensions transitoires*

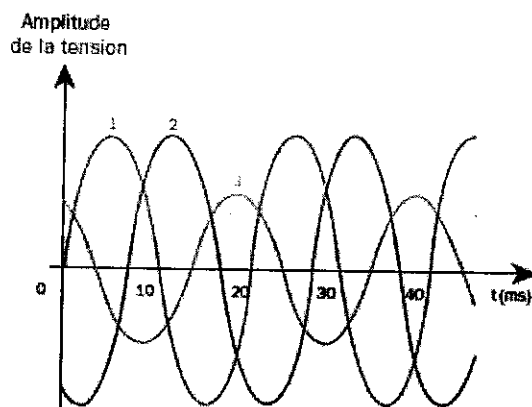


*Figure I-6 Oscillation transitoire amortie due à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs*

La sensibilité aux transitoires a significativement augmenté avec le développement de l'électronique de contrôle-commande et de puissance. Par exemple, dans le passé, l'enclenchement direct de batteries de condensateurs MT était fréquent et ne posait pas de problème ; actuellement, la grande sensibilité des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones oblige à prendre des précautions particulières (réactance série, résistance de pré-insertion, enclenchement "synchronisé", ...).

#### **I-2-4-5- Symétrie-Déséquilibre**

Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pour-cent dans un pays comme la Belgique où la longueur des lignes aériennes est limitée). Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension.



*Figure I-7 Déséquilibre de tension*

Le problème principal engendré par le déséquilibre est l'échauffement supplémentaire des machines tournantes triphasées. [8]

#### **I-2-5- La solution pour chaque perturbation et l'origine et la conséquence [8]**

Plusieurs solutions sont utilisées pour atténuer les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques, dans le tableau suivant on peut résumer quelques perturbations avec leurs solutions.

Type de perturbation	Origine	Conséquences	Solutions possibles
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
Fluctuation rapide (flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self antiharmoniques, déclassement d'appareil
Interharmoniques	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres antiharmoniques, conception de l'équipement sensible
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, Conditionneur de réseau
Surtension transitoire	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, parasurtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de préinsertion

**Tableau I-2** Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives

### **I-3- Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, le flicker, déséquilibre de tension, les harmoniques et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application:

Des perturbations de tension proviennent de l'installation croissante par l'utilisateur de charges dites fluctuantes. Il convient donc de souligner que la qualité de l'énergie électrique dépend non seulement du fournisseur mais également de l'utilisateur final.

## Chapitre II : Etude les charges polluantes

### II-1- Introduction

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la *qualité du courant et de la tension* des réseaux électriques. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de *courants harmoniques*.

Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance.

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive. Le réseau quant à lui est parfaitement adapté à des courants sinusoïdaux et préfère ne pas échanger d'énergie réactive. Ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau ont engendré un certain nombre de perturbations allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à la destruction d'une partie des équipements connectés. La progression constante en unité et en puissance des équipements d'électronique de puissance connectés a rendu nécessaire des actions afin de réduire les perturbations [10].

### II-2- Les convertisseurs statiques [11]

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

On distingue deux types de sources de tension:

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur  $V$  de la tension.

• Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace  $V$  et de la fréquence  $f$ .

On différencie quatre types de convertisseurs dont les schémas de principe sont donnés sur la figure au dessous :

- Convertisseur alternatif-continu : Redresseur ;
- Convertisseur continu-continu : Hacheur ;
- Convertisseur continu-alternatif : Onduleur ;
- Convertisseur alternatif-alternatif : C'est un gradateur lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, sinon c'est un cyclo-convertisseur.

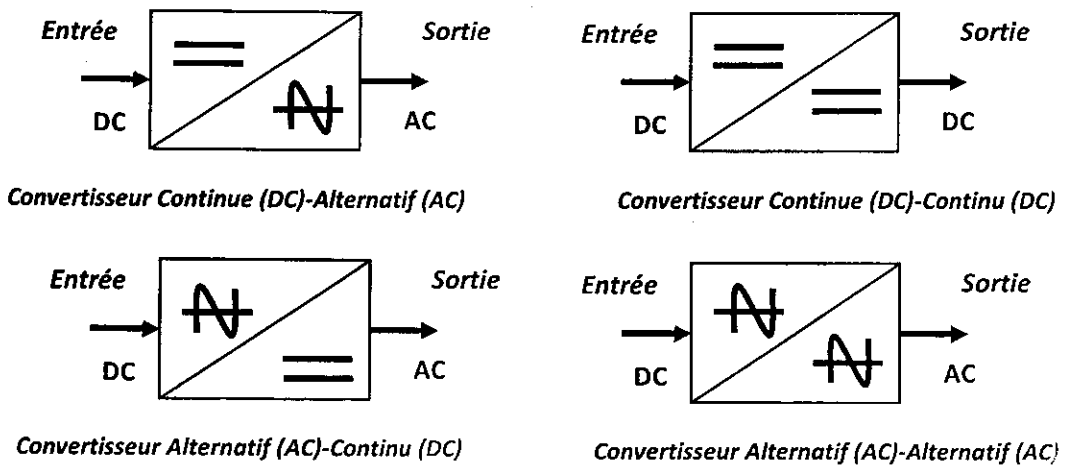


Figure II-1 Les quatre types de convertisseur statique.

### II-2-1- Quelques applications des convertisseurs statiques [12]

- ✓ **Redresseurs** : alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries
- ✓ **Hacheurs** : commande des moteurs à courant continu (vitesse variable) ; fonctions d'interrupteur onduleurs ou alimentation à découpage ;
- ✓ **Onduleurs** : production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes. protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines courant à alternatif
- ✓ **Cyclo-convertisseurs** : production des vitesses variables en alternatif (levage, machine-outil).

## II-2-2- Les avantages

Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux

- Contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance;
- Système moins lourd et moins encombrant;
- Excellent rendement;
- Facilité de mise œuvre grâce à l'automatisation;
- Protections de plus en plus efficaces;
- Cout relatif en baisse, grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants. [13]

## II-3- Etude d'une charge polluante

### II-3-1- Classement des redresseurs

Le redresseur réalise une conversion souvent réversible alternatif-continu :

- soit de type  $(V,f) \leftrightarrow (U')$  pour un convertisseur réversible;
- soit de type  $(V,f) \leftrightarrow (U')$ , avec  $U' > 0$  pour un convertisseur non réversible mais commandé;
- soit de type  $(V,f) \leftrightarrow (U)$ , avec  $U > 0$  pour un convertisseur non réversible et non commandé;

On distingue alors deux cas :

- l'opérateur **n'a pas la possibilité de régler la valeur moyenne  $U$**  de la tension de sortie. Le convertisseur est non commandé. C'est le cas des redresseurs à diodes;
- l'opérateur **a pas la possibilité de régler la valeur moyenne  $U'$**  de la tension de sortie. Le convertisseur est commandé. C'est le cas des redresseurs à thyristors.

Le classement des redresseurs dépend essentiellement :

- de la nature de la source génératrice : tension alternative monophasée ou triphasée;
- de type de redresseur : non commandé (à diodes) ou commandé (à thyristors);
- de la commande des thyristors : l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  par rapport à la commutation naturelle du redresseur à diodes est inférieur ou supérieur à  $\pi/2$  du transfert de puissance : fonctionnement sur 1, 2 ou 4 quadrants [13].

### II-3-2- Redresseur triphasé à thyristor

Le redresseur triphasé à thyristor ou pont de Graëtz triphasé, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Il permet de régler la puissance délivrée à une charge en modifiant la tension continue appliquée à ces bornes à l'aide des thyristors ceci se fait en jouant sur l'angle «  $\alpha$  » de commande des gâchettes.

$\alpha$ : Est défini par l'écart entre l'amorçage commandé et l'amorçage naturel des thyristors.

On va commencer par le redresseur de type pont de Graëtz à thyristor (6 pulses) et par la suite en modifiant la structure du montage en ajoutant un deuxième pont redresseur à thyristor de 6 pulses monté avec le premier en série afin d'avoir un redresseur triphasé à 12 pulses (Dodécophasé) [12,14].

Sachant que les deux ponts redresseurs cotés entrée sont alimentés par un transformateur à trois enroulements ou par deux transformateurs à deux enroulements. Dans les deux cas les secondaires des transformateurs sont déphasés de  $30^\circ$ .

De la même manière on peut avoir un redresseur de 24 pulses en raccordant en série deux redresseurs de 12 pulses avec deux transformateurs à trois enroulement dont les enroulements primaires sont déphasés de  $30^\circ$ .

Le principe des redresseurs 6, 12 et 24 pulses sont illustrés à la figure II-2[9].

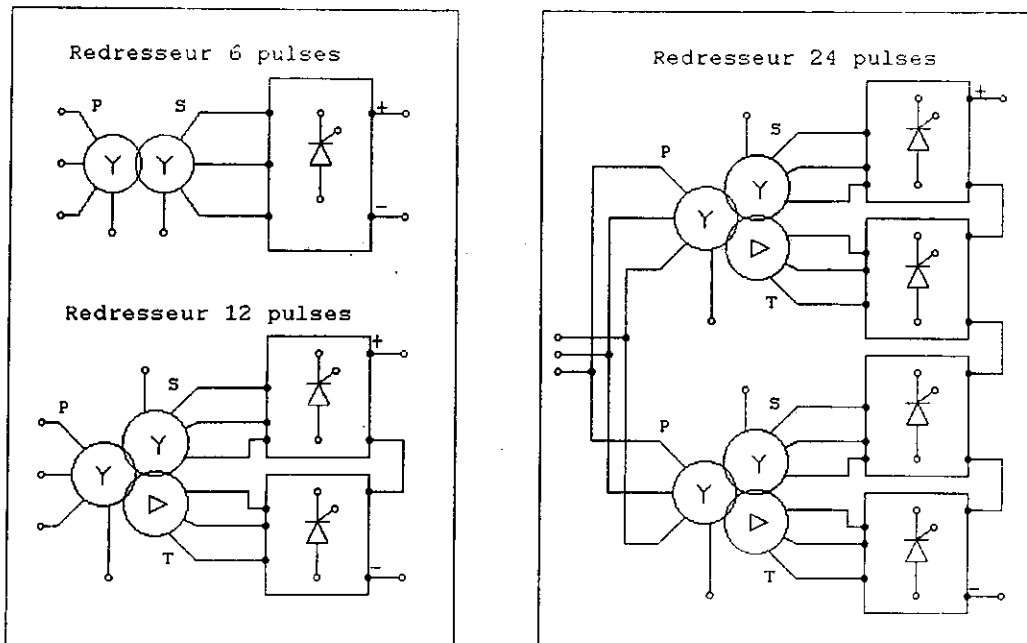


Figure II-2 Différents types de redresseurs.



**II-3-3- Etude analytique en générale « pour q phase » [11]**

On note les tensions secondaires par : bonne courage

$$V_1 = V_{\max} \sin(\omega t) \quad (\text{II-1})$$

$$V_2 = V_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{q}\right) \quad (\text{II-2})$$

$$V_q = V_{\max} \sin\left(\omega t - (q-1)\frac{2\pi}{q}\right) \quad (\text{II-3})$$

Avec q le nombre de phase.

**➤ Etude de la tension redressée**

Le commutateur le plus positif (th1, th2, ..., thq,) délivre une tension redressée ( $V_M - V_0$ ) formée les « q » portions de sinusoïde.

$$V_M - V_0 = V_1 \text{ pour } \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-4})$$

$$V_M - V_0 = V_2 \text{ pour } \frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{5\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-5})$$

$$V_M - V_0 = V_3 \text{ pour } \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-6})$$

Le commutateur le plus négatif (th1', th2', ..., thq') délivre une tension redressée ( $V_N - V_0$ ) formée les q portions de sinusoïde.

$$V_N - V_0 = V_1 \text{ pour } \frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-7})$$

$$V_N - V_0 = V_2 \text{ pour } \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{3\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-8})$$

$$V_N - V_0 = V_3 \text{ pour } \frac{3\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{3\pi}{2} + \frac{5\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-9})$$

**\* Valeur moyenne**

La valeur moyenne de la tension redressé est donné par :

$$U_{\text{dmoy}} = (V_M - V_0)_{\text{moy}} - (V_N - V_0)_{\text{moy}} = U_{d1} - U_{d2} \quad (\text{II-10})$$

$$\text{Ainsi pour } \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II-11})$$

D'où sa valeur moyenne :

$$U_{d1} = \frac{q}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha} V \sqrt{2} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{q}{\pi} v \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha \quad (\text{II-12})$$

De la même façon on trouve :

$$U_{d2} = -\frac{q}{\pi} v \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha \quad (\text{II-13})$$

Donc la tension redressée totale est égale :

$$U_{dmoy} = U_{d1} - U_{d2} = \frac{2q}{\pi} v \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha \quad (\text{II-14})$$

### ➤ Valeur efficace [12]

La valeur efficace de la tension est calculée comme suit par :

$$U_{def} = \sqrt{\frac{p}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{p} + \alpha}^{\frac{\pi}{p} + \alpha} U_{dmoy}^2 d\omega t} \quad (\text{II-15})$$

$$U_{def} = U_{max} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{p}{4\pi} \sin \frac{\pi}{4p} \cos 2\alpha} \quad (\text{II-16})$$

Pour le redresseur triphasé  $q=3$  ; donc :

$$U_{dmoy} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} v \sqrt{2} \cdot \cos \alpha \quad (\text{II-17})$$

$$U_{def} = V \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha} \quad (\text{II-18})$$

### ➤ Etude du courant

Chaque enroulement secondaire, étant réuni à deux thyristors, est parcouru par un courant pendant deux intervalles de durée  $T/q$

Ainsi  $i_{s1} = +I_d$  quand Th1 conduit

$i_{s2} = -I_d$  quand Th2 conduit

Donc la valeur efficace du courant secondaire, donner par :

$$I_{seff} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{q}} I_d^2 dt} \Rightarrow I_{seff} = I_d \sqrt{\frac{2}{q}} \quad (\text{II-19})$$

### II-3-4- Redresseur Dodécphasé [10]

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé.

C'est dire on regroupe deux ponts convertisseurs. Un pont a une connexion YY (PD3) et un autre pont à une connexion  $Y\Delta$  (S3), pour augmenter la tension.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montrent que les harmoniques de rang  $6k \pm 1$  avec ( $k$  impair) sont éliminés. Et seuls les harmoniques de rang  $12k \pm 1$  ( $k$  entier naturel) subsistent.

On élimine ainsi les harmoniques H5, H7, H17 et H19. Les harmoniques restant sont H11, H13, H23 et H25.

Le courant obtenu a une forme plus proche d'une sinusoïde que celle obtenue avec un seul redresseur.

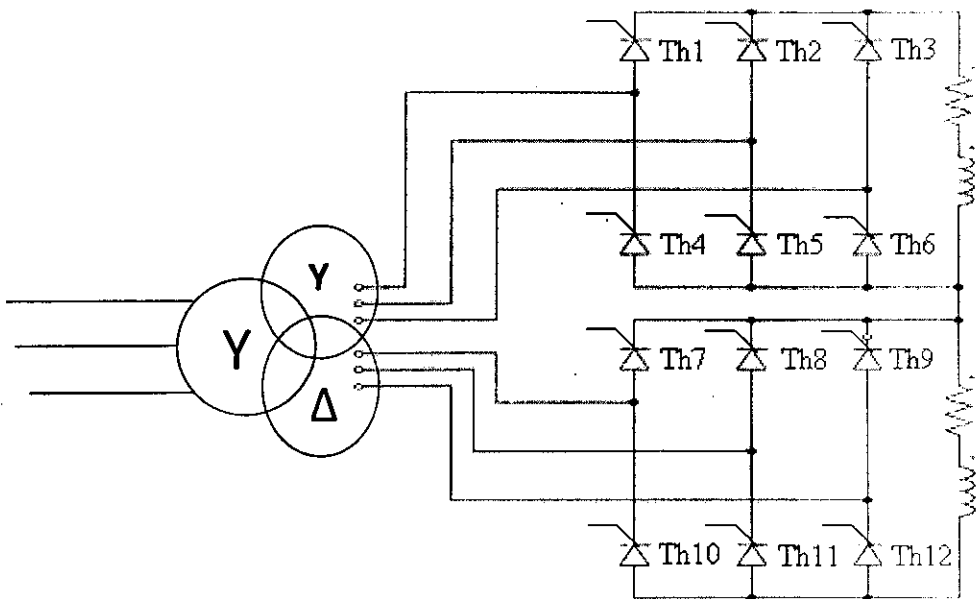


Figure II-3 Schémas d'un redresseur Dodécphasé

❖ Développement en série de Fourier [12]

Consiste à fait la somme des deux séries des convertisseurs PD3 et le S3

II-3-4-1- Etude du S3

$A_0=A_n=0$  : symétrie par rapport à l'origine (signal impair)

$B_{2k}=0$  : symétrie de glissement

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d\omega t \tag{II-20}$$

$$B_n = \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\pi}{3}} 0.577 I_d \sin(n\omega t) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} 1.155 I_d \sin(n\omega t) d\omega t \right] \tag{II-21}$$

Après le calcul on trouve :  $B_n = \frac{4 I_d}{n \pi} \left[ 0.577 \left( 1 + \cos \left( \frac{n \pi}{3} \right) \right) \right]$  (II-22)

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) d\omega t \tag{II-23}$$

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 I_d}{n \pi} \left[ 0.577 \left( 1 + \cos \left( \frac{n \pi}{3} \right) \right) \right] \sin(n\omega t) \tag{II-24}$$

Après le développement on trouve :

$$i(t) = 1.03 I_d \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) - \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots \right) \tag{II-25}$$

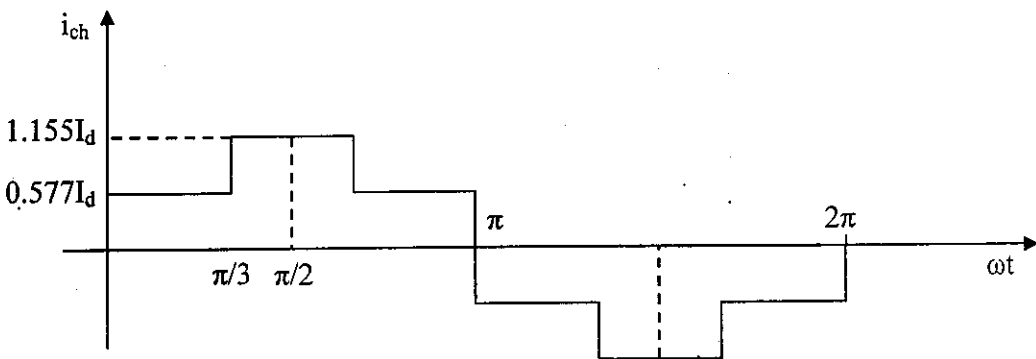


Figure II-4 courant d'entrée de pont du redresseur S3

II-3-4-2- Etude du PD3

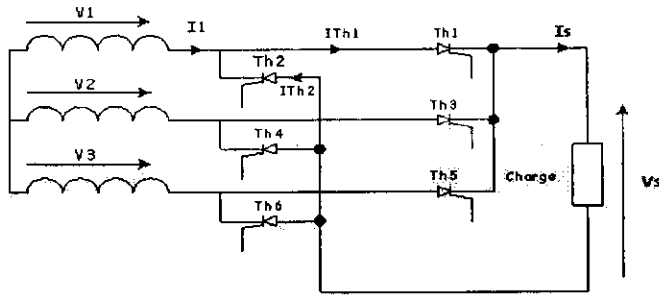


Figure II-5 redresseur PD3 commandé

L'application du théorème de Fourier donne

$A_0 = A_n = 0$  : Symétrie par rapport à l'origine (signal impair)

$B_{2k} = 0$  : symétrie de glissement

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} (-I_d) \sin(n\omega t) d\omega t \tag{II-26}$$

Après le calcul on trouve  $B_n = \frac{2I_d}{n\pi} (1 - (-1)^n) \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right)$  (II-27)

$$B_n = \begin{cases} 0 & \text{Si } n \text{ pair.} \\ \frac{4I_d}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & \text{Si } n \text{ impair.} \\ 0 & \text{Si } n \text{ multiple de 3.} \end{cases}$$

Donc :

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t)$$

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n\omega t) \tag{II-28}$$

Après le développement on trouve:

$$i_{AY}(t) = 1.03 I_d \left( \sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \dots \right) \tag{II-29}$$

Un réseau alimentant un montage redresseur à celui-ci un courant presque rectangulaire.

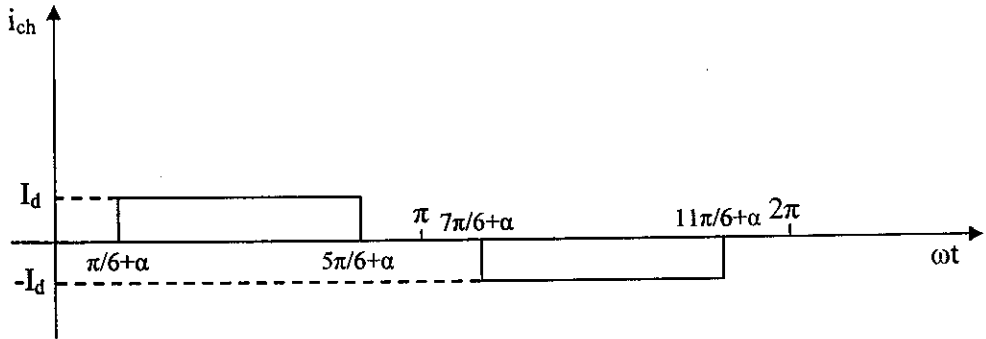


Figure II-6 courant d'entrée de pont du redresseur

En réalité la forme d'onde de courant n'est pas rectangulaire (créneau) mais à une forme ondulée due à la présence d'une inductance en aval avec le redresseur

$$i_{ch} = \begin{cases} Id & \text{si } \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} \\ -Id & \text{si } \frac{7\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{11\pi}{6} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases}$$

**II-3-4-3- Pour le P12 on fait la somme de deux courants [14]**

$A_0=A_n=0$  : symétrie par rapport à l'origine (signal impair)

$B_{2k}=0$  : symétrie de glissement

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$B_n = \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\pi}{3}} 0.577 I_d \sin n\omega t d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} 1.155 I_d \sin n\omega t d\omega t \right] \tag{II-30}$$

Après le calcul on trouve :  $B_n = \frac{4I_d}{n\pi} \left[ 0.577 \left( 1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right) \right]$  (II-31)

$$I_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t)$$

$$I_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \left[ 0.577 \left( 1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right) \right] \sin(n\omega t)$$

Après le développement on trouve :

$$i(t) = 1.03I_d \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots \right)$$

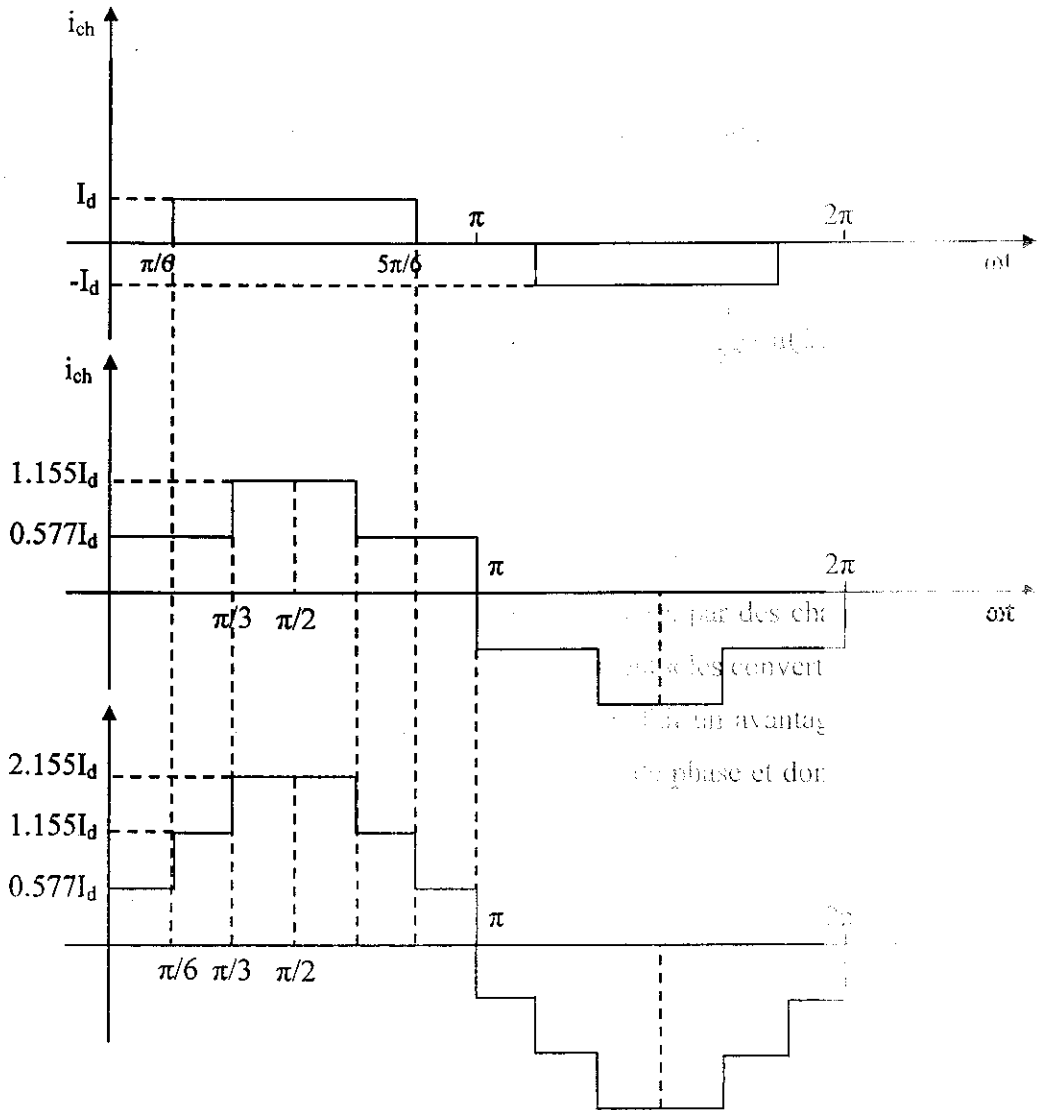


Figure II-7 courant d'entrée de pont du redresseur P :

Donc :

$A_0 = A_n = 0$  : symétrie par rapport à l'origine (signal impair)

$B_{2k} = 0$  : symétrie de glissement

$2\pi$

$$B_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/6} 0.577 I_d \sin(n\omega t) d\omega t$$

Après le calcul on trouve :  $B_n = \frac{4I_d}{n\pi} \left[ 0.577 \left( 1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \right) \right]$  (II-34)

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \left[ 0.577 \left( 1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \right) \right] \sin(n\omega t) \quad (II-35)$$

Après le développement on trouve:

$$i(t) = 2.205I_d \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \frac{1}{23} \sin(23\omega t) + \dots \right) \quad (II-36)$$

#### II-4- Conclusion

On peut d'après ce chapitre que :

- Les courants et les tensions harmoniques sont créés par des charges non linéaires raccordées au réseau de distribution essentiellement « les convertisseurs statique »
- L'utilisation des convertisseurs à 12 pulsations fait un avantage du côté réseau, puisque certains harmoniques sont en opposition de phase et donc supprimés « 5 et 7 » qui ont les amplitudes les plus grandes.



## Chapitre III : Le site industriel « Aciérie électrique »

### III-1- Introduction

Les exigences, de plus en plus sévères, des utilisateurs vis-à-vis des aciers, en ce qui concerne aussi bien leur composition chimique, leur propreté physique que leurs caractéristiques d'emploi, ont entraîné, depuis le début des années 60, le développement d'un grand nombre de traitements métallurgiques, de plus en plus complexes, qui ne pouvaient trouver leur place dans le réacteur traditionnel d'aciérie : convertisseur à l'oxygène c'est les aciéries électriques équipées par les fours à arc [15].

Si l'on cherche à résumer en quelques lignes l'évolution de la sidérurgie mondiale depuis les inventions capitales de Bessemer, Martin et Siemens, Thomas, Héroult dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, on peut distinguer trois grandes périodes.

- Jusqu'en 1950 : amélioration continue de ces inventions dans les domaines technologiques et métallurgiques, et sans qu'elles soient remises en cause.
- De 1950 à 1980 :
- Apparition de nombreuses nouvelles technologies basées sur l'utilisation d'oxygène pur, pour ne laisser finalement place qu'au convertisseur à l'oxygène pur avec ses variantes ;
- En parallèle : développement important du four électrique, bénéficiant d'améliorations technologiques et de disponibilités en ferrailles dues à l'arrêt du four Martin ; puis disparition des convertisseurs Thomas et Bessemer, ainsi que des fours Martin, tout au moins dans les pays industrialisés modernes ; et finalement apparition et extension d'une métallurgie en poche très diversifiée.
- À partir de 1980, et probablement pour un certain nombre d'années au-delà de 1990:
- Stabilité dans les procédés d'élaboration qui continuent à se perfectionner ;
- Développement généralisé de la métallurgie en poche pour répondre aux impératifs de productivité et aux exigences toujours croissantes sur la qualité des aciers [16].

### III-2- Aciérie électrique [17]

La conception de l'aciérie doit permettre d'obtenir du four à arcs sa production maximale, en évitant toute perte de temps due aux opérations elles-mêmes ou aux équipements auxiliaires. Elle doit permettre d'opérer avec un minimum de main-d'œuvre.

Avant 1980, une aciérie importante comportait plusieurs fours, quatre au maximum, ou deux de préférence, pour limiter les retards dus aux interférences des moyens de chargement et de coulée.

Depuis 1980, l'augmentation de productivité des fours permet de concevoir des unités compactes comprenant :

- Un parc à ferrailles ;
- Un four de fusion ;
- Des poches de coulée ;
- Une installation de traitement en poche ;
- Une coulée continue.

Le chargement du four est assuré par paniers à coquilles ouvrantes ou parfois à *quartiers d'orange*. Leurs dimensions (diamètre et hauteur) doivent être soigneusement adaptées à celles du laboratoire du four, de façon à pouvoir, dans toute la mesure du possible, réaliser la charge en deux fois au maximum et économiser ainsi le temps (3 à 4 min) et l'énergie (environ 15 kWh/t) dans le cas où l'on n'a pas adopté l'alimentation continue.

Le parc à ferrailles, qui doit assurer la réception, la classification et le stockage de la ferraille, et le remplissage des paniers, peut être divisé en deux unités : *parc stratégique* (stockage de longue durée) et *parc de chargement*, mais la tendance actuelle des aciéries françaises semble être à regrouper les deux.

La cadence de production réalisée par les fours à haute puissance demande que les équipements du parc à ferrailles soient capables de remplir simultanément deux paniers. Il faut donc disposer de deux ponts roulants ou d'un portique à deux électroaimants, le transport à l'aciérie étant assuré par deux chariots transferts, en général sur rails. Certaines aciéries préfèrent avoir un parc de chargement couvert pour abriter la ferraille de la pluie et de la neige, mais cela plutôt pour éviter un risque

d'explosion au four que par souci d'économie d'énergie. Le parc stratégique, s'il existe, est toujours à l'air libre et desservi par des grues sur roues ou sur chenilles.

### III-3- Mise en œuvre des aciers [17,18]

Les aciers offrent de nombreuses possibilités de mise en œuvre de par l'ensemble de leurs propriétés. Aussi le constructeur pourra-t-il se livrer à de nombreuses opérations.

#### III-3-1- Découpage

Celui-ci pourra être :

- **Mécanique** par sciage, cisailage, poinçonnage, grignotage ;
- **Thermique** avec fusion et oxydation du métal, la chaleur étant fournie par un chalumeau, une torche à plasma ou un faisceau laser.

#### III-3-2- Formage

Rendu possible grâce à la plasticité des aciers, il peut être entrepris dans différents domaines de températures qui correspondent chacun à un maximum relatif de ductilité.

##### III-3-2-1- Formage à chaud

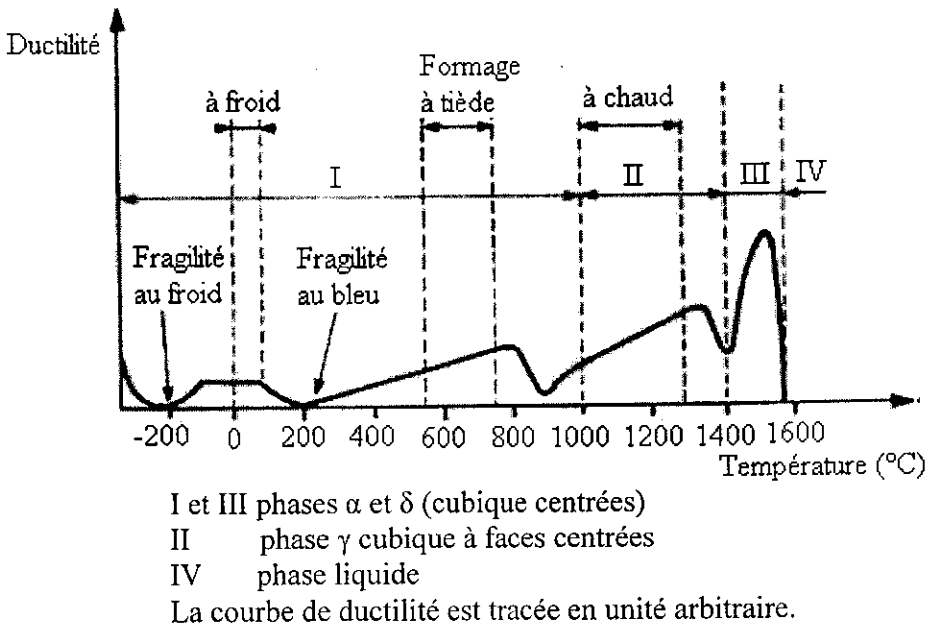
Il est réalisé à des températures telles que l'acier soit totalement austénitique et possède, de ce fait, la plus grande plasticité mais aussi la plus basse limite d'élasticité. ce qui permet de limiter les sollicitations et l'endommagement des outillages ; selon la complexité de ces derniers on parle :

- De **forgeage libre** qui consiste à agir par pression et/ou percussion à l'aide d'outils simples et permet de réaliser des formes peu complexes qui constituent généralement des ébauches ;
- D'**estampage** ou **matriçage** lorsque le métal est forcé entre des outils dans lesquels la forme de la pièce à fabriquer a été gravée en creux ;
- D'**emboutissage** lorsqu'un produit plat est travaillé avec des outils de forme sur une presse.

##### III-3-2-2- Formage à tiède ou à mi-chaud

Il n'est encore qu'en voie de développement et peut être réalisé dans une gamme de températures comprise entre un maximum correspondant au début de la

transformation et un minimum défini à partir des risques d'apparition d'un vieillissement dynamique; en fait l'intervalle favorable se situe souvent vers 650-700°C.



**Figure III-1** Déformabilité de l'acier en fonction de la température

**III-3-2-3- Formage à froid (c'est-à-dire au voisinage de la température ambiante).**

Il exige que l'acier soit très malléable et ait donc subi un traitement d'adoucissement spécifique lui conférant une structure ferritique (et globulisant les carbures si l'acier est riche en carbone). Pour la même raison, l'état inclusionnaire de l'acier doit être maîtrisé, notamment par abaissement des teneurs résiduelles en oxygène et en soufre.

On parle : Pliage; Emboutissage; Forgeage à froid ou extrusion; Frappe à froid; Tréfilage ou Etirage; Cintrage-Roulage.

**III-3-3- Usinage**

Le développement de moyens d'usinage de plus en plus performants a accru l'intérêt des possibilités d'amélioration de l'usinabilité des aciers. Celle-ci dépend essentiellement :

- De l'état structural ;
- De l'état inclusionnaire ;

Mais elle se définit maintenant en fonction des moyens d'usinage et des outils utilisés[18].

### **III-3-3-1- influence de l'état structural**

Elle est généralement bien traduite par celle de la dureté; l'usinabilité varie globalement en raison inverse de cette dernière.

### **III-3-3-2- Influence de l'état inclusionnaire**

Elle est très importante mais on doit ici distinguer le type des inclusions : Sulfures, Oxydes et Plomb.

### **III-3-4- Soudage**

Le soudage est un moyen privilégié d'assemblage des aciers. Il autorise des réalisations complexes et permet souvent une judicieuse utilisation du matériau dans des conditions économiques.

De nombreux procédés peuvent être utilisés pour souder les aciers.

#### **III-3-4-1- Procédés faisant intervenir la fusion seule**

Ce sont des procédés qui mettent en jeu des sources de chaleur externes plus ou moins concentrées allant du chalumeau au faisceau laser en passant par le jet de plasma, l'arc électrique et le faisceau d'électrons. Le fait de passer par une phase liquide générée, le plus souvent, par fusion d'une part de métal de base et d'un métal d'apport (massif ou en poudre) impose de protéger le bain liquide contre l'agression de l'atmosphère (par formation d'un laitier ou apport de gaz). Le comportement mécanique de l'assemblage est déterminé par :

- Les propriétés du métal brut de solidification ;
- Les propriétés du métal de base dans les zones surchauffées au voisinage du métal fondu.

#### **III-3-4-2- Procédés qui, après fusion, font intervenir une phase de compression du métal fondu et de la zone plastifiée: Ce sont :**

- Le soudage par résistance;
- Le soudage par étincelage.

#### **III-3-4-3- Procédés à chaud qui ne font pas intervenir la fusion**

Ils passent par un échauffement accompagné et/ou suivi de l'application d'un effort de compression de la zone chauffée. Ce sont :

- Le soudage par friction;
- Le soudage par diffusion.

#### **III-3-4-4- Procédés à froid**

Ils ne font intervenir que des actions mécaniques et exigent une préparation préalable des surfaces à assembler. Ce sont :

- Le soudage par ultrasons ;
- Le soudage par explosion.

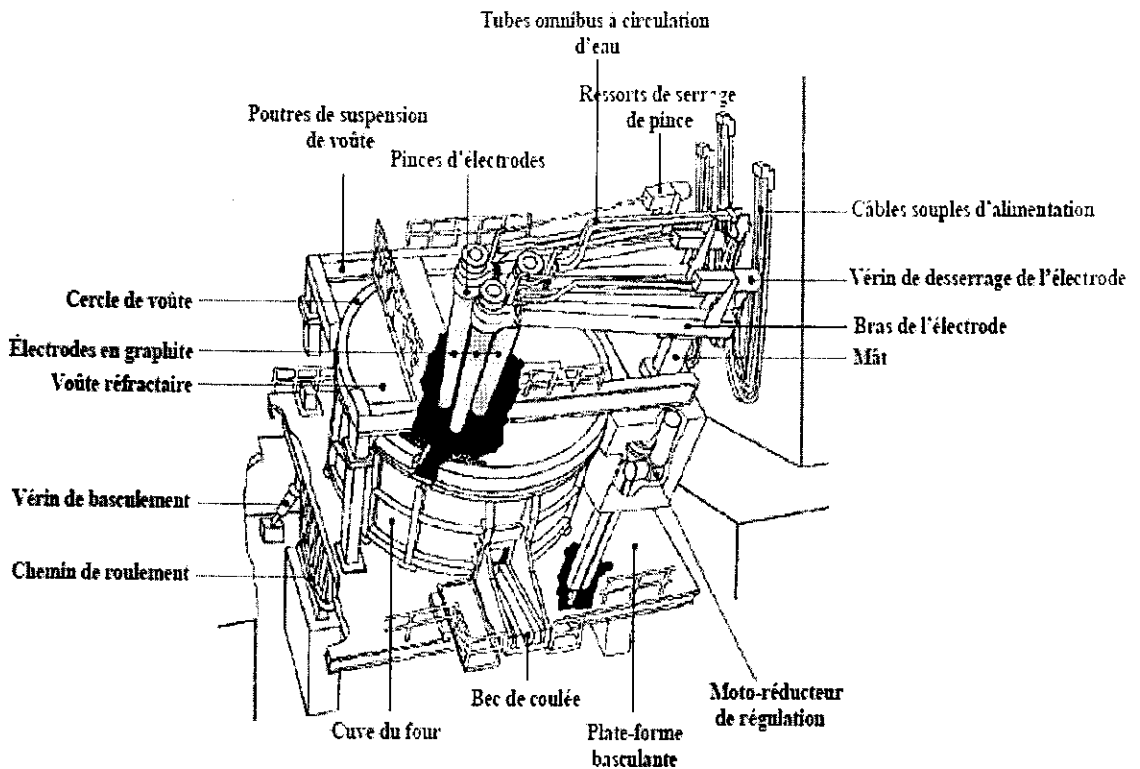
#### **III-4- Présentation générale du four à arc**

Le four à arc est constitué essentiellement d'une cuve garnie de matériaux réfractaires, basculante pour la coulée et le décarbage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen d'un ou plusieurs arcs électriques jaillissant entre les électrodes en graphite et la charge. La figure III-2 présente la structure d'un four à arc à courant alternatif.

A l'origine, le four à arc était utilisé essentiellement pour la production des aciers spéciaux, car il permet non seulement d'atteindre des températures élevées (supérieur à 1650°C), mais aussi de réaliser un affinage sur mesure en assurant au choix une atmosphère oxydante et/ou réductrice.

Au fil des années, le four à arc a connu des perfectionnements spectaculaires et est devenu un réacteur métallurgique multi-énergies. La réduction des durées d'affinage de l'acier liquide et l'accroissement de la puissance massique, ont permis d'améliorer sa compétitivité en augmentant la productivité et en diminuant la consommation d'énergie.

Les fours à arc sont aujourd'hui largement utilisés et représentent, dans beaucoup de cas, l'outil de fusion le mieux adapté. Ainsi, la gamme de produits finis obtenus s'étend en nécessitant l'utilisation de nombreuses matières premières [17].



*Figure III-2 Vue extérieure d'un four à courant alternatif*

### III-5- Caractéristique de fonctionnement du four [2]

Le fonctionnement du FAE est caractérisé par les régimes suivants:

1. Le régime électrique, qui est défini par les valeurs du courant, de la tension, de l'impédance et de la puissance. La variation de la charge a lieu par suite de la modification de la longueur et de l'impédance de l'arc, fluctuant de zéro (le court-circuit et la puissance du transformateur et maximale) à l'infinie (la coupure de l'arc).
2. Le régime de chargement, qui est défini par les régimes de marche à vide, de charge nominale et de court-circuit d'exploitation.
3. Le régime de fonctionnement ou économique et rationnel, qui est défini par une série des indices énergétiques comme la productivité, la consommation spécifique de l'énergie électrique, la qualité et le prix de revient de fabrication. La rationalité de fonctionnement du FAE est caractérisée par la brûlure continue des arcs électriques, l'absence de la non symétrie des puissances des arcs et le rapport correct entre l'impédance du circuit d'alimentation et les impédances des arcs.

### III-6- Cycle de fonctionnement [19]

Quelle que soit la nature de l'alimentation (AC ou DC) d'un four à arc l'élaboration de l'acier peut être décomposée en plusieurs étapes :

- 1 : Phase de forage (boring) : les électrodes creusent un puits au milieu de la cuve du four à arc qui est remplie de ferrailles. Cette séquence de fonctionnement a lieu sous puissance réduite. Le puits ainsi créé permet de limiter le rayonnement de l'arc sur les parois du four et donc de minimiser l'usure du matériau réfractaire. Cette phase dure environ 2 minutes.
- 2 : Phase de fusion (melting) du premier panier : dans cette phase, la puissance du four à arc est maintenue à son maximum. L'arc, tant qu'il est noyé, conserve un bon rendement thermique soit environ 0,7. Quelques minutes après la mise sous tension, on utilise dans certains cas les lances à oxygènes comme chalumeau, pour découper les plus grosses ferrailles. En fin de fusion du premier panier, une injection de carbone permet de fondre les banquettes d'infondus. Cette phase dure entre 15 et 25 minutes.
- 3 : Chargement du deuxième panier (charging basket number 2) : dès que la fusion du premier panier est jugée suffisante, on procède au chargement du deuxième panier, qui est réalisé en 2 à 3 minutes (pivotement voûte + électrodes, chargement du panier,...).
- 4 : Phase de forage du deuxième panier : cette séquence de fonctionnement est identique à la phase 1
- 5 : Phase de forage du deuxième panier : après une nouvelle phase de forage, la fusion du deuxième panier reprend sous puissance nominale (phase 5), pendant environ 10 à 20 minutes.
- 6 : Phase d'affinage ou bain plat (refine) : dans cette phase, les ferrailles sont totalement fondues mais l'acier n'est pas encore suffisamment chaud pour être coulé. On observe alors une brusque augmentation du flux thermique vers les parois et la voûte en raison du fort rayonnement de l'arc. Les lances à oxygène et à charbon sont activées, la combustion du charbon, directement introduit dans le bain, va créer des gaz qui vont faire mousser le laitier dont les constituants ont été enfournés avec les ferrailles. Le laitier moussant limite le rayonnement de l'arc vers les parois et permet d'obtenir un rendement d'arc de 0.7 au lieu de 0.4 sur bain plat. Les injections de gaz apportent une énergie supplémentaire au bain et l'agitent ce qui a pour effet de l'homogénéiser. Pour minimiser l'usure du matériau réfractaire, cette phase a lieu sous tension réduite donc à puissance réduite et dure environ 5 minutes.



- 7 : Phase de décrassage : le laitier et les scories sont retirés par basculement du four. Après prise de température, une correction éventuelle est réalisée en utilisant de préférence les lances.
- 8 : Coulée (tapping) : quand la température du bain est suffisante (environ 1620 °C), le métal en fusion est coulé et transporté vers un four poche (ladle furnace). Un fond d'acier en fusion qui est appelé pied de bain et qui représente 10% de la masse totale est maintenu dans la cuve. Ensuite, le four poche est évacué vers la coulée continue.
- 9 : Chargement premier panier : la voûte et les électrodes sont pivotées. Un pont roulant amène au-dessus du four le premier panier qui contient entre 50 et 60% de la charge totale, la décharge en s'ouvrant par le bas puis se retire. La voûte est aussitôt remise en place.

### III-7- Le four à arc à courant continu [DC EAF]

Par nature, l'arc à courant continu est plus stable que l'arc alternatif ; il produit donc moins de fluctuations donc moins de flicker. C'est une des raisons qui ont poussé au développement des fours à arc à courant continu. La différence entre le four à arc à courant continu et le four à arc à courant alternatif se situe au niveau de l'alimentation électrique :

- L'alimentation électrique du four à arc à courant continu comporte un système de redressement alternatif/continu, à base de circuits électroniques de puissance.
- Elle comporte une ou plusieurs électrodes de sole qui forment l'anode, la cathode étant constituée par une ou plusieurs électrodes de graphite. L'électrode de sole, implantée dans le fond de la cuve, permet de fermer le circuit électrique [20,21].

#### III-7-1- Avantage du DC EAF

Une caractéristique du four DC, qui s'est révélée être un avantage important une fois passé à l'étape industrielle, est le comportement de l'arc électrique [22]. Alors que l'arc en courant alternatif est dirigé vers les parois du four avec un angle de 30 à 45°, l'arc en courant continu va de la pointe d'électrode vers le bain et tourne plusieurs fois par seconde de façon aléatoire du fait des forces électromagnétiques. La maîtrise de cette déviation d'arc nécessite une étude soignée du cheminement des conducteurs. Cela conduit à une fusion des ferrailles représentées schématiquement sur la figure. La fusion des ferrailles est plus rapide et plus régulière, les pertes thermiques sont plus faibles. On

peut donc concevoir une évolution de la fusion électrique vers un procédé ARP (*Arc Refining Process*) à la fois automatisé et optimisé [22] avec bain profond et brassage intense.

Dès maintenant, on peut attribuer au four DC les avantages suivants sur le four alternatif :

- ✓ Réduction du *flicker* de l'ordre de 50 % ;
- ✓ Réduction sensible du bruit ;
- ✓ Réduction de la consommation d'électrode de graphite (de l'ordre de 1,2 kg/t contre 1,3 à 1,5 pour le four alternatif) ;
- ✓ Augmentation de la productivité et économie d'énergie (de l'ordre de 2 %).

### III-7-2- Diagramme énergétique [19]

Dans le cas d'une alimentation à courant continu, l'étude du four à arc et de son alimentation est relativement plus simple car, en général, la valeur de la tension d'arc est indépendante de la valeur du courant. La figure III-3 montre la caractéristique V-I de l'alimentation d'un four à arc à courant continu.

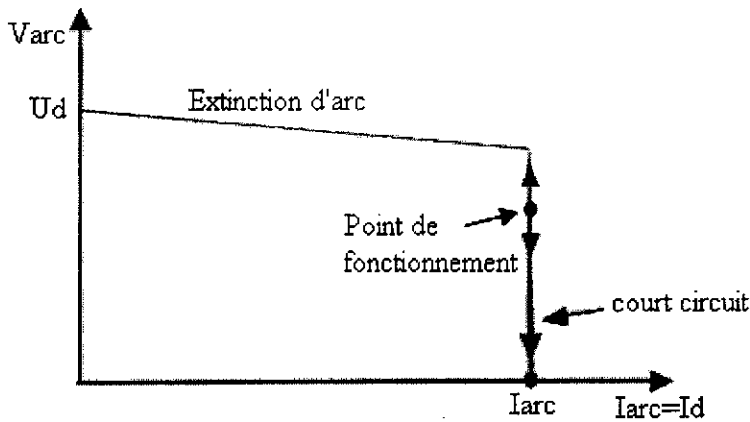
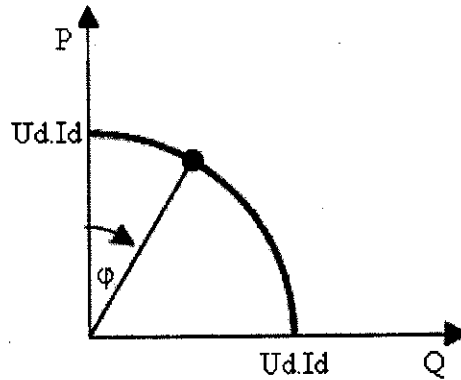


Figure III-3 Caractéristique V-I de l'alimentation d'un four à arc à courant continu.

L'expression des puissances active et réactive, calculées sur le réseau d'alimentation est donnée par l'équation III.1 ( $\alpha$  est fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors).

$$\begin{cases} P \equiv U_d \cdot I_d \cos \alpha \\ Q \equiv U_d \cdot I_d \sin \alpha \end{cases} \quad (III-1)$$

Où  $U_d$  est la tension continue maximale délivrée par le pont à thyristors et  $I_d$  est le courant à la sortie du pont. Le diagramme énergétique pour un four à courant continu est présenté en figure III.4.



*Figure III-4 Diagramme énergétique pour un four à arc à courant continu.*

### III-7-3- Description de la partie électrique

L'architecture d'alimentation électrique d'un four à arc à courant continu est semblablement la même que celle d'un four à courant alternatif. Toutefois, elle se distingue par la présence de redresseur entre le transformateur du four et les électrodes. L'architecture la plus couramment répandue comprend :

- Un transformateur abaisseur permettant de passer de la haute tension à une moyenne tension.
- Un ou deux disjoncteurs de protection et de manœuvre.
- Un transformateur de four permettant de passer de la tension intermédiaire à des basses tensions.
- Un redresseur.
- Un ensemble de câbles souples et une porte électrode.
- Un système de compensation d'énergie réactive comprenant un filtrage anti-harmonique.

Les puissances mises en jeu dans les fours à arc étant relativement importantes, ils nécessitent donc des convertisseurs à courants élevés ; on utilise généralement la mise en parallèle de deux ponts triphasés à thyristors, raccordés à un transformateur à double enroulement. Les enroulements secondaires de ce transformateur sont alors couplés en étoile et triangle de manière à obtenir un redresseur dodécaphasé à indice de pulsation  $p=12$  [23,24].

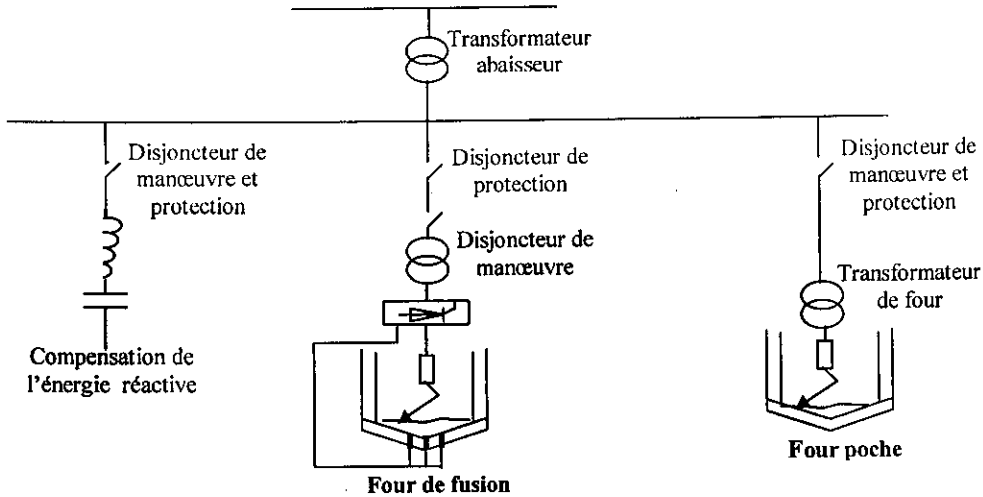


Figure III-5 Aciérie électrique (DC EAF)

### III-8- Principe d'association des convertisseurs

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en **pont de Graëtz** qui réalise un redressement hexaphasé.

C'est dire on regroupe deux ponts convertisseurs. Un pont a une connexion YY (PD3) et un autre pont à une connexion  $Y\Delta$  (S3). On utilise généralement la mise en parallèle de deux ponts triphasés à thyristors, raccordés à un transformateur à double enroulement.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang  $6k \pm 1$  avec  $k$  impair sont éliminés [25,26].

**NB :** La mise en série sert pour l'augmentation de la tension, et sa sera le sujet de l'étude du réseau de transport de l'énergie électrique à courant continu « HVDC ».

### III-9- Description du Modèle

Notre model consiste à utiliser un redresseur à douze pulsations pour l'alimentation du four à arc triphasé [25,21], et notre proposition sert a utilisé les

sorties des redresseurs comme des électrodes du four, comme représenté sur la figure III.6.

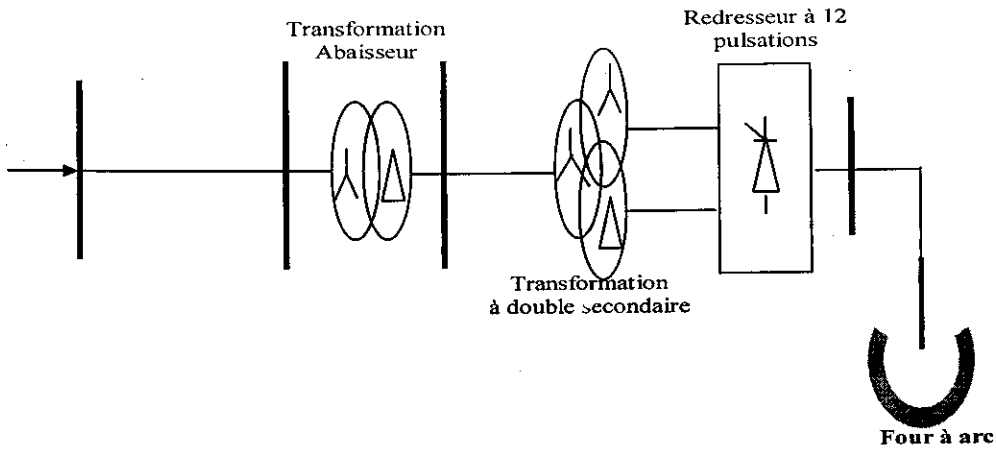


Figure III-6 Schéma monophasé du modèle de DC EAF

### III-10- Résultats de simulation

#### III-10-1- Pour le redresseur PD3

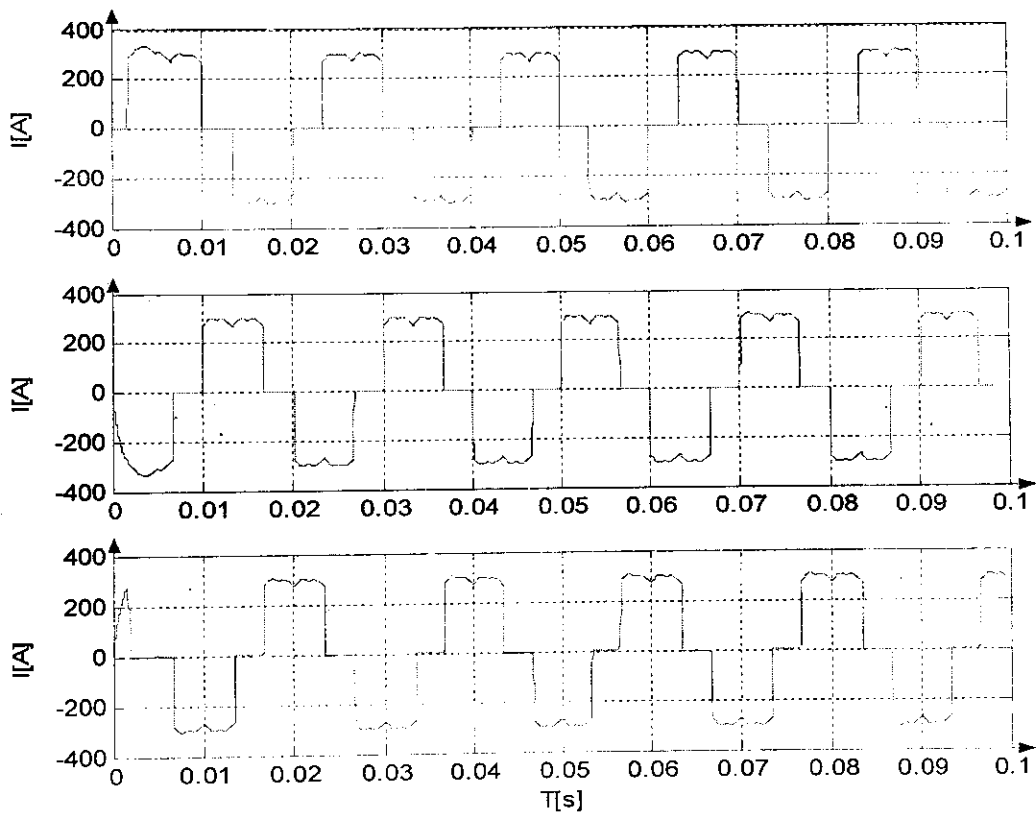


Figure III-7 Forme du courant de PD3

III-10-2- Pour le redresseur S3

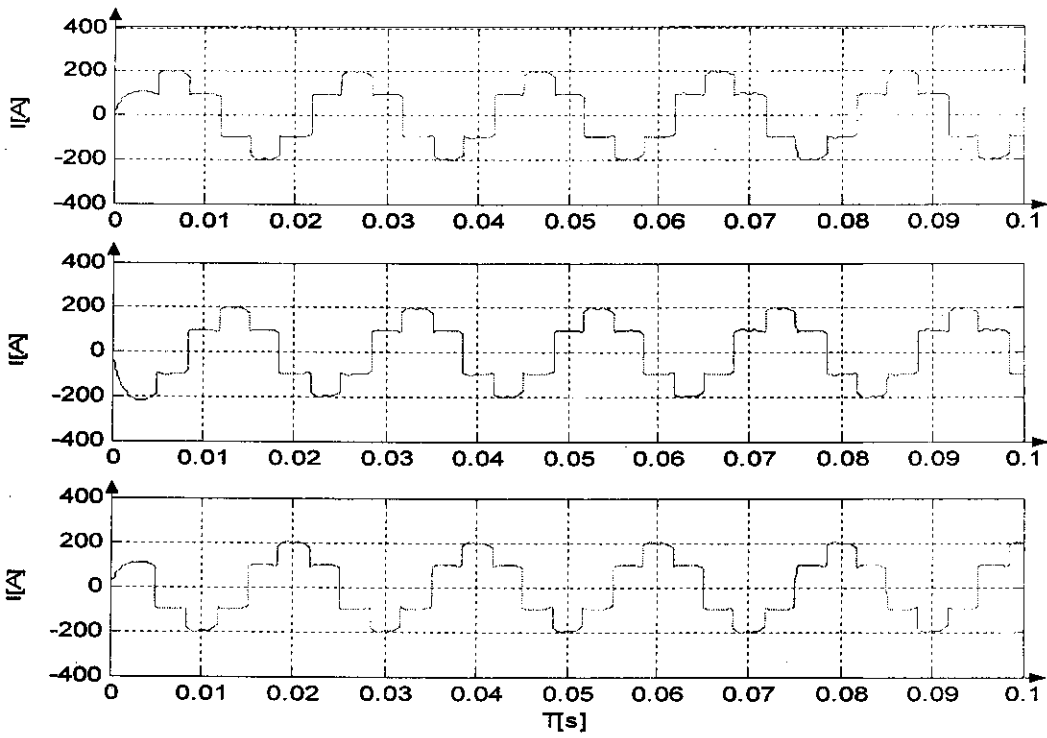


Figure III-8 Forme du courant de S3

III-10-3- Pour le redresseur S3 // PD3  $\rightleftarrows$  P12

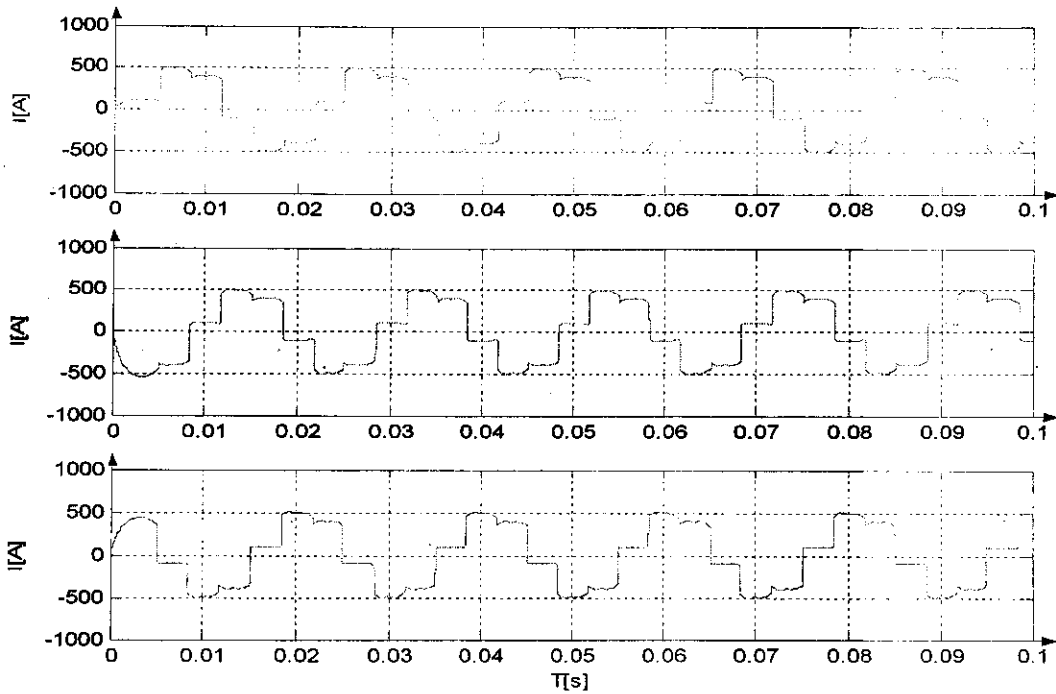


Figure III-9 Forme du courant de P12

III-11- Régime harmonique du DC EAF

Modèle de l'arc utilisé

On utilise le modèle suivant c'est un modèle empirique du four à arc étudié modélisé d'après leur résistance et réactance d'arc [27, 28,29]:

$$R_{arc} = A_R(u) e^{\alpha(u)d}; \tag{III-2}$$

$$A_R = \frac{[0.7.(U-210)^2 + 1.7]}{50^2} . 10^{-3} \tag{III-3}$$

$$\alpha = 0.097 e^{0.011(90-U)} - \frac{1.7}{(U-112)^2 + 80} + \frac{100}{(U-360)^2 + 50} \tag{III-4}$$

$$X_{arc} = A_X(u) d^2 + B_X(u) \tag{III-5}$$

$$A_X = 1,05 . 10^{-3} e^{0.075(90-U)} \tag{III-6}$$

$$B_X = \frac{3,14.U}{153} - 3 . 10^{-3} . e^{0.075(90-U)} \tag{III-7}$$

Telque:

$R_{arc}$  &  $X_{arc}$ : La résistance et la réactance d'arc .

$A_R$  ,  $\alpha$  ,  $A_X$  et  $B_X$  : sont de constantes expérimentaux qui dépendent de la tension secondaire et la distance entre les électrodes

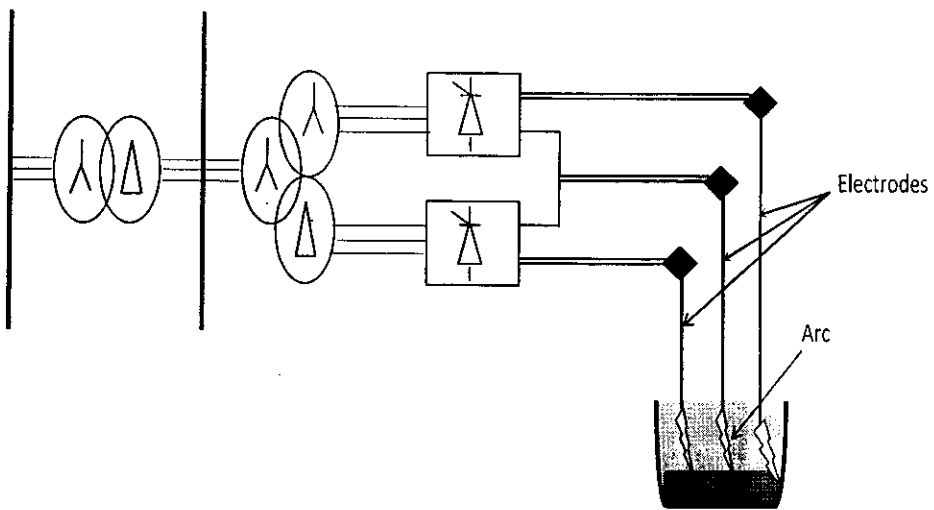


Figure III-10 Schémas triphasés du four à arc

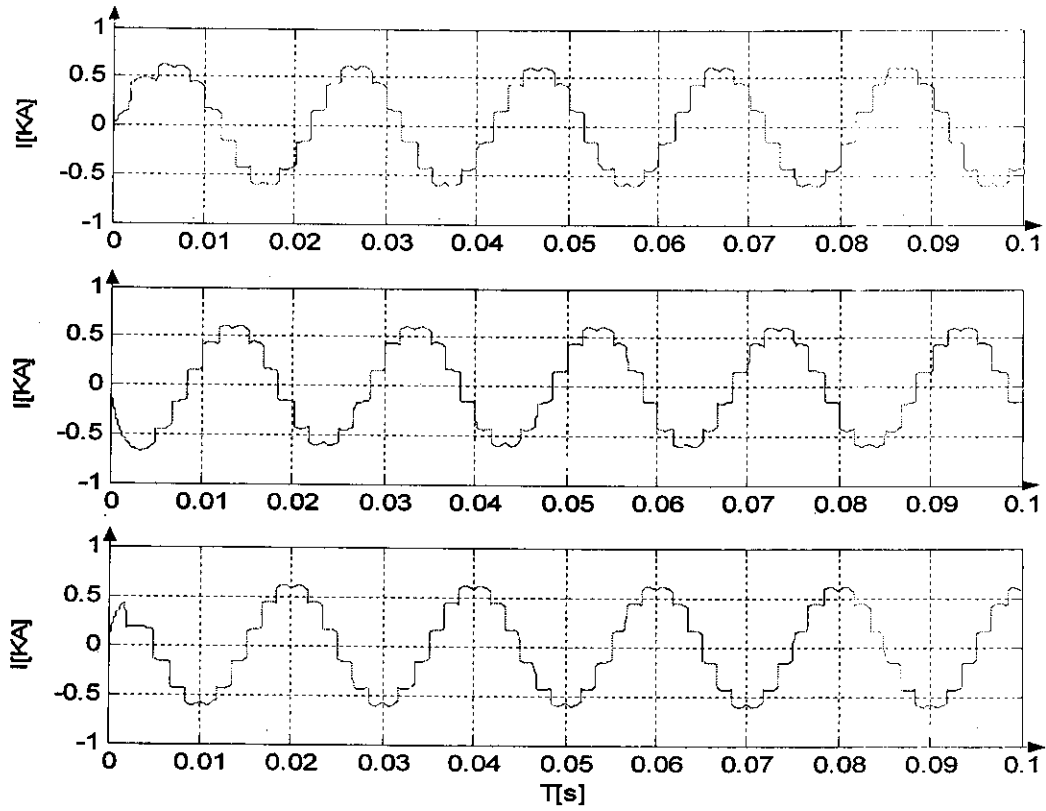


Figure III-11 Forme du courant du DC EAF

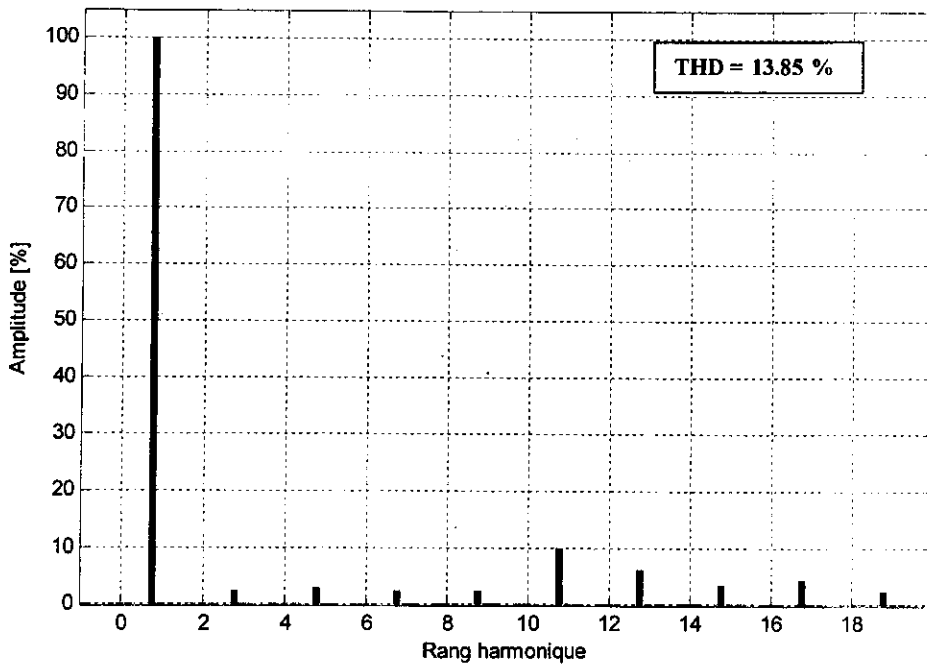


Figure III-12 Spectre de courants harmoniques d'un four à arc à courant continu alimenté par un pont redresseur dodécaphasé.



La figure III-12 donne le spectre de courants harmoniques d'un four à arc à courant continu alimenté par l'intermédiaire d'un pont redresseur dodécaphasé.

La présence de ce dernier explique la valeur élevée des harmoniques de rang 11 et 13.

Des mesures ont été effectuées, elles sont résumées dans le tableau suivant, le pourcentage de chaque harmonique.

<b>Rang(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	100	0.25	2.54	0.21	3.10	0.16	2.60	0.09	2.56	0.10
<b>Rang(h)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>/</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	9.84	0.05	6.08	0.11	3.50	0.06	4.48	0.05	2.41	/

*Tableau III-1 Valeurs des harmoniques de courant.*

### III-12- Conclusion

L'augmentation croissante en demande du fer, tel que dans l'industrie des voitures ont encouragée les aciéries à investir de plus en plus dans la récupération des métaux usés grâce aux fours électriques à arc.

Le four à arc à courant continue « DC EAF » est utilisé pour fournir des aciers de qualité d'une matière première de la chute en acier.

Compte tenu de la puissance mise en jeu et de la nature fluctuante de la charge, le four à arc est un des dispositifs les plus perturbateurs de réseau.

## Chapitre IV: Réduction des perturbations harmoniques

### IV-1- Introduction

Pour minimiser les harmoniques dans le système continu en provenance du convertisseur, plusieurs de filtrages passif et/ou actif sont utilisées.

Le but d'un filtre passif est de réduire l'amplitude d'un ou plusieurs harmoniques. La taille du filtre est définie par la puissance réactive à la fréquence fondamentale. Le critère idéal pour la conception des filtres est l'élimination de tous les effets causés par la déformation du courant mais ce critère idéal est irréalisable pratiquement.

Le critère le plus pratique exige la réduction des harmoniques à un niveau acceptable au point de couplage commun avec d'autres consommateurs, pour cela, nous nous intéressons seulement au filtrage passif par différents types [9].

### IV-2- Pourquoi c'est nécessaire de filtrer les harmoniques ?

- ✓ Dégradation de la qualité de l'énergie;
- ✓ Pertes additionnelles, surchauffe;
- ✓ Surtension récurrente;
- ✓ Mal fonctionnement et des équipements électroniques sensibles;
- ✓ Variation mécanique dans les systèmes électromécaniques;
- ✓ Déclenchement des disjoncteurs, brûler les fusibles de protection;
- ✓ Problème de résonance avec les condensateurs de compensation de la puissance réactive déjà installé.

### IV-3- Principe de compensation [30]

Les perturbations engendrées par les charges peuvent être atténuées soit :

- Avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmoniques;
- En limitant la consommation de puissance réactive;
- En modifiant la topologie du convertisseur pour limiter l'amplitude des sources de courants harmoniques;

- En augmentant la puissance de court-circuit du réseau par rapport à la puissance du générateur.

#### **IV-4- Solutions de dépollution des réseaux électriques [1]**

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche sera détaillée par la suite.

##### **IV-4-1- Solutions de dépollution traditionnelles [31]**

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

##### **IV-4-1-1- Filtrage passif [32]**

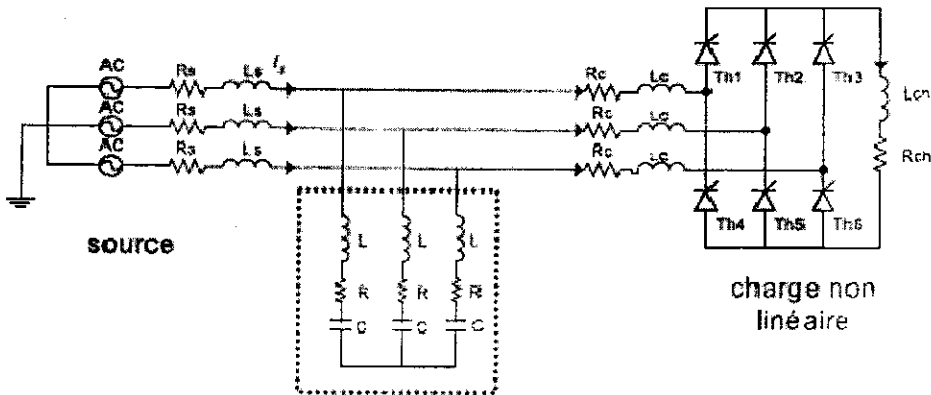
Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série LC est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passe-haut du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau

et de la nature des récepteurs. Il est en général plus aisé et moins coûteux de rejeter, par cette technique, les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

Le filtrage reste une technique délicate. En effet, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. De plus, le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées. Finalement, cette solution, dédiée à une charge et à un réseau, perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent. Notamment, les variations de la fréquence du fondamental désaccordent le filtre passif.

**IV-4-1-1-a- Filtrage passif résonnant [31, 29]**

Ils sont constitués d'un circuit RLC en série accordé sur une fréquence déterminée. Ces filtres sont très sélectifs. La figure IV-1 présente le schéma de filtre résonant.



**Figure IV-1** Filtre passif résonnant

Le filtre à une impédance  $Z_f$  donnée par:

$$Z_f = R_f + j \left( L_f \omega - \frac{1}{C_f \omega} \right) \tag{IV-1}$$

A sa fréquence de résonance, son impédance se réduit à une petite valeur soit  $R_f$ , car la réactance inductive devient égale à la réactance capacitive. Donc, on peut écrire:

$$L_f \omega_r = \frac{1}{C_f \omega_r} \tag{IV-2}$$

D'où

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L_f \cdot C_f} \quad (\text{IV-3})$$

Avec

$$\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot F_r \quad (\text{IV-4})$$

En fin, la fréquence de résonance est égale :

$$F_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_f C_f}} \quad (\text{IV-5})$$

Ainsi, la réactance inductive ou capacitive qui correspond à cette fréquence est :

$$X_r = L_f \omega_r = \frac{1}{C_f \omega_r} \quad (\text{IV-6})$$

Dans le cas d'un filtre résonnant le facteur de qualité est défini comme étant le rapport :

$$Q = \frac{X_r}{R_f} \quad (\text{IV-7})$$

Par conséquent, la capacité et l'inductance du filtre en fonction de Q sont :

$$L_f = \frac{X_r}{\omega_f} = \frac{R_f \cdot Q}{\omega_r} \quad (\text{IV-8})$$

$$C_f = \frac{1}{\omega_f \cdot X_r} = \frac{1}{\omega_r \cdot R_f \cdot Q} \quad (\text{IV-9})$$

#### IV-4-1-1-b- Filtrage passif amorti (passe Haut) [30]

Ces filtres présentent une faible impédance sur une large bande de fréquence. Ils sont beaucoup moins sélectifs et réduisent les harmoniques supérieurs au voisinage de leurs rangs d'accord. La figure IV-2 présente le schéma de filtre amorti. Ces filtres présentent des performances moins bonnes que celles des filtres résonnants. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont très limitées.

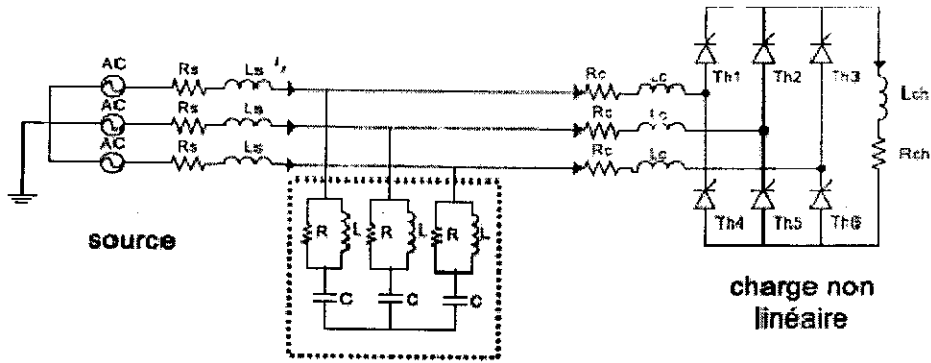


Figure IV-2 Filtre passif amorti

L'impédance du filtre est :

$$Z_f = j \frac{L_f \omega \cdot R_f}{R_f + j L_f \omega} - j \frac{1}{C_f \omega} \tag{IV-10}$$

La simplification de la relation (IV-) nous donne :

$$Z_f = j L_f \omega \cdot R_f \frac{R_f - j L_f \omega}{R_f^2 + (L_f \omega)^2} - j \frac{1}{C_f \omega} \tag{IV-11}$$

$$Z_f = \frac{R_f (L_f \omega)^2}{R_f^2 + (L_f \omega)^2} + j \left( \frac{R_f^2 L_f \omega}{R_f^2 + (L_f \omega)^2} - \frac{1}{C_f \omega} \right) \tag{IV-12}$$

En cas résonance :

$$\frac{R_f^2 L_f \omega_r}{R_f^2 + (L_f \omega_r)^2} = \frac{1}{C_f \omega_r} \tag{IV-13}$$

$$\omega_r^2 = \frac{R_f^2}{(R_f^2 L_f C_f - L_f^2)} \tag{IV-14}$$

$$2\pi f_r = \sqrt{\frac{R_f^2}{(R_f^2 L_f C_f - L_f^2)}} \tag{IV-15}$$

En fin, la fréquence d'accord est :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{R_f}{\sqrt{(R_f^2 L_f C_f - L_f^2)}} \tag{IV-16}$$

#### IV-4-1-2- Compensation de puissance réactive [33, 34]

Les méthodes le plus anciennes de compensation de puissance réactive et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance sont celles des batteries de condensateurs branchées en parallèle. Les batteries de condensateurs peuvent être réparties et associées à des inductances de façon à répondre également aux problèmes de la compensation statique (statocompensateurs, compensateur à capacités commandées, etc) qui remplacent les batteries de condensateurs, et les compensateurs tournants (machines synchrones).

Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance.

##### IV-4-1-2-a- Les batteries de condensateurs

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance de la charge et de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

##### IV-4-1-2-b- La puissance réactive d'une batterie de condensateurs

Soit un condensateur de capacité  $C$  (Farad) sous une tension sinusoïdale de valeur efficace  $V$ (V), et de fréquence  $f$ (Hz), fournit une puissance réactive :

$$q_c = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V^2 \text{ (VAR)} \quad \text{(IV-17)}$$

Les condensateurs de puissance sont groupés sous forme de batteries généralement triphasées, couplés au réseau en deux montages suivants :

- montage triangle : qui est représenté par la figure suivante.

On a  $Q_\Delta = 3 \cdot q_c$

Alors

$$Q_\Delta = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U^2 \text{ (VAR)} \quad \text{(IV-18)}$$

Avec :

$Q_{\Delta}$  : La puissance réactive du montage ( $\Delta$ ) en (VAR).

$q_c$  : La puissance réactive d'un condensateur en (VAR).

$U$  : Tension composée en (V).

$\omega$  : La pulsation de tension en (rad/s).

$C$  : La capacité d'un condensateur en (farad).

- montage étoile : qui est représenté par la figure suivante.

$$Q_Y = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot V^2 \text{ (VAR)} \quad (\text{IV-19})$$

Avec :

$Q_Y$  : La puissance réactive du montage étoile en (VAR).

$V$  : La tension simple en (V) avec  $U = \sqrt{3}V$  (V).

Donc d'après (IV-18), (IV-19) on peut déduire

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot Q_Y \text{ (VAR)} \quad (\text{IV-20})$$

De cette dernière formule (IV-20), on remarque que l'énergie réactive fournit par le montage triangle est trois fois que l'énergie réactive fourni par le montage étoile et pour ça l'utilisation du montage triangle est très vaste pour la compensation de l'énergie réactive.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

#### IV-4-1-3- Avantages du filtrage passif

- simple et fiable.
- peut être installé après la mise en exploitation.
- performances satisfaisantes, notamment pour la fréquence d'accord.



#### **IV-4-2- Solutions de dépollution modernes [35]**

Le filtre actif permet de neutraliser l'effet d'une perturbation en injectant une grandeur égale à la perturbation mais de phase opposée.

Les filtres actifs sont souvent utilisés en complément des filtres passifs décrits dans ce chapitre formant ainsi un filtrage hybride.

#### **IV-5- Simulation de la modèle étudié**

La simulation de la modèle étudié est réalisée par logiciel MATLAB/Simulink.

Le schéma de la modèle étudié est composé de trois parties;

- Le réseau d'alimentation,
- Le filtre passif parallèle,
- La charge non linéaire (le pont redresseur + DC EAF).

#### **IV-6- Bloc de simulation**

Pour réaliser cette simulation nous traduisons le modèle représenté par les équations précédentes dans le chapitre II, III et IV sous forme de structure en schéma bloc que nous présentons par la figure (IV-1)

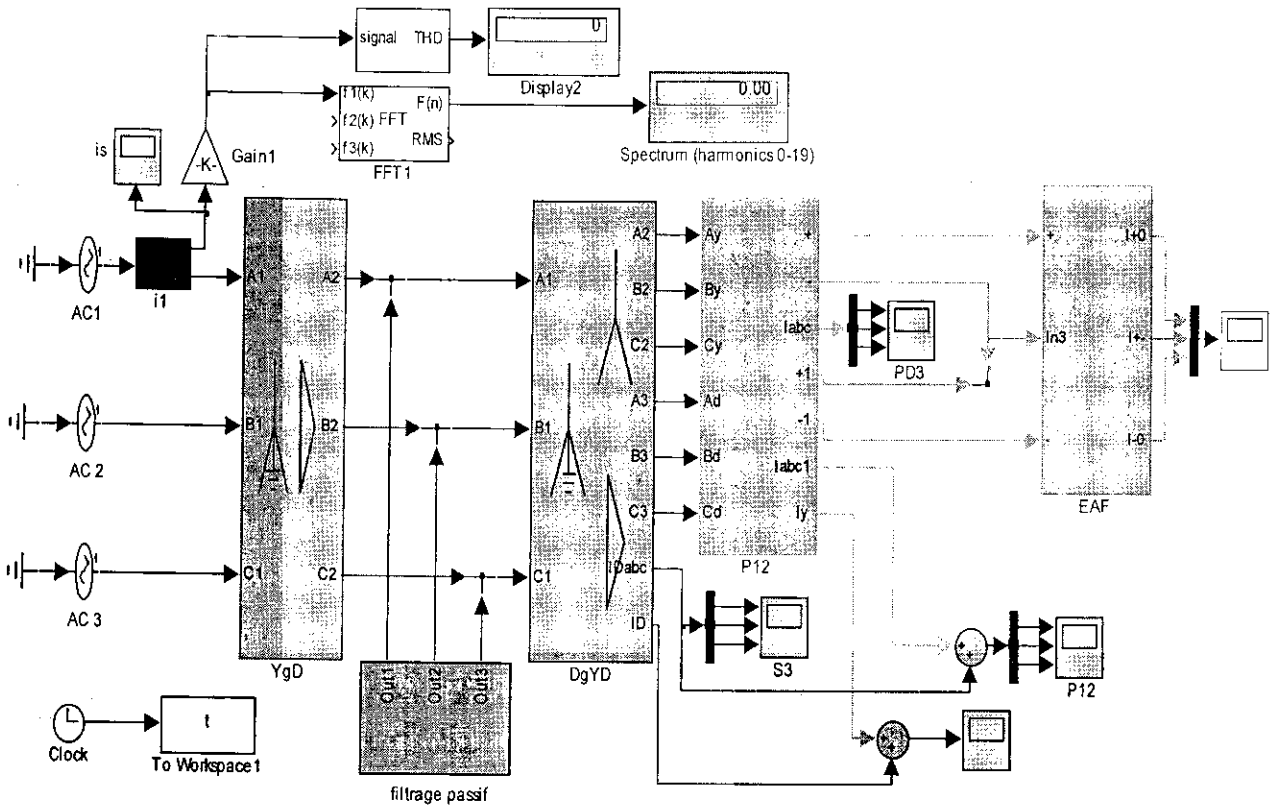


Figure IV-1 Structure en schéma bloc de DC EAF

IV-7- Résultats de simulation

Les figures suivant présentent les résultats de simulation à partir les changements du dispositif de filtre.

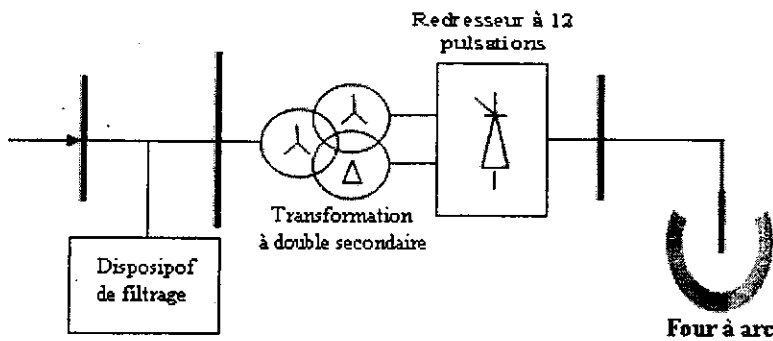


Figure IV-2 Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec filtre.

IV-7-1- Compensation On utilise une batterie après la source d'alimentation.

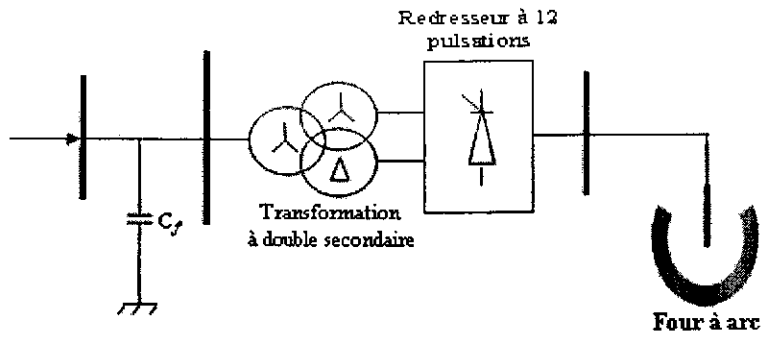


Figure IV-3 Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec batterie.

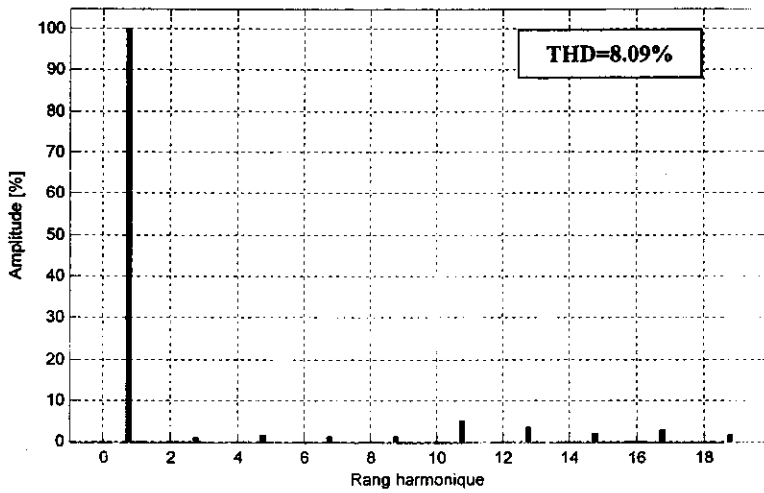


Figure IV-4 Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après la compensation

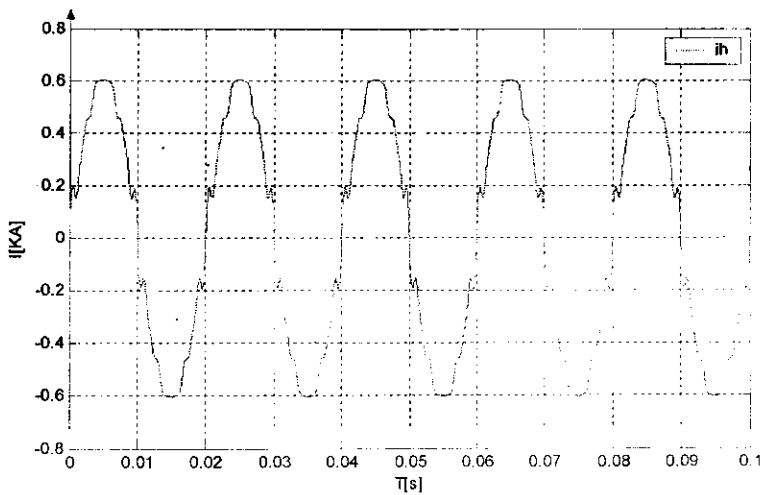


Figure IV-5 Forme du courant du DC EAF après la compensation.

Rang(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_h(\%)$	100	0.11	1.22	0.10	1.66	0.08	1.35	0.03	1.37	0.05
Rang(h)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	/
$I_h(\%)$	5.31	0.03	3.68	0.07	1.92	0.03	3.05	0.03	1.63	/

Tableau IV-1 Valeurs des harmoniques de courant après la compensation.

IV-7-2- Filtrage résonant de l'harmonique 13

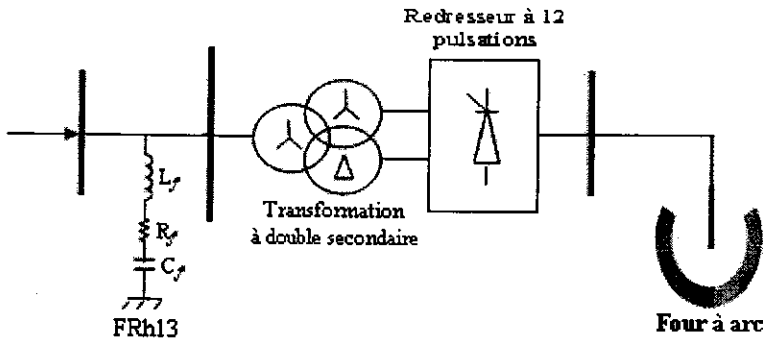


Figure IV-6 Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh13.

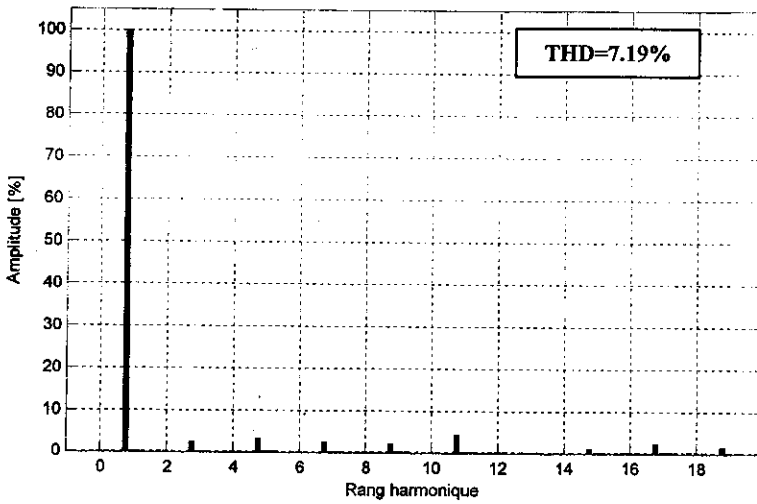


Figure IV-7 Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 13.

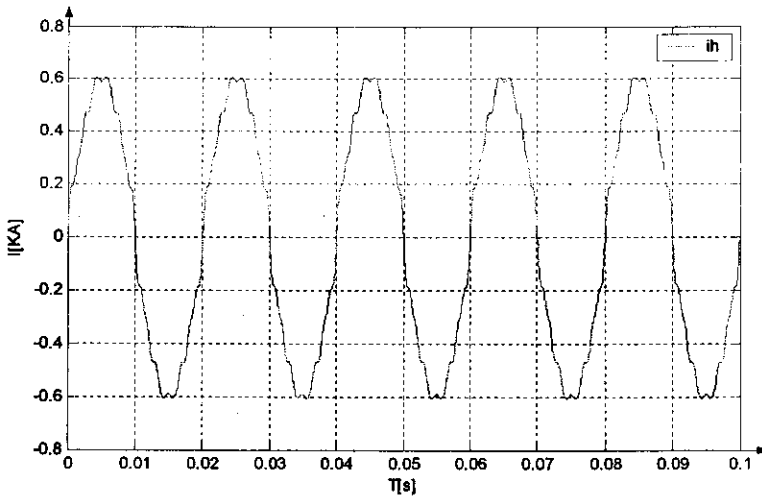


Figure IV-8 Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 13.

<b>Rang(h)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I<sub>h</sub>(%)</b>	100	0.24	2.43	0.21	3.20	0.15	2.43	0.07	2.02	0.07
<b>Rang(h)</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	/
<b>I<sub>h</sub>(%)</b>	4.19	0.01	0	0.02	0.96	0.02	2.28	0.02	1.37	/

Tableau IV-2 Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant après le filtrage résonant de l'harmonique 13.

### IV-7-3- Filtrage résonant de l'harmonique 11

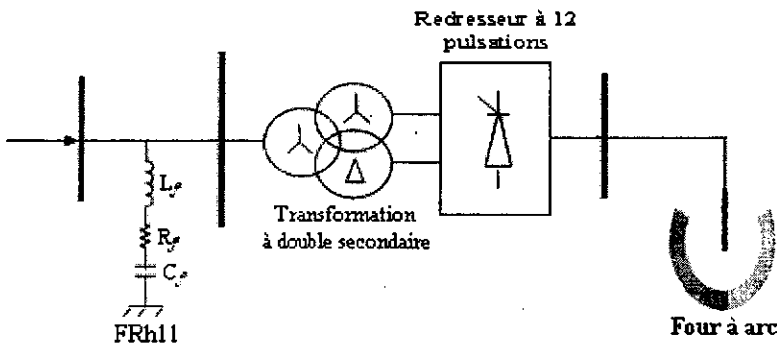


Figure IV-9 Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11.

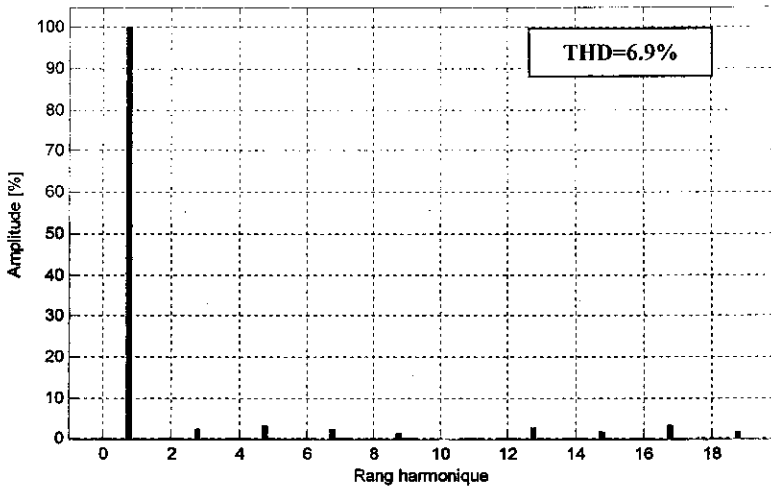


Figure IV-10 Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11.

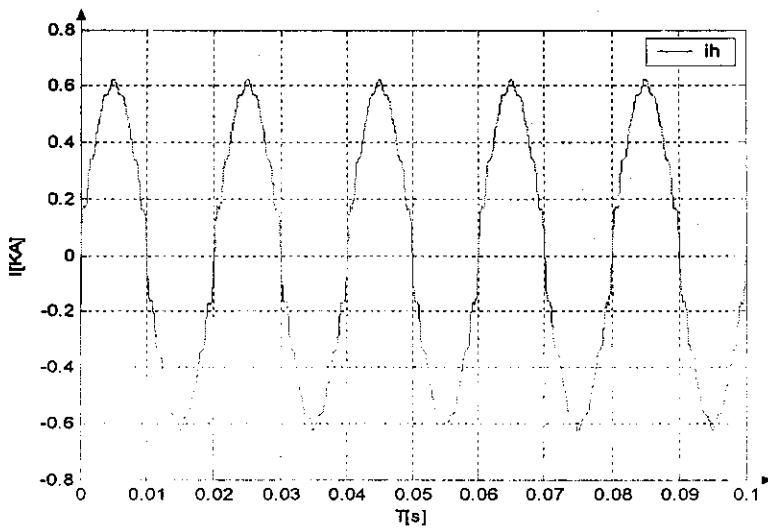


Figure IV-11 Structure en schéma bloc de DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11.

<b>Rang(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	100	0.24	2.43	0.21	3.18	0.15	2.33	0.07	1.50	0.03
<b>Rang(h)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>/</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	0	0.01	2.56	0.05	1.87	0.03	3.26	0.03	1.76	<b>/</b>

Tableau IV-3 Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 11.

IV-7-4- Filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13

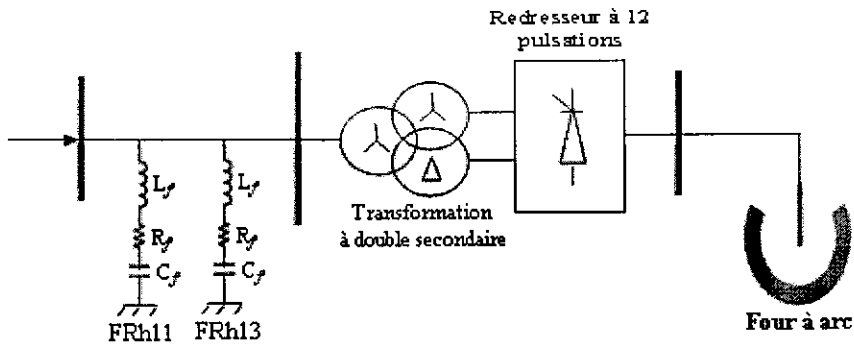


Figure IV-12 Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11 et 13.

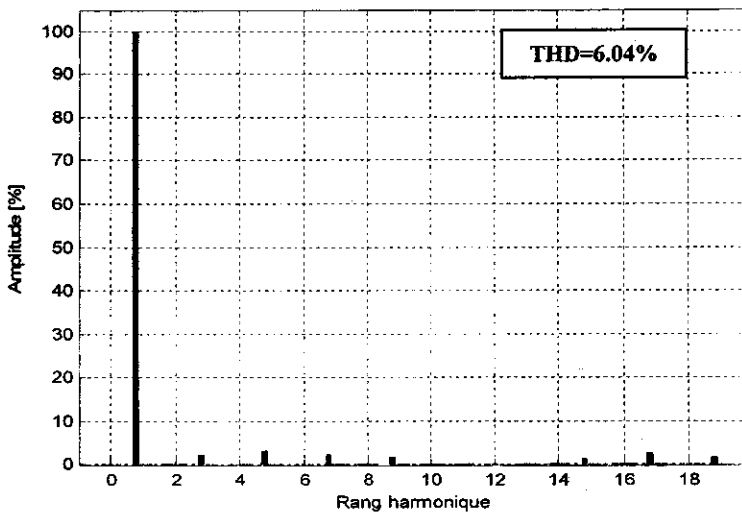


Figure IV-13 Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13.

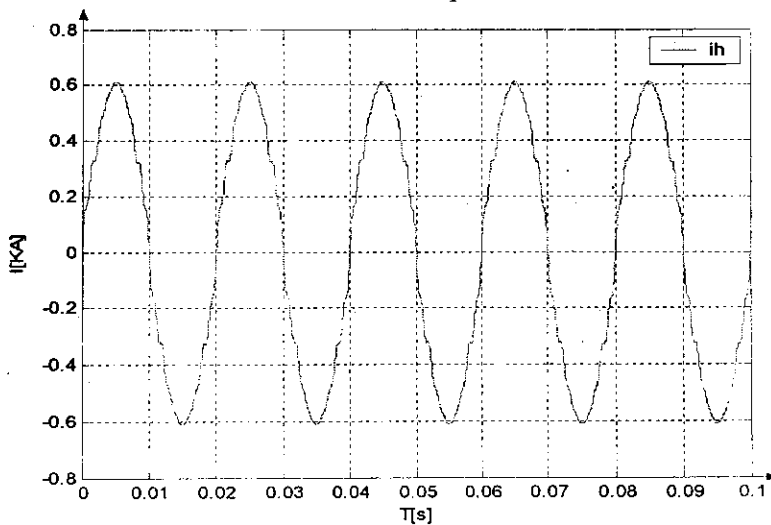
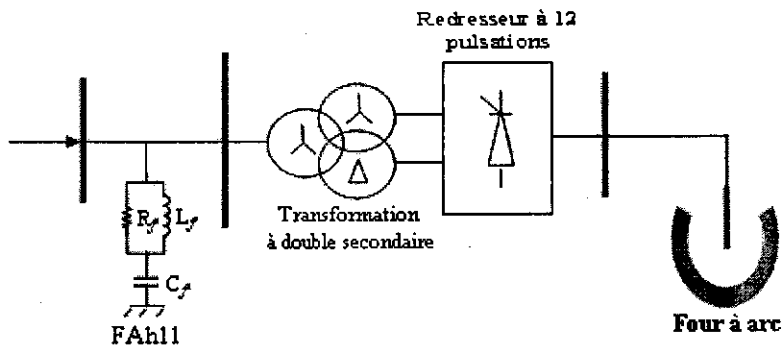


Figure IV-14 Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13.

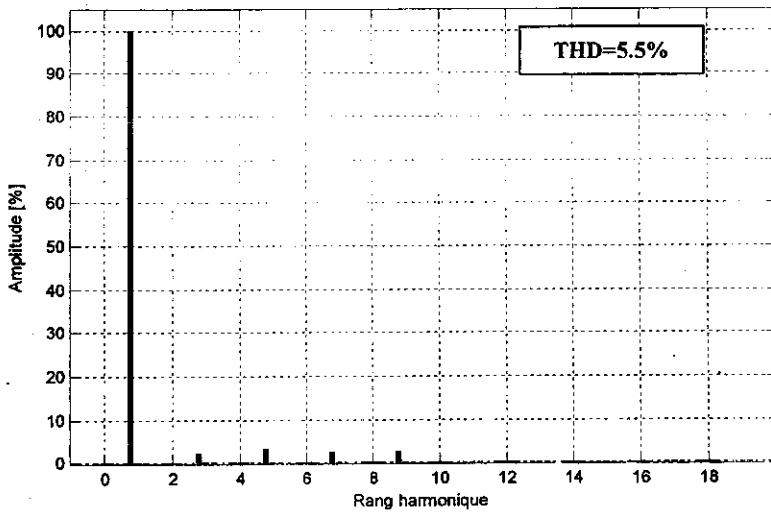
<b>Rang(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	100	0.24	2.43	0.21	3.20	0.15	2.38	0.07	1.71	0.03
<b>Rang(h)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>/</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	0	0.07	0	0.03	1.32	0.03	2.74	0.03	1.56	/

**Tableau IV-4** Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13.

**IV-7-5- Filtrage amorti de l'harmonique 11**



**Figure IV-15** Schéma monphasé du modèle de DC EAF avec FAh11.



**Figure IV-16** Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage amorti de l'harmonique 11.



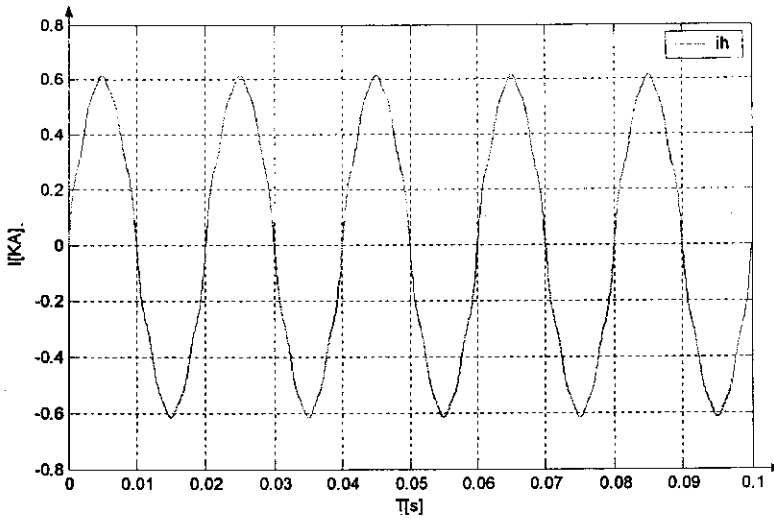


Figure IV-17 Forme du courant du DC EAF après le filtrage amorti de l'harmonique 11.

<b>Rang(h)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b><math>I_h(\%)</math></b>	100	0.24	2.45	0.21	3.26	0.16	2.61	0.08	2.61	0.10
<b>Rang(h)</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	/
<b><math>I_h(\%)</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	/

Tableau IV-5 Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage amorti de l'harmonique 11.

IV-7-6- Filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14

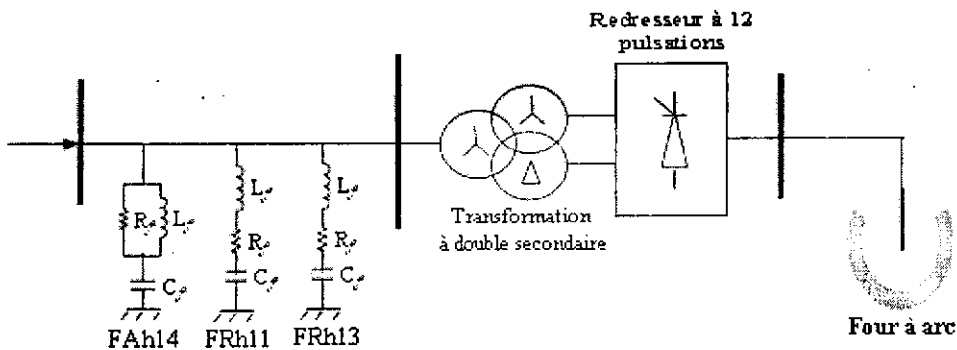


Figure IV-18 Schéma monophasé du modèle de DC EAF avec FRh11 et 13 et FAh14.

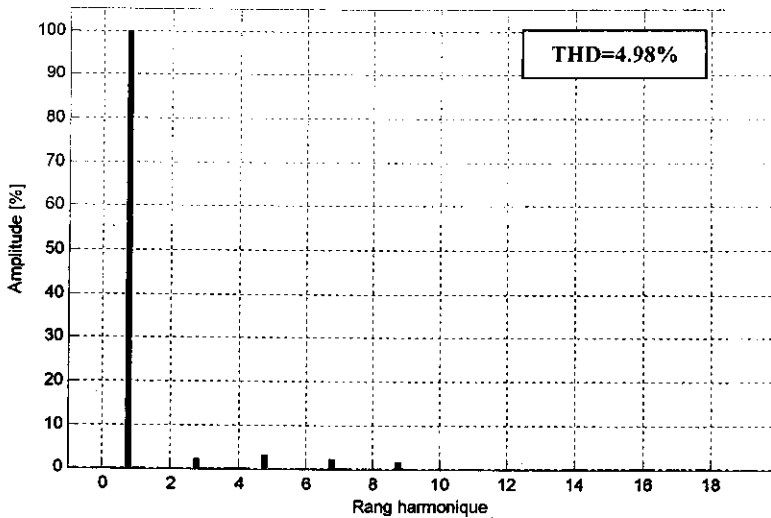


Figure IV-19 Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14.

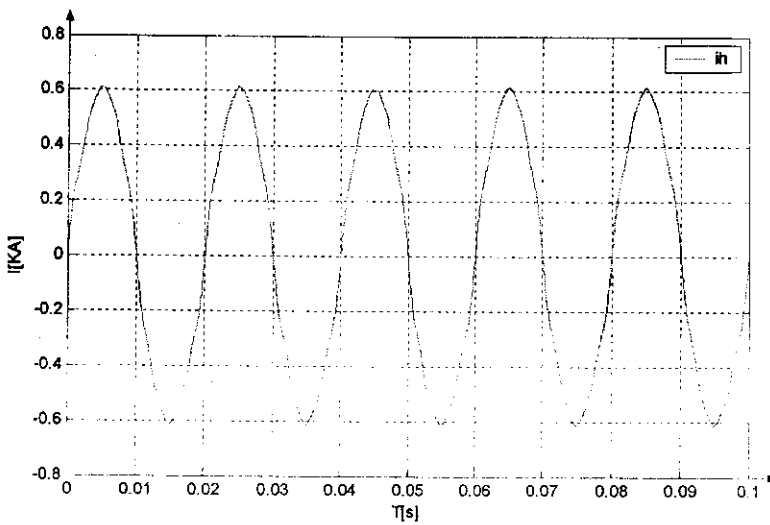


Figure IV-20 Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14.

<b>Rang(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>I<sub>h</sub>(%)</b>	100	0.24	2.43	0.21	3.20	0.15	2.38	0.07	1.71	0.03
<b>Rang(h)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>/</b>
<b>I<sub>h</sub>(%)</b>	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	/

Tableau IV-6 Valeurs des harmoniques de courant d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 14.

**IV-7-7- Filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11**

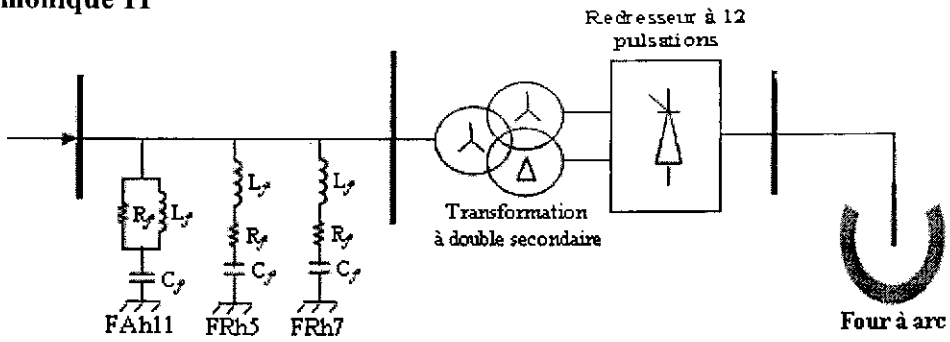


Figure IV-21 Schéma monphasé du modèle de DC EAF avec FRh5 et 7 et FAh11.

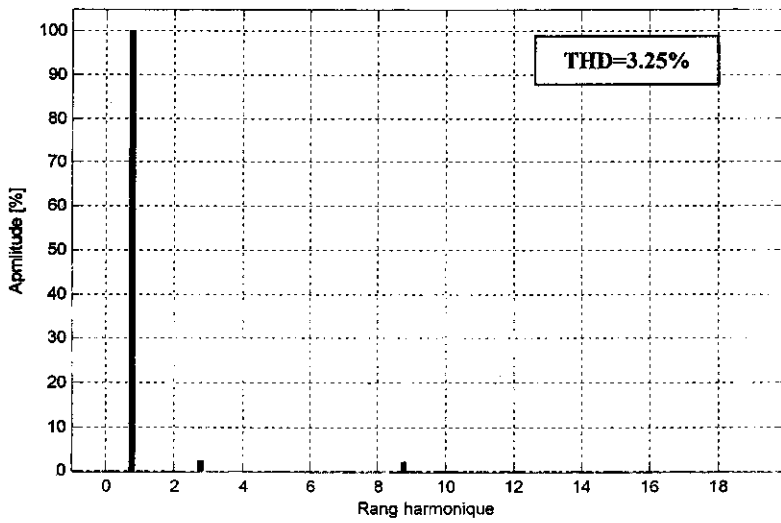


Figure IV-22 Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11.

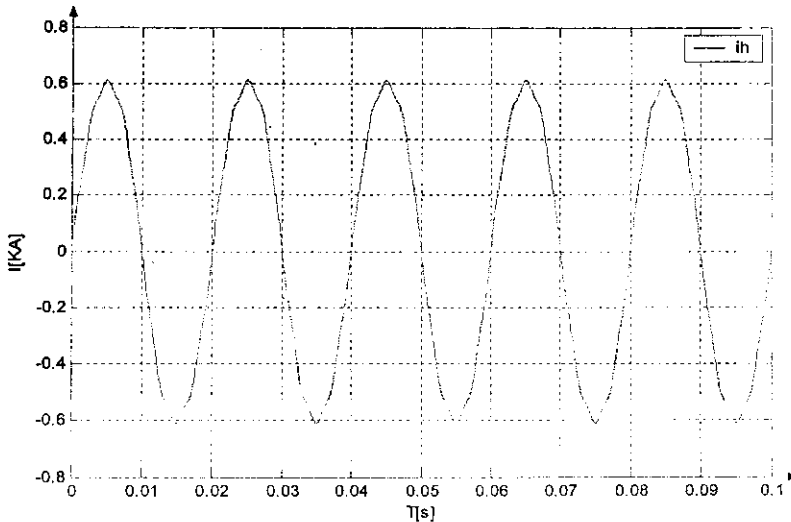
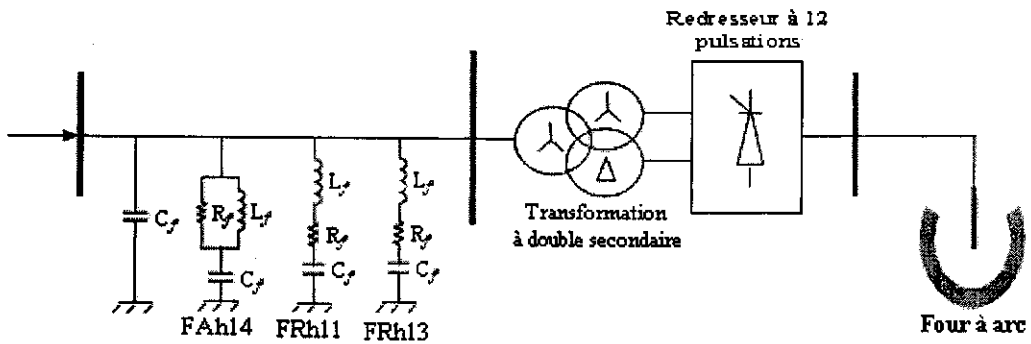


Figure IV-23 Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11.

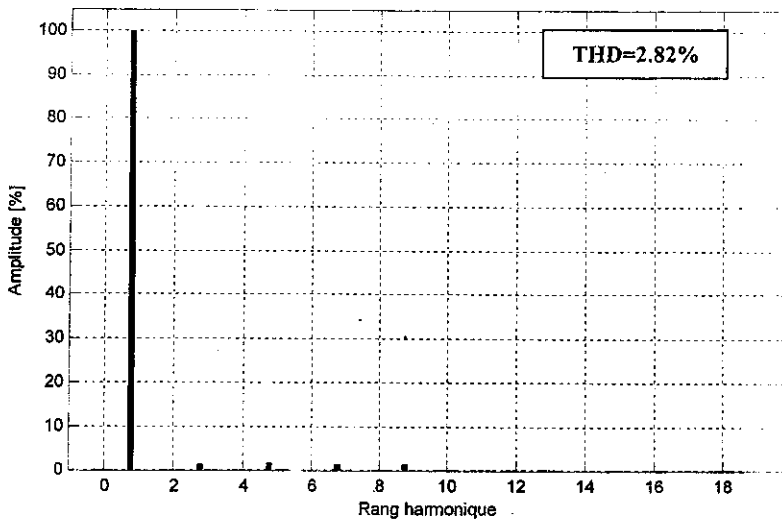
<b>Rang(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	100	0.24	2.41	0.18	0	0.05	0	0.05	2.17	0.08
<b>Rang(h)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>/</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	/

**Tableau IV-7** Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 5 et 7 avec filtrage amorti à partir de l'harmonique 11.

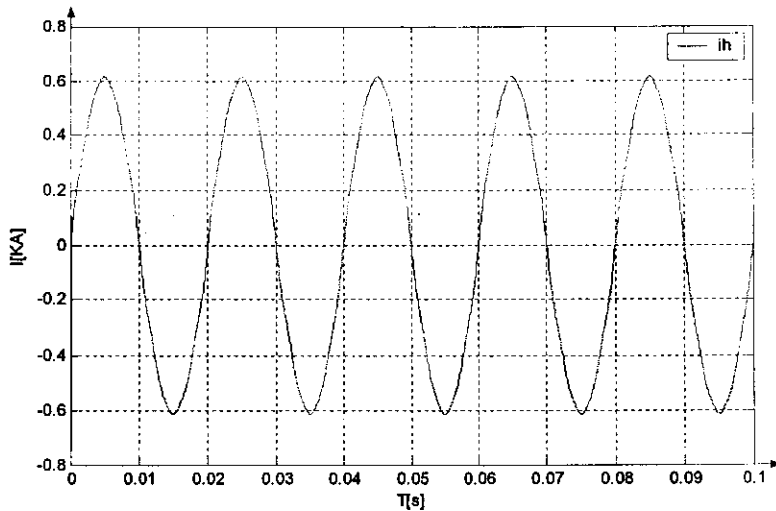
**IV-7-8- Filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti**



**Figure IV-24** Schéma monphasé du modèle de DC EAF avec FRh11 et 13 avec batterie et FAh14.



**Figure IV-25** Spectre de courants harmoniques d'un DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti.



**Figure IV-26** Forme du courant du DC EAF après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti.

<b>Rang(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	100	0.11	1.22	0.10	1.66	0.08	1.35	0.03	1.37	0.05
<b>Rang(h)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>/</b>
<b><math>I_h(\%)</math></b>	0	0.0003	0	0	0	0	0	0	0	/

**Tableau IV-8** Valeurs des harmoniques de courant après le filtrage résonant de l'harmonique 11 et 13 avec batterie et filtrage amorti.

#### IV-8- Analyses et commentaires

- *Le régime harmonique* est un régime indésirable et a des effets néfastes pour les récepteurs et les appareils électriques, ce régime caractérisé par l'apparition des harmoniques qui sont des tensions et des courants sinusoïdaux dont les fréquences correspondent à des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 Hz).

On constate que la distorsion harmonique de courant est très importante pendant la période de fusion « fonctionnement du foue à arc » est égale à 13,85 %.

- *Le régime de compensation* est un régime qui sert essentiellement pour l'amélioration du facteur de puissance « qualité d'énergie », mais il a un autre rôle intéressant c'est la réduction des harmoniques (tous les rangs), le THD obtenu est égale à 8.09 %.

- *Le filtrage d'harmonique spécifique* consiste à mettre un filtre passif, dont chaque fréquence d'accord correspond à la fréquence d'un courant perturbatrice à éliminer. dans notre travail on trouve des bons résultats avec l'implantation du filtre du rang 11

puisque l'harmonique 11 est la plus importante par rapport aux autres harmoniques, et donne un THD égale à 6.9 %. Dans l'implantation du filtre du rang 13, le THD est égale à 7.19 %.

- *le filtrage multiple d'harmonique* consiste a installer plus d'un filtre accordées , sur les rangs 11 et 13 et nous donnent des résultats mieux, le THD est égale à 6.04 %.

- *Le filtrage d'harmonique amorti* consiste à mettre un filtre passe haut, qui reduire les harmoniques supérieurs et voisinage de leurs rangs d'accord. Le resultat obtenu avec l'implantation du filtre du rang 11 est THD égale à 5.5 %.

- *Le filtrage d'harmonique mixte* consiste a installer plus d'un filtre accordé, soit « amorti + résonnant multiple », le premeire cas, on limite le nombre des filtre résonnant par deux 11 et 13. le THD est égale à 4.98 %. Le deuxième cas, on utilise deux filtre résonnants (5 et 7) avec un filtre amorti à partire du rang 11 done un THD égale à 3.75%. dans le dernière cas on utilise la somme des condansateur et des filtre résonnant 11 et 13 et un filtre amrti, le cas nous donne mielleure résultats par rapport aux autre cas, le THD est égale à 2.82 %.

#### IV-9- conclusion

On conclu d'après ce chapitre que :

- L'utilisation de La compensation joue un rôle très important c'est la réduction des harmoniques (tous les rangs) : « attention la résonance »
- Le filtrage d'harmonique spécifique « résonnant » donne des résultats mieux que de la compensation, mais sa conception nécessite une étude préalable.
- Le filtrage multiple d'harmonique offre des meilleurs résultats, puisque plus d'un harmonique est éliminé, mais la conception sur le réseau nécessite une étude poussée et précise.
- La combinaison du filtrage résonant et amorti avec la compensation représente la meilleure solution puisque elle donne un faible THD (minimum d'harmonique).