

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire d'El-Oued

Institut de Sciences Technologies

Département de Génie Électrique



Mémoire de fin d'Etude en vue de l'Obtention du Diplôme de :

Master Académique en Génie Électrique

Option : Réseaux Electriques

THEME

***Analyse et Traitement de la Qualité
d'Energie Electrique , en Utilisant
des Dispositifs de Contrôle des
Réseaux Electriques D-STATCOM
avec un Four à Arc***

Proposé et dirigé par :

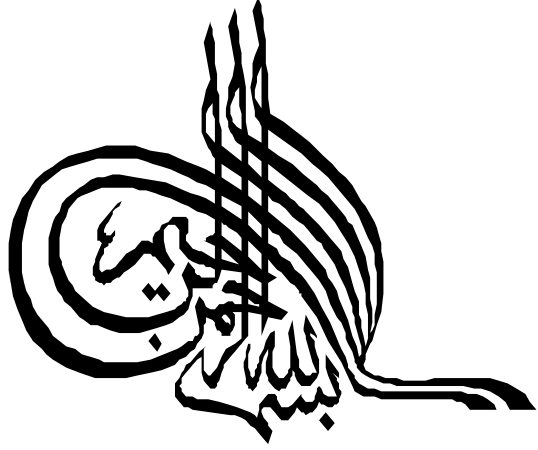
Dr .Y.DJEGHADER

Présenté par :

Laouamer Mosbah

Difallah Amer

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2011/2012



(وقل ربي زدني علما)

من سورة طه الآية (114)

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale : **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre un Les perturbations dans les Réseaux électriques: **Error! Bookmark not defined.**

I. Introduction : **Error! Bookmark not defined.**

II. Caractéristiques des perturbations électriques : **Error! Bookmark not defined.**

III. Fréquence : **Error! Bookmark not defined.**

IV. Amplitude : **Error! Bookmark not defined.**

IV.1. Creux de tension et coupures brèves : **Error! Bookmark not defined.**

IV.2. Conséquences des creux de tension et coupure : **Error! Bookmark not defined.**

V. Fluctuations de tension – Flicker : **Error! Bookmark not defined.**

V.1. Définition de fluctuation de tension : **Error! Bookmark not defined.**

V.2. Conséquences des Variations et fluctuations de tension : **Error! Bookmark not defined.**

VI. Forme d'onde : **Error! Bookmark not defined.**

VI.1. Harmonique : **Error! Bookmark not defined.**

VI.1.1. Origines des harmoniques : **Error! Bookmark not defined.**

VI.1.2. La décomposition des harmoniques : **Error! Bookmark not defined.**

VI.2. Décomposition d'un signal déformé : **Error! Bookmark not defined.**

VI.3. Taux de Distorsion Harmonique global : **Error! Bookmark not defined.**

VI.4. Le facteur de puissance : **Error! Bookmark not defined.**

VII. Les surtensions : **Error! Bookmark not defined.**

VII.1. Origine des Surtension : **Error! Bookmark not defined.**

VII.2. Conséquences des Surtensions : **Error! Bookmark not defined.**

VIII. Déséquilibre « Non Symétrie » : **Error! Bookmark not defined.**

VIII.1. Définition non symétrie : **Error! Bookmark not defined.**

VIII.2. Conséquences du non symétrie : **Error! Bookmark not defined.**

IX. La solution pour chaque perturbation et l'origine et la conséquence : **Error! Bookmark not defined.**

X. Conclusion : **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre deux Technologies fours à arc :	Error! Bookmark not defined.
I .Introduction :	Error! Bookmark not defined.
II. Définition :	Error! Bookmark not defined.
III .Arc électrique :	Error! Bookmark not defined.
III.1.Naissance de l'arc :	Error! Bookmark not defined.
III.2.Conditions d'établissement :	Error! Bookmark not defined.
IV . Présentation générale du four à arc :	Error! Bookmark not defined.
V. Principe de fonctionnement :	Error! Bookmark not defined.
VI. Utilisation des fours à arc :	Error! Bookmark not defined.
VI .1. Fabrication de l'acier :	Error! Bookmark not defined.
VI.1.1. Par la filière fonte :	Error! Bookmark not defined.
VI.1.2.Par la filière ferraille :	Error! Bookmark not defined.
VII. Conditions de fonctionnement d'un four à arc :	Error! Bookmark not defined.
VII.1. Amorçage :	Error! Bookmark not defined.
VII.2. Au début et en cours de fusion :	Error! Bookmark not defined.
VII.3. Achèvement de la fusion :	Error! Bookmark not defined.
VII.4. Affinage :	Error! Bookmark not defined.
VIII. Principe de la régulation :	Error! Bookmark not defined.
VIII. Classification des fours à arc :	Error! Bookmark not defined.
VIII.1. Four à arc d'après leur nature d'arc :	Error! Bookmark not defined.
VIII.1.1. Four à arc libre :	Error! Bookmark not defined.
VIII.1.2. Four à arc sur résistance :	Error! Bookmark not defined.
VIII.1.3. Four à arc sur charge :	Error! Bookmark not defined.
VIII.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation :	Error! Bookmark not defined.
VIII.2.1. Four alimenté en courant alternatif :	Error! Bookmark not defined.
VIII.2.2. Four alimenté en courant continu :	Error! Bookmark not defined.
IX-Caractéristique Tension - Courant [V- I] du four à arc :	Error! Bookmark not defined.
X. Avantages et inconvénients du four à arc	Error! Bookmark not defined.
X.1. Avantages :	Error! Bookmark not defined.
X.2. Inconvénients :	Error! Bookmark not defined.
XI. Conclusion :	Error! Bookmark not defined.

Chapitre Trois Etude et Modélisation du D-STATCOM :Error! Bookmark not defined.

I. Introduction :**Error! Bookmark not defined.**

II. Systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) :**Error! Bookmark not defined.**

II.1. Définitions et généralités :**Error! Bookmark not defined.**

II.2. Rôle des dispositifs FACTS :**Error! Bookmark not defined.**

III. Types des dispositifs FACTS :**Error! Bookmark not defined.**

III.1. Les systèmes de compensation shunt :**Error! Bookmark not defined.**

III.1.1. Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) :**Error! Bookmark not defined.**

III.1.2. Compensateur statique (STATCOM) :**Error! Bookmark not defined.**

III.2. Les systèmes de compensation série :**Error! Bookmark not defined.**

III.2.1. Capacités série commandées par thyristor (TCSC) :**Error! Bookmark not defined.**

III.2.2. Compensateur Série Statique Synchrone (SSSC) :**Error! Bookmark not defined.**

III.2.3. Régulateur de déphasage commandé par thyristor (TCPAR) :**Error! Bookmark not defined.**

III.3. Les systèmes de compensation hybrides Série-Parallèle :**Error! Bookmark not defined.**

III.3.1. Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC) :**Error! Bookmark not defined.**

IV. Applications et avantages des FACTS :**Error! Bookmark not defined.**

V. D-STATCOM :**Error! Bookmark not defined.**

V.1. Hypothèse simplificatrices :**Error! Bookmark not defined.**

V.2. Modélisation de D-STATCOM :**Error! Bookmark not defined.**

V.2. 1. Modèle Mathématique Simplifié :**Error! Bookmark not defined.**

V.2.2. Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC :**Error! Bookmark not defined.**

V.3. Contrôle du D-STATCOM :**Error! Bookmark not defined.**

V.3.1. Détermination des Références :**Error! Bookmark not defined.**

V.3.2. Régulateur PI avec compensation de pôles :**Error! Bookmark not defined.**

V.3.3. Régulation de la tension continue U_{dc} :**Error! Bookmark not defined.**

VI. Conclusion :**Error! Bookmark not defined.**

Chapitre Quatre Applications et Simulation :	Error! Bookmark not defined.
I. Introduction :	Error! Bookmark not defined.
II. Présentation du travail :	Error! Bookmark not defined.
III. Modélisation du système étudié :	Error! Bookmark not defined.
III.1. Modélisation du four :	Error! Bookmark not defined.
III.2. Modélisation du D-STATCOM:	Error! Bookmark not defined.
III.2.1. Test de fonctionnement du D-STATCOM :	Error! Bookmark not defined.
III.2.2. Commentaires :	Error! Bookmark not defined.
III.3. Modélisation Four /D-STATCOM :	Error! Bookmark not defined.
V. Résultats de simulation :	Error! Bookmark not defined.
V.1. Simulation sans D-STATCOM :	Error! Bookmark not defined.
IV.2. Analyse des résultats de simulations :	Error! Bookmark not defined.
IV.3. Simulation Avec D-STATCOM :	Error! Bookmark not defined.
IV.4. Commentaires et discussions :	Error! Bookmark not defined.
V. Conclusion :	Error! Bookmark not defined.
Conclusion Générale :	Error! Bookmark not defined.
L'annexe	
Les références bibliographiques	



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :



- ★ *Ma mère qui était la source inépuisable de tendresse et qui m'a offert le soutien morale afin de réussir à mes études.*
- ★ *À mon père.*
- ★ *Mes frères et mes sœurs*
- ★ *À toute ma famille.*
- ★ *À mes amis et mes collègues.*
- ★ *À toute la promotion de Génie Electrique.*

AMER

DEDICACES



Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la
durée de mes études.*

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Mosbah



Remerciement

Nous Tenons à remercier avant tout Dieu tout puissant qui nous a donné la volonté, la force et la patience pour élaborer notre travail.

Nos vifs remerciements particulièrement à notre encadreur
Dr : Djeghader Yacine, *pour son aide précieuse, ses*
conseils constructifs et ses orientations bénéfiques et objectives et
surtout sa confiance durant les moments d'efforts pour la réalisation de
notre projet.

Nos exprimons notre profonde reconnaissance et gratitude à :
Dr : Ben Attous Djilani *pour son encouragement pendant la*
période du projet malgré toutes les difficultés.

Nous remercions également tous les enseignants de
l'électrotechnique en particulier :
Monsieur ZELLOMA laid

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de
juger ce travail et d'y apporter leur coùtions.

Liste des abréviations

<u>MATLAB</u>	MAT rix LAB oratory: Logiciel distingue principalement au calcul scientifique à la modulation et à la Simulation.
<u>FAE:</u>	Four à A rc E lec r ique
<u>AC:</u>	A lternative C ourant
<u>DC:</u>	D irect C ourant
<u>EAF :</u>	E lectric A rc F urnace
<u>THD :</u>	Le t aux de d istorsion h armonique
<u>HT :</u>	L' H aute T ension
<u>MT :</u>	Le M oyen T ension
<u>BT :</u>	La B ase T ension
<u>VTHD :</u>	Le taux de distorsion harmonique de la tension
<u>ITHD :</u>	Le taux de distorsion harmonique de la tension
<u>FACT :</u>	F lexible A lternating C urrent T ransmission S ystems
<u>SVC :</u>	S tatic V ar C ompensator
<u>TCSC :</u>	T hystor C ontrolled S eries C apacitor
<u>STATCOM :</u>	STAT ic COM pensator
<u>TCPAR :</u>	T hystor C ontrolled P hase A ngle R egulator
<u>SSSC :</u>	S tatic S ynchronous S eries C ompensator
<u>UPFC :</u>	U nified P ower F low C ontroller
<u>PCC :</u>	P oint of C ommon C oupling
<u>D-STATCOM :</u>	D istrebition - STAT ic COM pensator
<u>PI :</u>	P roportionnel I ntégral (régulateur)

Liste des symboles

Variables

d (indice):	La composante sur l'axe d du repéré (d-q)
q (indice):	La composante sur l'axe q du repéré (d-q)
Pu (indice):	La grandeur en unité relative
g,r (indice):	Grandeur réduite
Vs	Tension au point de départ (le générateur)
Vr	Tension au point de départ (le récepteur)
Vsed	La composante directe de la tension générée par le compensateur série
Vseq	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur série
Vsh	Tension générée par composante shunt
Vshd	La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt
Vshq	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt
V_{DC}	Tension continue aux bornes du condensateur
Is	Courant dans une phase dans le premier tronçon de la ligne
I_{sd}	La composante du courant Is selon l'axe d
I_{sq}	La composante du courant Is selon l'axe q
Ir	Courant dans une phase dans le deuxième tronçon de la ligne
I_{rd}	La composante du courant Ir selon l'axe d
I_{rq}	La composante du courant Ir selon l'axe q
Ish	Courant fournit par le compensateur shunt
Ishd	La composante direct du Courant fournit par le compensateur shunt
Ishq	La composante quadrature du Courant fournit par le compensateur shunt
I_{DC}	Courant dans le circuit continu

I_{sh-DC}	Courant dans le circuit continu qui fournit par le compensateur shunt
P_s	Puissance active fournit par le générateur
P_{sh}	Puissance active fournit par le compensateur shunt
Q_s	Puissance réactive fournit par le générateur
P_r	Puissance active au point d'arrivée (le récepteur)
Q_r	Puissance réactive au point d'arrivée (le récepteur)
ST	Puissance apparente par le transformateur
E_o	Tension Installe par le charge variable g(t)
i_o	Courant Installe par le charge variable g(t)
P_o	Puissance active Installe par le charge variable g(t)
m	Rapporte du transformateur
K_i , K_p	Coefficient de régulation D-STATCOM
f	La fréquence
w	La pulsation de tension en (rad/s).
h	Rang d'harmonique
δ	L'angle de charge
φ	Le déphasage de la P et Q
θ_o	Le déphasage Installe par le charge variable g(t)

Paramètres

R_s	La résistance de générateur
L_s	L'inductance de générateur
R_l	La résistance de EAF
L_l	L' inductance de EAF
R₁,R₂	La résistance de la ligne
L₁,L₂	L'inductance de la ligne
L	Large de la linge
R_T	La résistance de transformateur
L_T	L'inductance de transformateur
M_{ij}	L'inductance mutule de EAF
g(t)	Charge variable
g_{min}	L'inductance minimale de charge variable

Liste des Figures

Chapitre Un

Figure I-1	Exemple de fluctuation de la fréquence	5
Figure I-2	Les creux de tension	6
Figure I-3	Variations rapides de tension	7
Figure I-4	Onde déformée	9
Figure I-5	La tension d'alimentation et le courant absorbé (charge non linéaire)	10
Figure I-6	Représentation spectral d'un signal périodique	10
Figure I-7	Décomposition d'un signal périodique 50 Hz.	11
Figure I-8	Diagramme de Fresnel des puissances	14
Figure I-9	Exemple de cas de surtensions transitoires	15
Figure I-10	Déséquilibre de tension	17

Chapitre Deux

Figure II-1	Vue extérieure d'un four à courant alternatif	22
Figure II-2	Schéma de principe du four à arc	23
Figure II-3	L'acier par la filière fonte	24
Figure II-4	L'acier par la filière électrique	25
Figure II-5	Puissance absorbée par le four	28
Figure II-6	Schémas électrique d'un four à arc à courant alternatif	31
Figure II-7	Schémas électrique d'un four à arc à courant continu	33
Figure II-8	caractéristique tension – courant de EAF	33

Chapitre Trois

Figure III-1	Schéma type du SVC en connexion shunt	40
Figure III-2	Schéma représentatif du SVS (solid-stat switching-converter based)	41
Figure III-3	Schéma: (a) STATCOM. (b) caractéristiques tension / courant du STATCOM.	42
Figure III-4	Schéma d'un TCSC multi gradins pour une compensation série.	43
Figure III-5	Compensation série statique synchrone	44
Figure III-6	Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR	44
Figure III-7	Contrôleur de transit puissance unifié	46
Figure III-8	Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux	46
Figure III-9	D- STATCOM Schéma équivalent	49
Figure III-10	Passage du repère vers le repère d, q	50
Figure III-11	Schéma équivalent du D-STATCOM avec Circuit DC	51
Figure III-12	Identification des Courants de Référence	53
Figure III-13	Schéma bloc de la régulation PI des courants du D-STATCOM	54
Figure III-14	Schéma bloc de régulation de la tension continue	55
Figure III-15	Schéma bloc de contrôleur D-statcom	56

Chapitre Quatre

Figure IV-1	Bloc de simulation du réseau et four	58
Figure IV-2	Circuit équivalent non linéaire	59
Figure IV-3	Schémas bloc du modèle du four.	60
Figure IV-4	Circuit équivalent D-STATCOM	61
Figure IV-5	Bloc de simulation D-STATCOM	61
Figure IV-6	Courant et tension monophasé générée par D-STATCOM	62
Figure IV-7	Forme d'onde de la tension inverse	63

Figure IV-8	Puissance active et réactive	63
Figure IV-9	Tension continue Vdc	63
Figure IV-10	La Caractéristique Statique De Convertisseur	64
Figure IV-11	Schémas électrique équivalent D-STATCOM / EAF	64
Figure IV-12	Schémas Bloc de simulation D-STATCOM / EAF	65
Figure IV-13	L'allure de tension V_a sons D-SATATCOM	66
Figure IV-14	Creux de la tension	66
Figure IV-15	Fluctuation detension (flicker)	67
Figure IV-16	Surtension transitoire	68
Figure IV-17	L'allure des trois tensions V_a, V_b et V_c	68
Figure IV-18	L'allure des trois tensions (rms) V_a, V_b et V_c sons D-SATATCOM	69
Figure IV-19	L'allure de courant en étape de fusion	69
Figure IV-20	Spectre d'harmonique du four en étape de fusion	70
Figure IV-21	Les allures instantanés des courants i_a, i_b et i_c	70
Figure IV-22	Déphasage entre la tension et le courant	71
Figure IV-23	L'allure de tension V_a avec D-SATATCOM	72
Figure IV-24	Les allures des trois tensions	72
Figure IV-25	Phénomène fluctuation de tension	73
Figure IV-26	L'allure des trois tensions (rms) V_a, V_b et V_c avec D-SATATCOM	73
Figure IV-27	L'allure du courant i_a avec D-SATATCOM	74
Figure IV-28	L'allure des trois courants	74
Figure IV-29	Spectre d'harmonique du four avec D-STATCOM	75
Figure IV-30	Déphasage entre la tension et le courant « $\varphi = 5^\circ$ »	75

Liste des Tableaux

Tableau I-1	Résumé des conséquences néfastes causées par le creux de tension	7
Tableau I-2	Les principaux effets des harmoniques	12
Tableau I-3	Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives	18
Tableau III-1	Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau	47
Tableau IV-1	Les paramètres des réseaux étudiés	58
Tableau IV-2	Les paramètres de D-STATCOM	62
Tableau IV-3	Harmoniques générées par le four à arc	70
Tableau IV-4	Harmoniques générées par le four à arc avec D-STATCOM	75

Introduction Générale

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- Des impératifs économiques : les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.
- La généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations : du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées) on constate le développement et la généralisation des équipements d'électronique de puissance. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de tension, et générateurs de perturbations.
- L'ouverture du marché de l'électricité : la libéralisation du marché de l'électricité fait que la qualité de l'énergie électrique est devenue un des critères de choix d'un fournisseur d'énergie plutôt qu'un autre de la part des consommateurs. Les fournisseurs se doivent donc de fournir à leurs clients une énergie avec une qualité maximale [1].

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive [2].

En plus que les systèmes d'électronique de puissance on rencontre dans l'industrie les fours à arc qui représentent des récepteurs électriques spécifiques avec une charge continue cyclique, caractérisée par la succession des fusions, avec l'arrêt pour vidanger le métal liquide, pour enfourner et le chargement. Pendant le fonctionnement, le four à arc 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.

Cependant le four à arc est un grand pollueur du réseau électrique, en terme d'harmoniques et surtout de flicker [28].

Les éléments proposés qui permettent de contrôler et améliorer des systèmes sont les dispositifs FACTS .Ces dispositifs font en général appel à de l'électronique de puissance, ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils Limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de "équipement, et stabilisent le comportement du réseau [39].

Sur la base de ce constat, l'objectif de ce travail est de utiliser les performances de ces dispositifs « D-STATCOM » dans le but de minimiser les différents perturbation générées par le four à arc, et d'optimiser le transfert d'énergie de la source vers la charge en diminuant le flicker tout en augmentant la productivité du four à arc.

Cette étude est organisée en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** : présente les différents types des perturbations électriques, leurs origines et leurs conséquences néfastes sur les réseaux électriques et les équipements électriques.
- **Le deuxième chapitre** :est consacré à un état de l'art des fours à arc, spécialement leurs développements, ainsi que leurs rôles dans l'augmentation de la production mondiale en matières et les différentes parties principales qui constituent les fours électriques et les principaux types des fours électriques suivis par la présentation des avantages et des inconvénients.
- **Dans le troisième chapitre** : nous présentons des déférents dispositifs FACTS, et en détaillant la description de la structure (D-STATCOM), une explication sur le principe de leur fonctionnement, suivi par la modélisation de cette dispositif avec différents modèles mathématiques, ainsi que sa régulation.
- **Le quatrième chapitre** : est consacré à la modélisation et l'application dans le logiciel MATLAB/SIMULINK. On commencera par la modélisation du four à arc puis leur étude et son régime de fonctionnement .En fin nous insérons le D-STATCOM, et on étudiera le nouveau régime de fonctionnement de l'ensemble four /D-STATCOM

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cet dispositif surtout coté minimisation du flicker et amélioration de qualité de la forme d'onde « réduction des harmoniques ».

Chapitre Un

Les perturbations dans les réseaux électriques

I. Introduction :

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré [3].

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, le personnel 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 est la réduction des coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité, le coût des perturbations (coupures, creux de tension, harmoniques, surtensions atmosphériques.) est élevé. Dans un réseau réel d'alimentation, la qualité de la tension fournie aux utilisateurs et plus au moins dégradée à cause de divers perturbations [4].

Ce chapitre présente les différents phénomènes perturbateurs qui peuvent détériorer la qualité de l'énergie électrique et évidemment leurs origines, caractéristiques et conséquences.

II. Caractéristiques des perturbations électriques :

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

- Perturbations à basse fréquence (< 9 kHz).
- Perturbations à haute fréquence (≥ 9 kHz).
- Décharges électrostatiques [3].

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites à basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau).

Les phénomènes observés sont nombreux ; creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, non symétrie du système triphasé, harmonique et inter-harmonique.

En général, il n'est pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations, elles peuvent être groupées en quatre catégories [10].

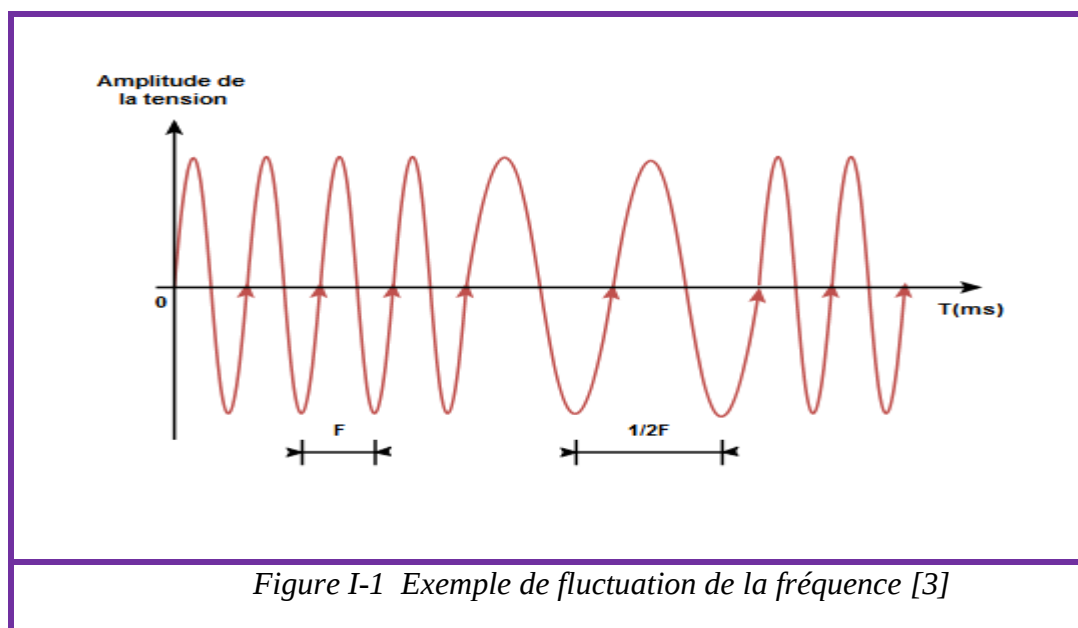
- La fréquence.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- L'amplitude des trois tensions.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

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. [14,15]

III. Fréquence :

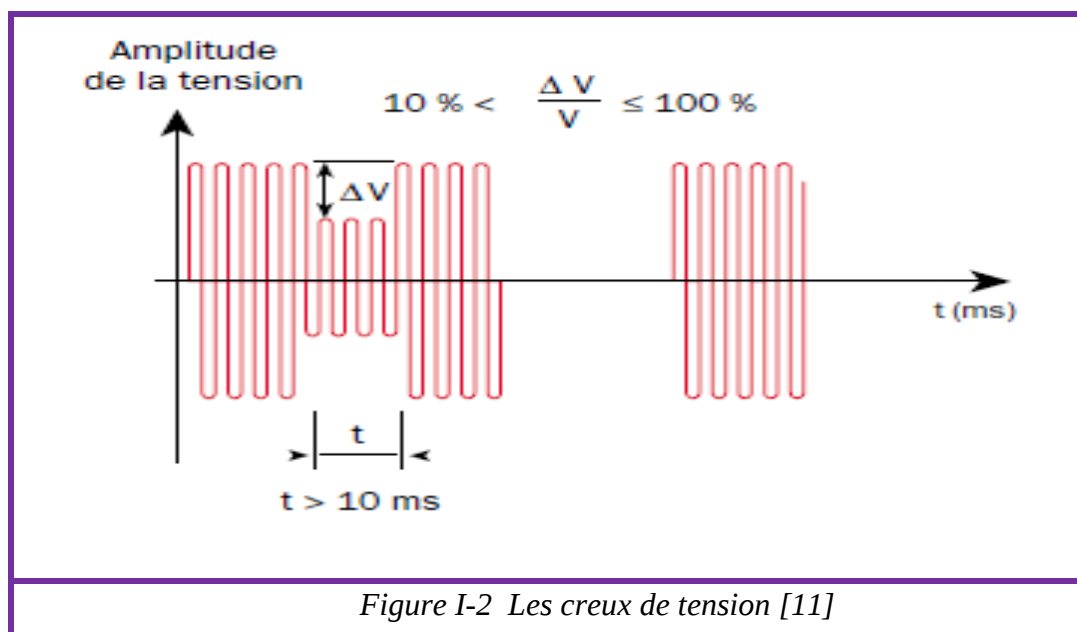
Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, et pilotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge [12]. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, et $-6\% \div 4\%$ durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes [4,10].



IV. Amplitude :

IV.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 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les defaults 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 [5,11].



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...) [4].

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 [5,9].

IV.2. Conséquences des creux de tension et coupure :

Les conséquences des creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements [9,12].

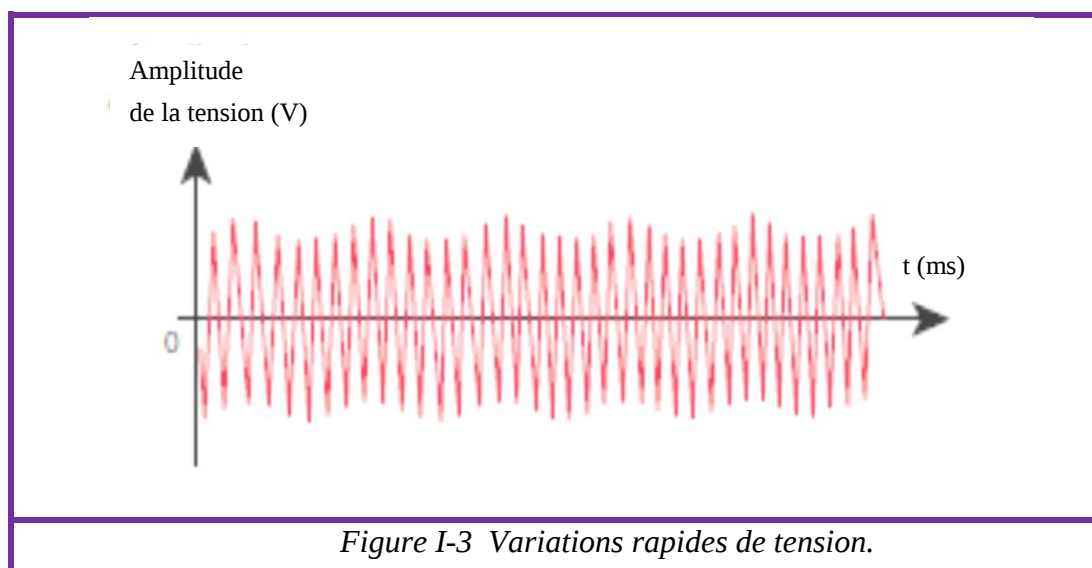
Tableau. I.1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension.

Type d'appareil	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	En mode onduleur : destruction des protections En mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

V. Fluctuations de tension – Flicker :

V.1. Définition de fluctuation de tension :

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 [4,11].



V.2. Conséquences des Variations et fluctuations de tension :

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation [3,11].

Le flicker provoque une fatigue physique pour les usagers de l'éclairage raccordé à proximité de la charge perturbatrice. Il s'agit d'un phénomène complexe car il fait intervenir les caractéristiques de l'ampoule (source de lumière), de l'œil (capteur) et du cerveau (interprète) [1.4].

VI. Forme d'onde :

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également **harmoniques**. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits [4,2].

VI.1. Harmonique :

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition sur l'onde à « 50 HZ » d'onde également sinusoïdale, mais de fréquences multiples de celle du fondamentale [2,8].

Une harmonique peut aussi être définie comme un signal périodique se compose d'un signal de fréquence (f) et de forme quelconque peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

- Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale.
- Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : Les harmoniques,
- Une éventuelle composante continue [7].

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase.

Le « rang » de l'harmonique est la valeur de l'entier qui détermine sa fréquence (sur un réseau **50Hz**, $f = 350 \text{ Hz}$). Les premiers rangs harmoniques tels que (5 et 7) ont des amplitudes élevées ; d'où les injections de courants correspondantes sont importantes, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes. L'amplitude de l'harmonique de rang (h) du cote de la source est donnée par [2,6] :

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (\text{I.1})$$

h: harmonique d'ordre h

I_1 : amplitude du courant fondamentale

I_h : amplitude de l'harmonique de rang (h)

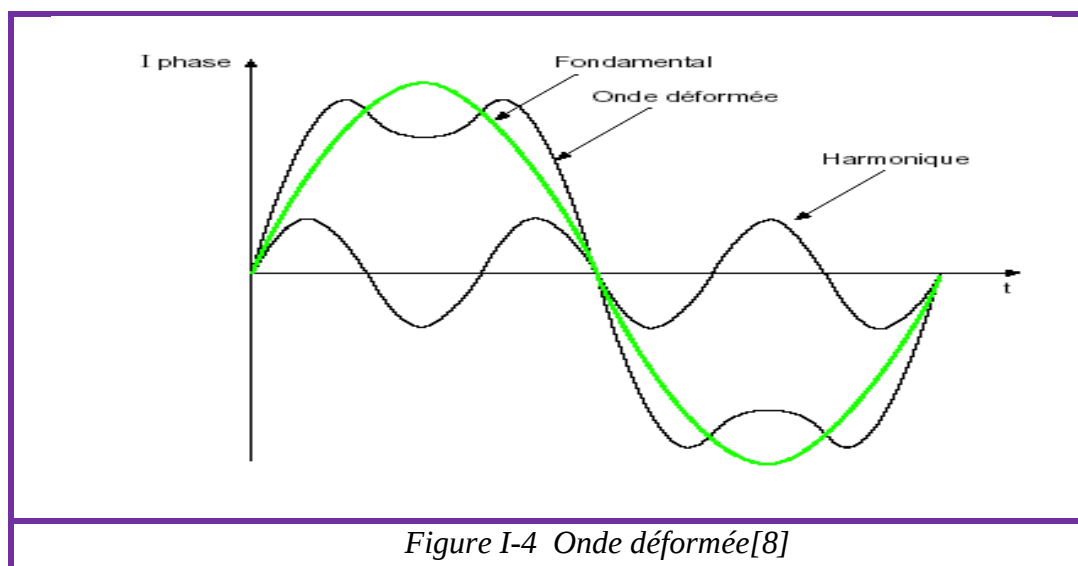


Figure I-4 Onde déformée[8]

VI.1.1. Origines des harmoniques :

La principale cause de la génération des harmoniques c'est l'existence des charges déformantes (**non linéaires**).

Une charge est dite **non linéaire** lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes à décharges [1,2,8] .

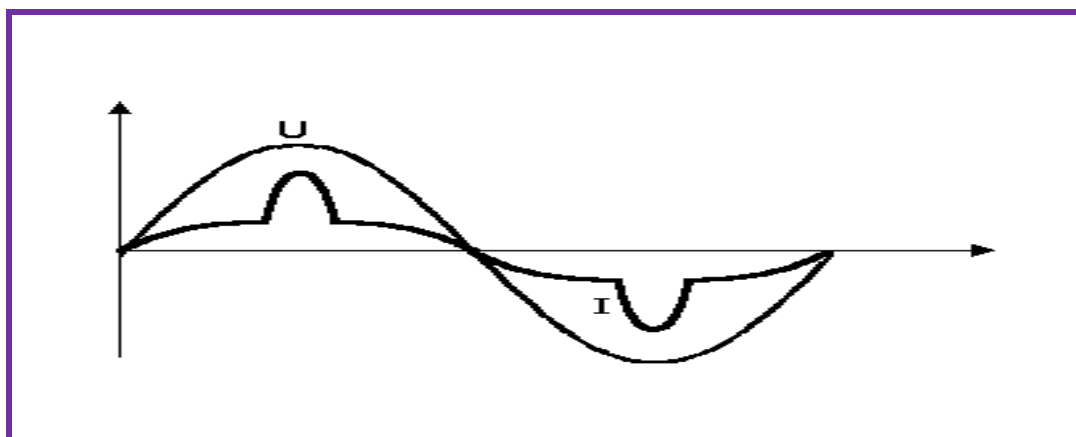


Figure I-5 La tension d'alimentation et le courant absorbé (charge non linéaire)

VI.1.2. La décomposition des harmoniques :

la décomposition harmonique sous la forme d'une somme de fonction composée: figure (I-4). D'un terme sinusoïdal à la fréquence (f) de valeur efficace (Y_1). Ce terme est appelé **fondamental** [1,2].

Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à (n) fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces (Y_n). Ces fréquences multiples du fondamental sont appelées **harmoniques**.

D'une éventuelle composante continue d'amplitude (Y_0).

- **Inter harmoniques:** Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.
- **Infra harmoniques:** Ces sont des composantes des fréquences inférieures à celle du fondamental [7].

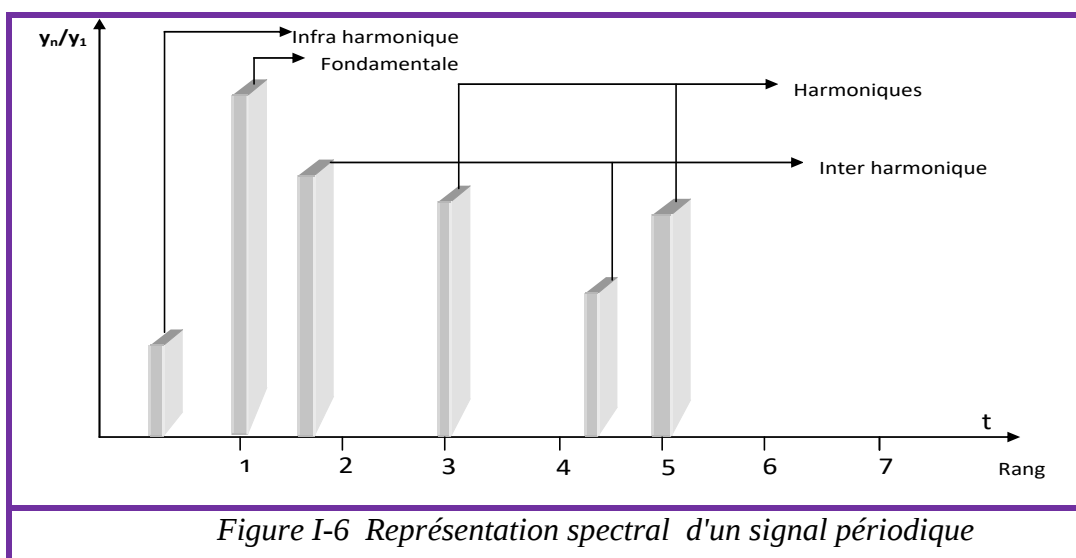
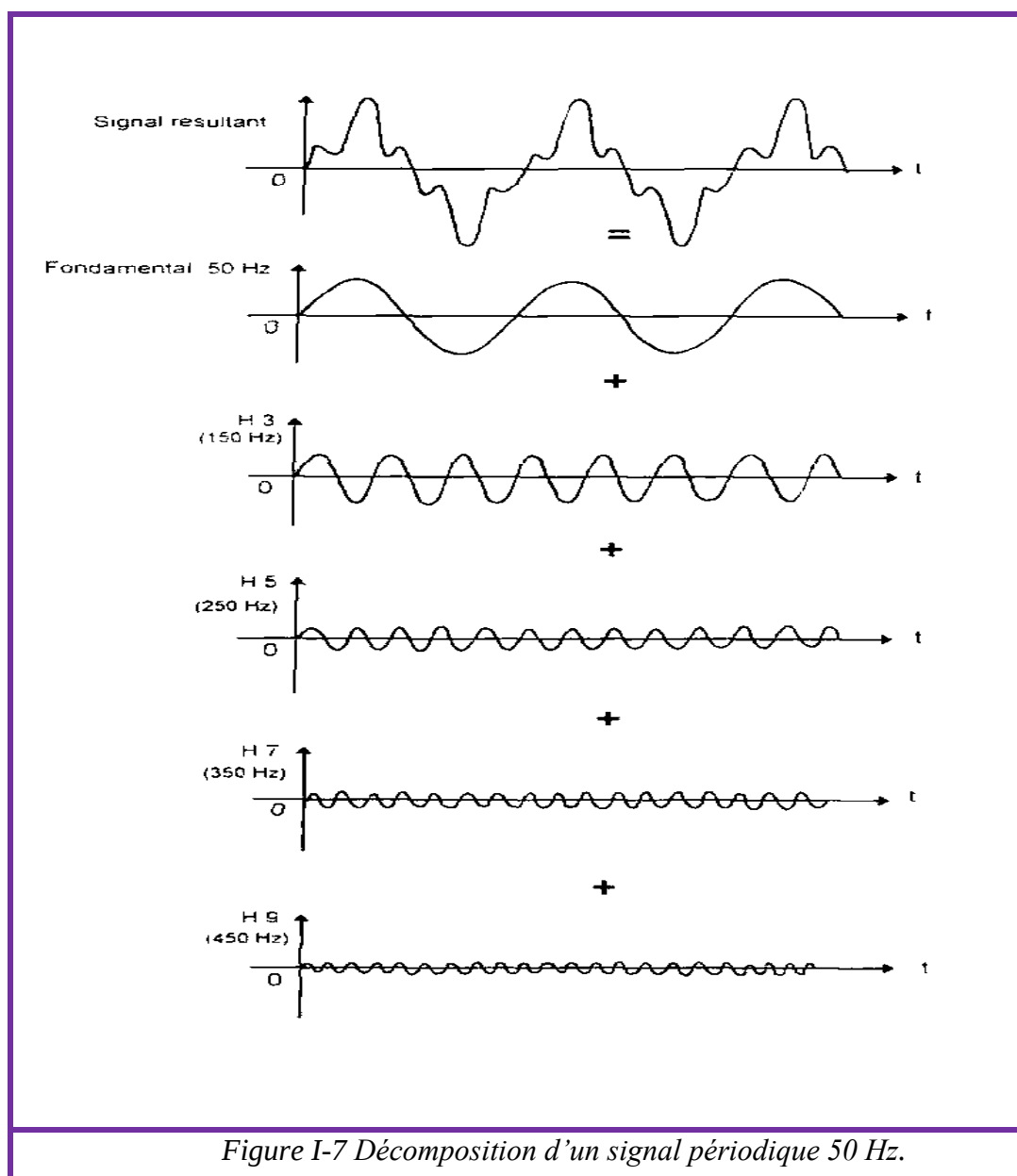


Figure I-6 Représentation spectral d'un signal périodique

VI.2. Décomposition d'un signal déformé :[6]

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par exemple des condensateurs ou des 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 [7].

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**, cycloconvertisseurs, 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...) [10,11].

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.

Tableau I-2 Les principaux effets des harmoniques[2,12]	
Nature du matériel électrique	Effet de la pollution harmonique
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 ..)	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation)

Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement 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.

VI.3. 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 (V_{THD}) et du courant (I_{THD}) dans la suite de ce rapport sont définis respectivement par les relations suivantes [10,12]:

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

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (I.3)$$

VI.4. Le facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [1,2].

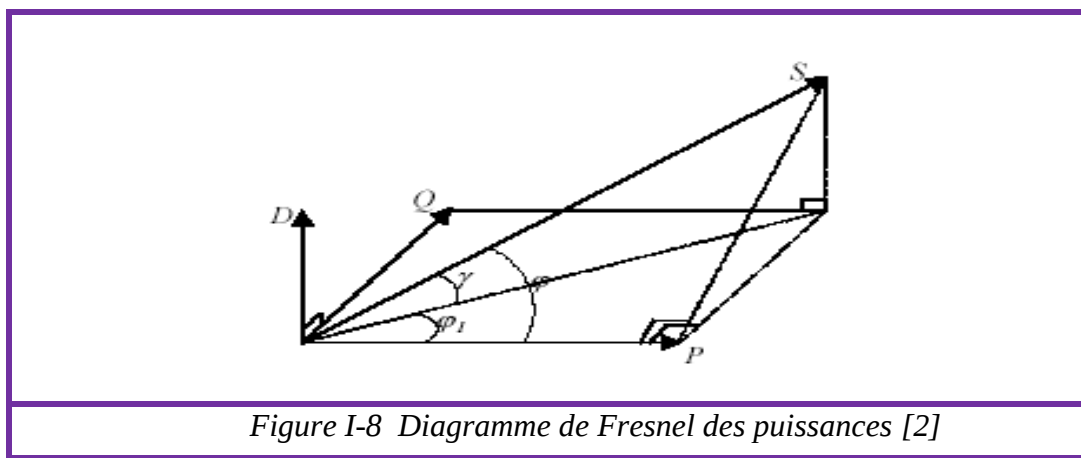
Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (I.4), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure I-8 :

$$D = 3.V_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_h^2} \quad (I.4)$$

Le facteur de puissance (FP) devient :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi . \cos \gamma \quad (I.5)$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

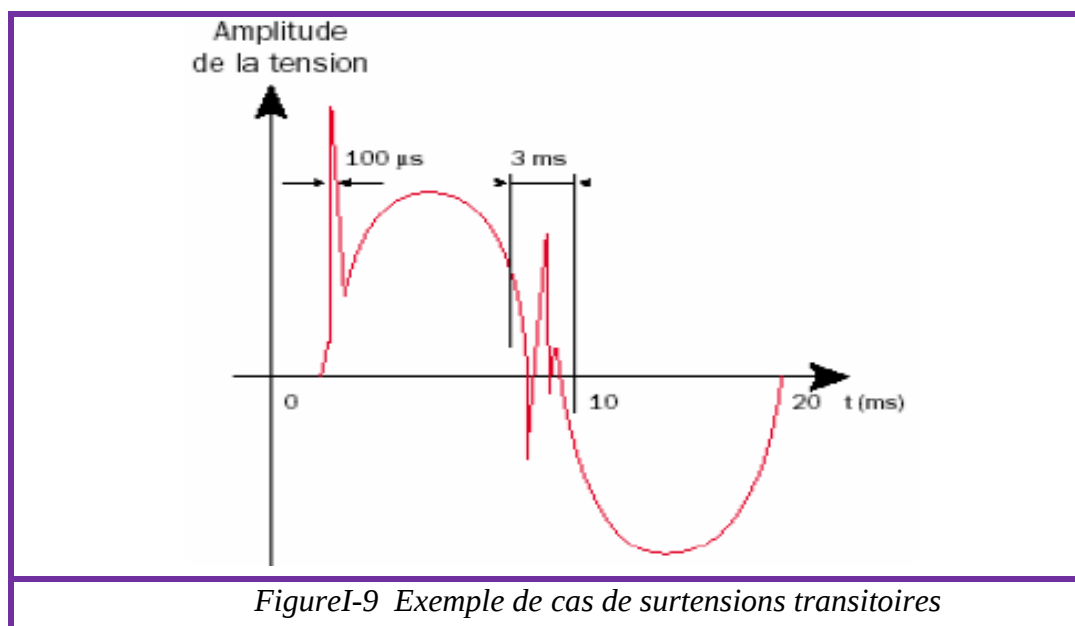


VII. Les surtensions :

VII.1. Origine des Surtension :

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures [5,9]:

- Temporaires à fréquence industrielle ;
- De manœuvre ;
- D'origine atmosphérique (foudre);
- Elles peuvent apparaître;
- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).



❖ Surtensions à fréquence industrielle :

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles sont aussi causées par :

- Les défauts d'isolement ;
- Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable ;
- Rupture du conducteur de neutre ;
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;
- Surcompensation de l'énergie réactive [10].

❖ Surtensions de manœuvre :

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...), On distingue particulièrement trois types:

- Surtensions de commutation en charge normale ;
- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs ;
- Surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs) [9].

❖ Surtensions atmosphériques :

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre) [5].

VII.2. Conséquences des Surtensions :

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence :

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...) ;
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées) ;
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels) ;
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
 - La foudre essentiellement ;
 - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue [3,12].

VIII. Déséquilibre « Non Symétrie » :**VIII.1. Définition non symétrie :**

Un récepteur électrique triphasé non équilibré ou des récepteurs monophasés non équilibrés alimentés par un réseau triphasé équilibré peuvent conduire à des déséquilibres de tension entre phase (figure I-10).

Ces déséquilibres sont dus à la circulation de courants non équilibrés par les impédances de réseau. La tension est décomposable par une méthode dite « des composantes symétriques, directe, inverse ou homopolaire ». Sachant que la composante inverse provoque des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à courant alternatif.

Le déséquilibre et ses trois composantes sont donnés par l'analyseur de réseau proposant la fonction déséquilibre [3,4].

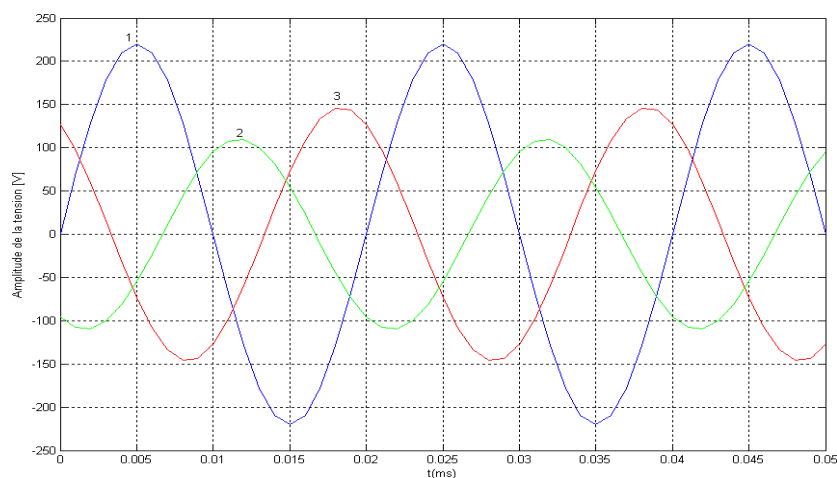


Figure I-10 Déséquilibre de tension

VIII.2. Conséquences du non symétrie :

Il est plus intéressant d'aborder le problème du non symétrie par type d'équipement. Le non symétrie d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés:

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de la non symétrie entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande [2].

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un

couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections. La non symétrie en tension est caractérisée par son degré qui est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport des amplitudes des tensions inverse (V_i) et directe (V_d).

$$k_2 \% = \frac{V_i}{V_d} \times 100 \quad (\text{II.6})$$

K_2 : Coefficient de non symétrie

IX. La solution pour chaque perturbation:

Plusieurs solutions sont utilisées pour atténuer les perturbations électrique dans les réseaux électriques, dans le tableau suivant on peut résumer quelques perturbations avec leurs origine, conséquences et solutions [1.2].

Tableau I-3 Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives			
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,

Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillissement 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
Sur tension transitoire	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, parasurtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de préinsertion

X. Conclusion :

Les principales perturbations électriques et leurs caractéristiques ont été présentées dans ce chapitre, tel que les harmoniques, les creux de tension, les surtensions, le flicker et la non symétrie. Comme nous avons pu le constater, ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques.

Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application: de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire même à la mise en danger des personnes.

Chapitre Deux

Technologies des fours à arc

I .Introduction :

Bien que les premiers fours électriques aient été conçus initialement pour l'élaboration de l'aluminium et des ferroalliages, l'introduction de l'aciérie électrique dans le domaine des métaux ferreux a marqué une rupture décisive dans les modalités de la fabrication du fer et de l'acier, car ce type de four peut fonctionner à partir d'une charge composée à 100% de vieilles ferrailles recyclées [16].

Le premier four destiné à fondre de l'acier a été inventé vers 1900 par le français Paul Héroult mais à cause du coût de l'énergie électrique, la production industrielle d'« acier électrique » n'a vraiment démarré qu'après la Seconde Guerre mondiale.

Depuis cette époque, ce procédé n'a cessé de croître au détriment de la filière fonte et l'on estime qu'il représente actuellement environ la moitié du tonnage d'aciers, moulée et corroyée, produite en Europe. Les fours à arcs ont également connu de nombreux développements en termes de capacité, de puissance spécifique et de productivité [16,18].

II. Définition :

Le four à arc d'aciérie est un outil de fusion destiné à fondre un métal primaire qui est, en général, de la ferraille, mais qui peut être de la fonte (solide ou liquide) ou encore des minerais pré réduits [17].

Les fours à arc ont connu un développement important aussi bien du point de vue technologique que du point de vue capacité de production. En effet, la capacité des fours modernes avoisine les **200 t** avec une consommation énergétique comprise entre **400 et 500 kWh/t**.

Les grands fours industriels représentent une part importante de la consommation d'énergie électrique dans le domaine industriel (près de 4 % de la consommation de la grande industrie en France). Selon certaines études prospectives, la filière électrique devrait continuer à croître pour couvrir, , environ 50 % de la production d'acier dans le monde [22].

III .Arc électrique :

L'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu ionisé (air ou gaz particulier), il est caractérisé par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique peut être obtenu entre deux électrodes de charbons soumises à une différence de potentiel convenable. Lorsque l'arc jaillit entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle-ci devient faible : L'ionisation intense de l'espace inter-électrodes a rendu cet espace brutalement très conducteur alors qu'il était isolant (ou presque) avant l'amorçage [26].

III.1.Naissance de l'arc :

La naissance de l'arc peut se faire par deux méthodes :

- Par la séparation des conducteurs d'un circuit fermé sous tension ce qui provoque l'apparition d'un arc électrique.
- Par l'augmentation progressive de la tension appliquée à une fente gazeuse, un arc électrique jaillit brusquement dans cet intervalle.

III.2.Conditions d'établissement :

L'arc électrique est établi en courant continu par :

- 1- Incandescence de la cathode ;
- 2- Tension cathode – anode suffisante.

Et en courant alternatif par :

- 1- Incandescence de deux électrodes ;
- 2- Différence de potentiel entre les électrodes plus élevée que pour le maintien de l'arc au moment du ré-allumage de l'arc [18].

IV . 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 décrassage, 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 (II-1) présente la structure d'un four à arc à courant alternatif [16,27].

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 [19,21].

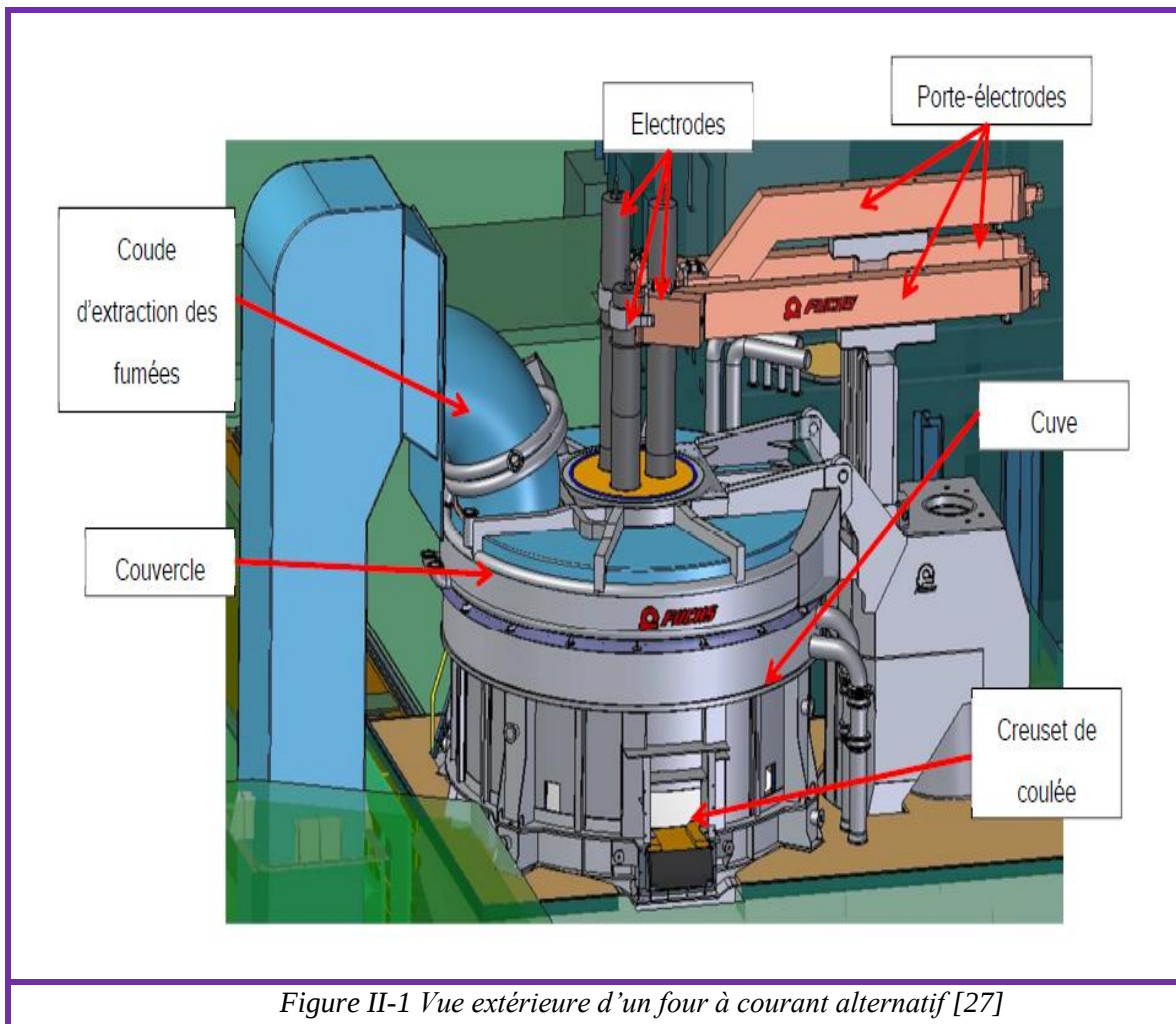


Figure II-1 Vue extérieure d'un four à courant alternatif [27]

V. Principe de fonctionnement :

Dans une enveloppe réfractaire (non fermée pour en évacuer les vapeurs), une forte tension électrique est appliquée entre des électrodes (graphite-carbone) et le métal à faire fondre. Cette tension fait jaillir un arc électrique. Les câbles électriques, l'enveloppe, le toit (ou la coupole) et certains éléments sont refroidis à l'eau ou un autre fluide caloporteur. La température engendrée par l'arc dépasse 1800°C et peut atteindre les 3600°C . Une zone plus froide persiste entre les électrodes, problème qui est généralement résolu par des brûleurs gaz + oxygène ou un brassage électro- magnétique du métal en fusion [18,27].

Pour une tension donnée, le seul moyen efficace de faire varier la puissance de l'arc est donc d'agir sur sa longueur. Du point de vue électrique, ce four peut être représenté par le schéma de la figure II-2 [17].

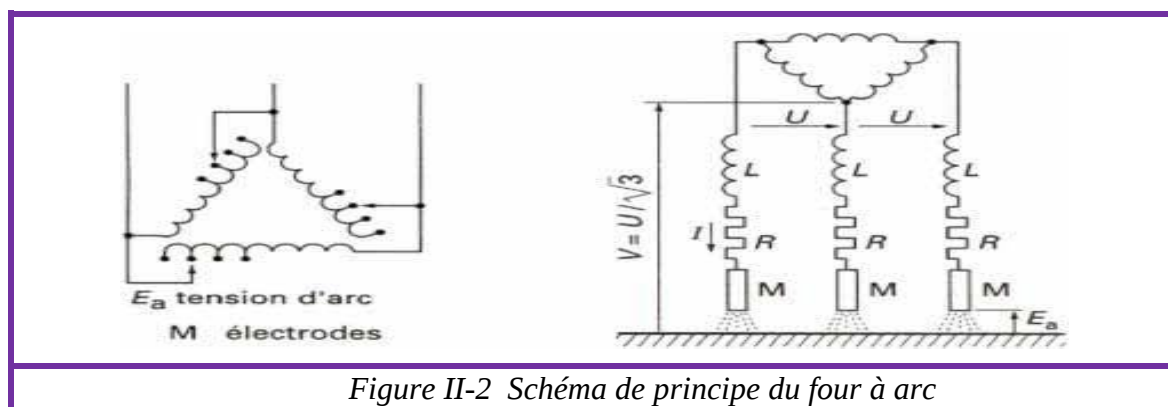


Figure II-2 Schéma de principe du four à arc

VI. Utilisation des fours à arc :

VI.1. Fabrication de l'acier :

L'acier est un alliage de fer et de carbone (ce dernier à l'état de carbure de fer). La teneur en carbone variant de 0,1 à 2 % (ce qui fait varier complètement les caractéristiques), on devrait en fait parler d'aciers (au pluriel). Historiquement, sa fabrication fut longtemps un « secret » d'alchimiste, voire un secret d'Etat. L'acier possède un ensemble de propriétés mécaniques remarquables, une forte résistance à la traction et aux chocs, une bonne élasticité, une excellente dureté, qui lui assurent des emplois de plus en plus nombreux. Au cours du XX^{em} siècle, l'acier est devenu le produit phare de la grande industrie [20,21].

Avant le XIII^e siècle, l'acier est produit artisanalement, presque par hasard, par écrouissage, à la forge, sous certaines conditions de pression et de température. Le fer des épées est plus généralement durci par la trempe (eau ou huile) ou plongé dans des copeaux de corne. Dans le procédé des forges catalanes, le minerai de fer réduit par l'action du charbon de bois donne de la fonte, du fer et de l'acier, mais il est impossible d'isoler ces produits qui sont mélangés. L'acier est présent dans la partie la plus chaude de l'appareil, là où arrive l'air. L'acier ne se trouve pas tel quel dans la nature, il est réalisé à partir de minerai de fer que l'on trouve, lui, à l'état naturel dans le sol [19].

VI.1.1. Par la filière fonte :

La plupart de l'acier dans le monde est aujourd'hui produit par la filière fonte. Elle représente 65% de la production mondiale d'acier et consiste en l'élaboration de la fonte à partir du minerai de fer et du coke, dans une usine intégrée, dont les principaux éléments

sont l'agglomération, la cokerie et le haut fourneau. Après avoir été concassé, puis aggloméré dans une usine d'agglomération, le minerai de fer est chargé dans un haut fourneau avec du coke, dont la combustion permet la fusion du minerai de fer (1250°C), pour donner la fonte. Pour obtenir une tonne de fonte, il faut 1,7 tonne de minerai de fer et 600 kilogrammes de coke. La fonte, métal riche en carbone (contenant de 2.5% à 6% de carbone), est ensuite transformée en acier, (dont la teneur en carbone est comprise entre 0.1% et 2%), par combustion du carbone avec de l'oxygène dans un convertisseur BOF (Basic Oxygène Furnace). La composition de l'acier est ensuite ajustée par addition d'éléments d'alliages. Cette production demande un apport énergétique important soit environ 25,4 GJ par tonne d'acier en raison de la réduction des oxydes du minerai de fer [22].

La filière fonte fournit des produits de haute qualité, mais cette production nécessite d'importants investissements (1000 \$ par an et par tonne de capacité installée) qui ne sont rentabilisés que pour des productions supérieures à 1 million de tonnes par an [20].

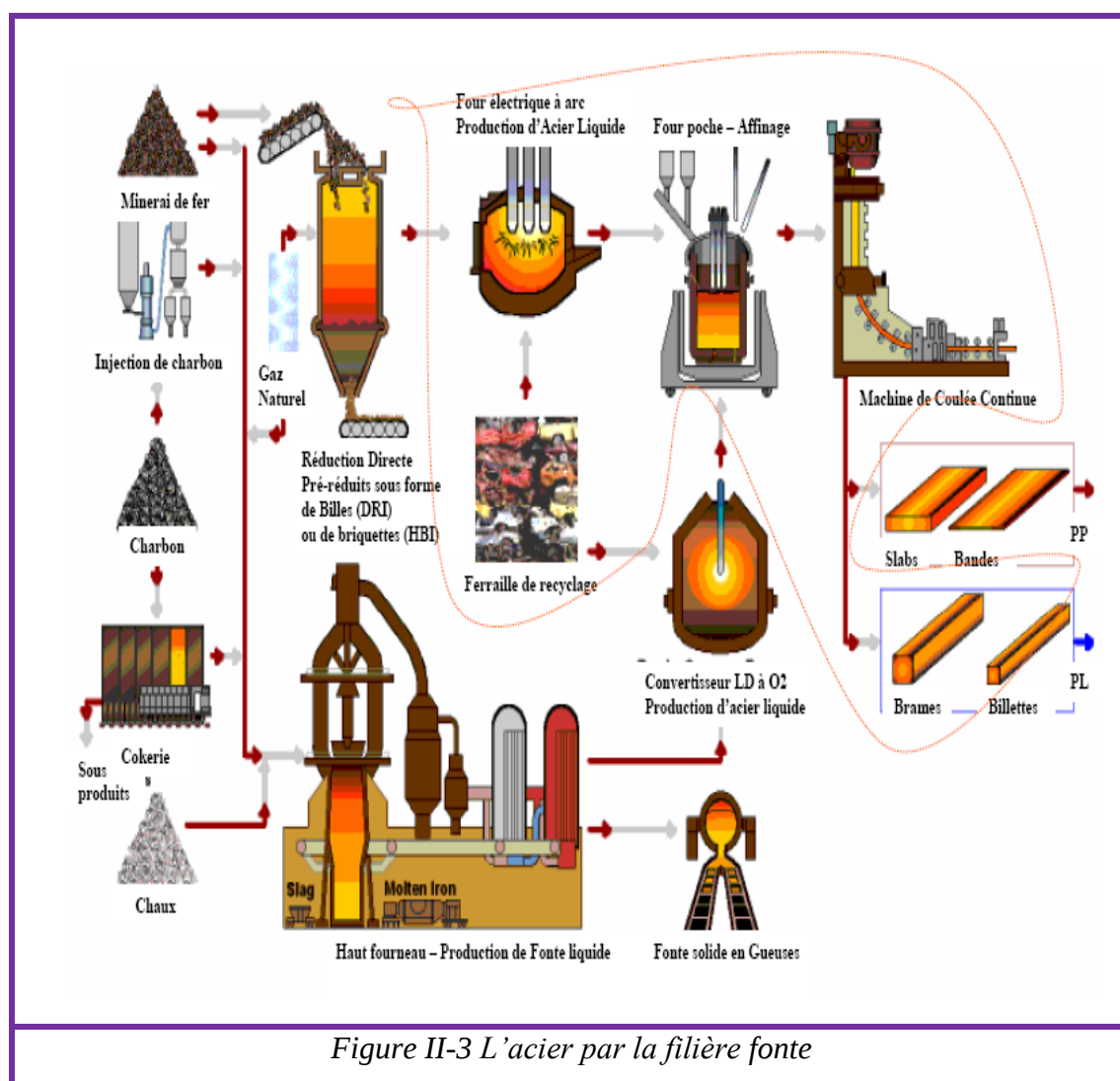


Figure II-3 L'acier par la filière fonte

VI.1.2.Par la filière ferraille :

La filière ferraille permet d'élaborer directement de l'acier à partir de ferrailles, dans une mini- usine (aciérie électrique). Ce procédé de production de l'acier, relativement récent, est né vers la fin des années cinquante et s'est développé rapidement.

Aujourd'hui cette filière représente 35% de la production mondiale d'acier. beaucoup plus compactes et plus simples que les usines intégrées, les mini-usines ne nécessitent qu'environ 4 GJ par tonne d'acier et utilisent pour fondre les ferrailles le four à arc électrique (EAF : Electrical Arc Furnace).

La composition chimique de l'acier liquide est ensuite réglée dans un four plus petit (four poche) juste avant la coulée continue. La figure II-4 montre le bilan des matières utilisées pour la production de l'acier dans une mini-usine [19,20].

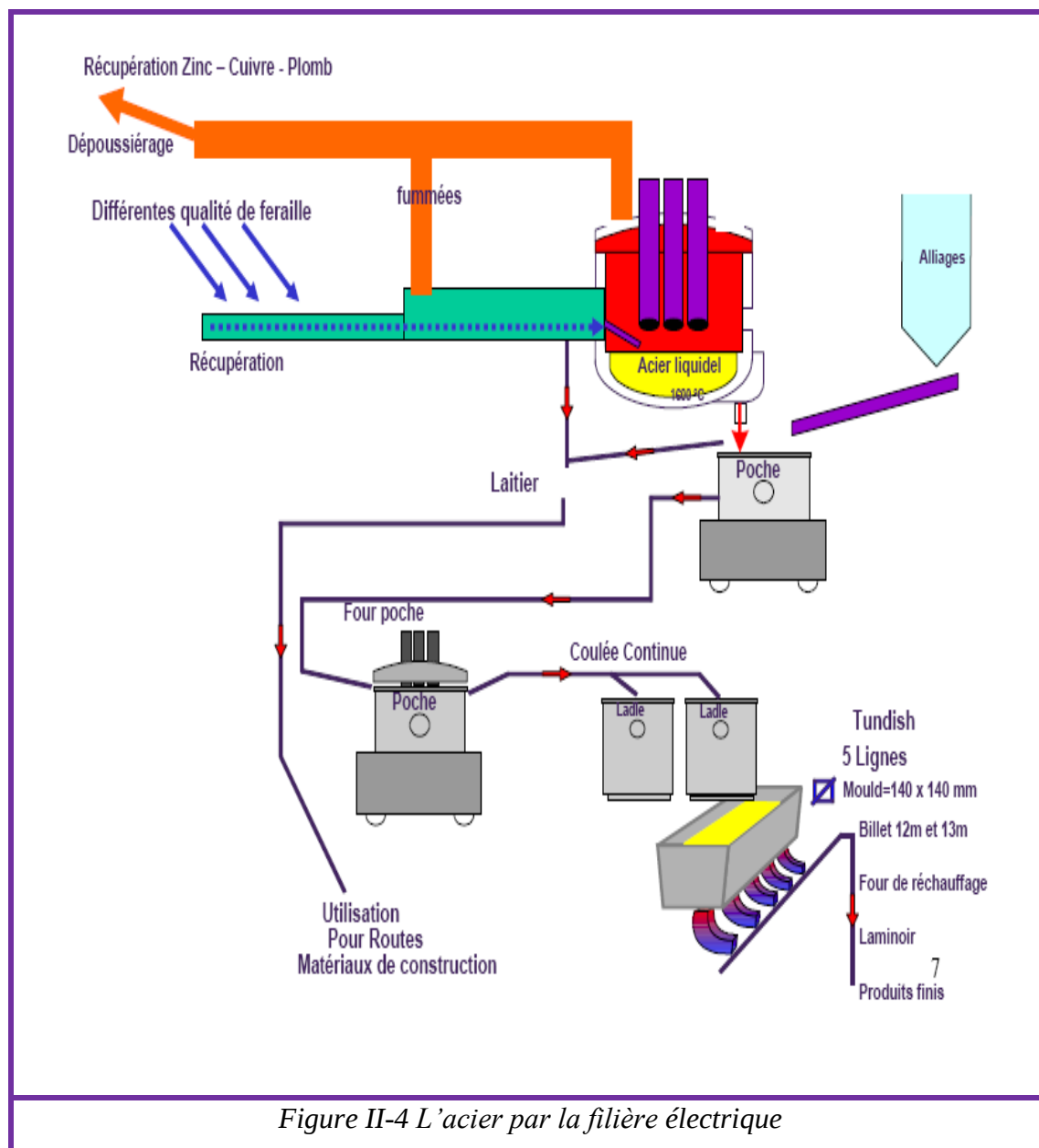


Figure II-4 L'acier par la filière électrique

VII. Conditions de fonctionnement d'un four à arc :

Le processus d'élaboration d'acier au four à arc électrique (FAE) a un caractère cyclique et se déroule selon les étapes suivantes [17] :

VII.1. Amorçage :

Le FAE est chargé jusqu'à la voûte, l'amorçage des arcs sur la ferraille se fait avec le forage de trois puits par la descente progressive des électrodes actionnées par régulation automatique. Cette période est la plus délicate du fait des éboulements brutaux de la ferraille risquant de casser les électrodes. C'est aussi une période de courts-circuits. Pour permettre une pénétration rapide des électrodes dans la ferraille, des arcs courts mais puissants sont utilisés.

VII.2. Au début et en cours de fusion :

Les puits percés, les murs protégés, les arcs s'amorcent sur une phase liquide dont le poids augmente progressivement, sont de plus en plus stables. La ferraille entourant encore les extrémités des électrodes forme un écran de protection des réfractaires. Ceci permet donc l'application d'une puissance élevée.

VII.3. Achèvement de la fusion :

Vers la fin de fusion, la ferraille éboullée en presque totalité laisse les réfractaires exposés aux projections des arcs et aux rayonnements directs. Des arcs de longueur et puissance réduites sont préférés.

Si la cuve n'a pas été chargée complètement, la limitation du surchauffage du garnissage impose la disjonction et le rechargement de nouveau panier.

VII.4. Affinage :

Cette phase consiste à surchauffer le bain, à éliminer les scories et à régler la composition du métal. Les besoins thermiques correspondants étant faibles par rapport à ceux de l'étape de fusion, on recherchera des réglages susceptibles de chauffer rapidement le métal sans endommager les murs et de la voûte. Des tensions basses et des arcs courts sont utilisés.

VIII. Principe de la régulation :

L'étude théorique montre que le courant dans l'arc est uniquement fonction de la valeur efficace de la tension d'alimentation (tension secondaire du transformateur) et de la distance entre les électrodes. En agissant sur la tension délivrée par la source, on peut donc obtenir un même courant dans l'arc avec un arc plus ou moins long. Comment doit-on donc choisir la longueur de l'arc et la tension de la source ? En se guidant sur les principes suivants :

1. Quant rapproche les électrodes, la puissance dans l'arc augmente tant que le facteur de puissance du circuit secondaire d'alimentation reste supérieur à 0,8 environ.
2. Un arc long est économiquement (meilleur rendement) mais instable.

En conclusion, pour chaque allure de chauffe, le choix de la longueur d'arc est le résultat d'un compromis entre les conditions contradictoires de bonne stabilité et de bon rendement. Cela conduit à l'utilisation d'une bobine de réactance d'induction ($L.\omega$) d'autant plus grande que la tension est plus élevée.

Pratiquement, le réglage du débit de chaleur se fait de manière approchée en choisissant la tension secondaire convenant pour toute une gamme de courants. Il est ensuite amélioré par le jeu du régulateur, dont le rôle est de maintenir le courant à la valeur optimale, en agissant sur l'écartement des électrodes.

Le transformateur qui alimente le four comporte un enroulement primaire (traversé par le courant le plus faible) avec commutateur de prise en charge ; il permet d'obtenir toute une gamme de tensions secondaires. Quant à l'inductance, celle du transformateur lui-même est pratiquement suffisante pour les tensions les plus basses (couplage étoile au primaire du transformateur). Pour les grandes tensions, on introduit une inductance en série dans le circuit haute tension du transformateur. On utilise des régulateurs électriques ou hydrauliques pour commander le moteur d'électrodes. Très souvent, la régulation est dite différentielle, c'est à dire que le couple moteur du régulateur dépend de la différence entre un couple proportionnel au courant. A cette régulation, on peut associer l'équation suivante [17,28] :

$$U_{eff} - A.I_{eff} = 0 \quad (II.1)$$

Ou bien $\frac{U_{eff}}{I_{eff}} = A$ (A : Etant constante) ; C'est à dire à impédance constante, donc

on a les cas suivants :

- Si cette équation est satisfaite, l'électrode reste **immobile**.
- Si l'on a : $U_{eff} - A.I_{eff} > 0$, l'électrode **descend** et l'intensité efficace I_{eff} croisse.
- Si l'on a : $U_{eff} - A.I_{eff} < 0$, l'électrode **remonte** et l'intensité efficace I_{eff} diminue.

La régulation peut être manuelle, mais le plus souvent automatique. Ainsi pendant la fusion, les électrodes sont en continuel mouvement pour compenser les mouvements de la charge tendant à créer des dissymétries [17].

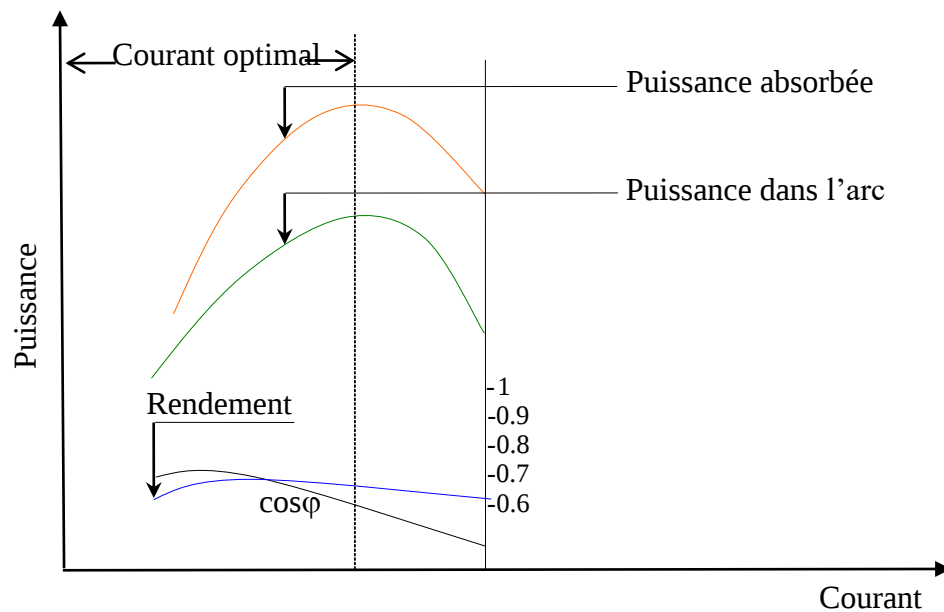


Figure II-5 Puissance absorbée par le four [18]

VIII. Classification des fours à arc [17]:

VIII.1. Four à arc d'après leur nature d'arc :

VIII.1.1. Four à arc libre :

Dans le four à arc libre, ou à arc indirecte, l'arc est maintenu entre les électrodes disposées horizontalement sur la charge (dans lesquels la chaleur est produite par le passage de l'arc directement entre les électrodes). Il est généralement utilisé pour la fusion de la fonte ou l'acier.

VIII.1.2. Four à arc sur résistance :

Le four à arc sur résistance, ou à arc submergé est utilisé à la fabrication des ferroalliage, ou à la réduction de certains minerais. Dans ce genre de four les électrodes sont plongées dans la charge.

VIII.1.3. Four à arc sur charge :

Dans ce four l'arc est maintenu entre les électrodes et la charge. Ce type de four est presque exclusivement utilisé à la fabrication de l'acier à partir de la ferraille ou autres charges métalliques.

L'alimentation de ces types des fours peut être continue ou alternative, monophasé, biphasé ou triphasés. Généralement les fours de grande puissance sont triphasés.

VIII.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation :**VIII.2.1. Four alimenté en courant alternatif :**

Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé. Il est constitué essentiellement d'une cuve garnie de réfractaires, basculante pour la coulée et le dégraissage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen de trois électrodes verticales en graphite.

VIII.2.1. 1. Description technologique :

Dans le four à arc à courant alternatif triphasé, les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal.

Le métal fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. Lorsque ces puits sont fermés, les arcs travaillent sur un bain liquide dont le volume augmente en cours de la fusion.

Le four se compose des éléments suivants [27] :

➤ **La cuve :**

C'est dans celle-ci que se déroule la fusion des ferrailles. Le plus souvent de forme circulaire, elle est fabriquée en acier et est, à l'intérieur, recouverte de matériau réfractaires qui doivent résister aux hautes températures, sans modification significative de leurs propriétés. Ce sont des matériaux très importants dans le four électrique car ils doivent contenir l'acier liquide sans risque pour la structure de la cuve.

En plus de ce garnissage de matériaux réfractaires, la plupart des cuves sont également équipées d'un système de refroidissement. Celui-ci est assuré à l'aide d'un ensemble de tubes placés sur l'extérieur de la cuve et dans lesquels circule de l'eau. Sur le côté de la cuve se situe un creuset de coulée servant à extraire l'acier liquide en fin de fonte.

➤ **Le couvercle :**

Son rôle est de fermer la cuve afin d'éviter toute projection pendant le fonctionnement de l'installation. Il permet également d'assurer une certaine étanchéité thermique, ce qui permet de réduire les pertes énergétiques.

Il est percé de trois trous permettant d'introduire les électrodes dans la cuve, ainsi que d'un 4e par lequel sont extraites les fumées produites lors de la fonte.

➤ **Les électrodes en graphite :**

Leur nombre dépend de la technologie du four. Pour les fours à courant continu, une seule électrode est introduite dans la cuve, à travers le couvercle, la seconde étant fixe et se trouvant au fond de la cuve. Cependant, la technologie à courant alternatif est la plus utilisée et a l'avantage de ne nécessiter aucun composant d'électronique de puissance, l'alimentation électrique étant constituée de composants électrotechniques classiques. De ce fait, ce principe est plus économique.

Cette technologie nécessite 3 électrodes introduites dans le four à travers les trous du couvercle prévus à cet effet. Entre celle-ci est appliqué un courant alternatif à haute tension, ce qui provoque le jaillissement d'arcs électriques. L'énergie thermique dégagée par ceux-ci provoque la fusion des ferrailles présentes dans la cuve. Ces électrodes sont fixées à des **portes électrodes mobiles**, afin de permettre leur introduction progressive dans le four.

➤ **Autres dispositifs :**

Un certains nombre d'accessoires complètent cet ensemble :

- ◆ Vérins hydrauliques de basculement de cuve permettant de basculer le four soit vers l'arrière pour le décrassage soit vers l'avant pour la coulée.
- ◆ Potence de voûte supportant la voûte et les électrodes lors de l'ouverture du four pour chargement.
- ◆ Pinces d'électrodes servant en même temps d'amenées en courant.
- ◆ Câbles souples d'alimentation généralement à refroidissement à circulation d'eau.
- ◆ Le panier à ferraille servant au chargement du four.
- ◆ Le circuit d'extraction et de traitement des fumées.[17,27]

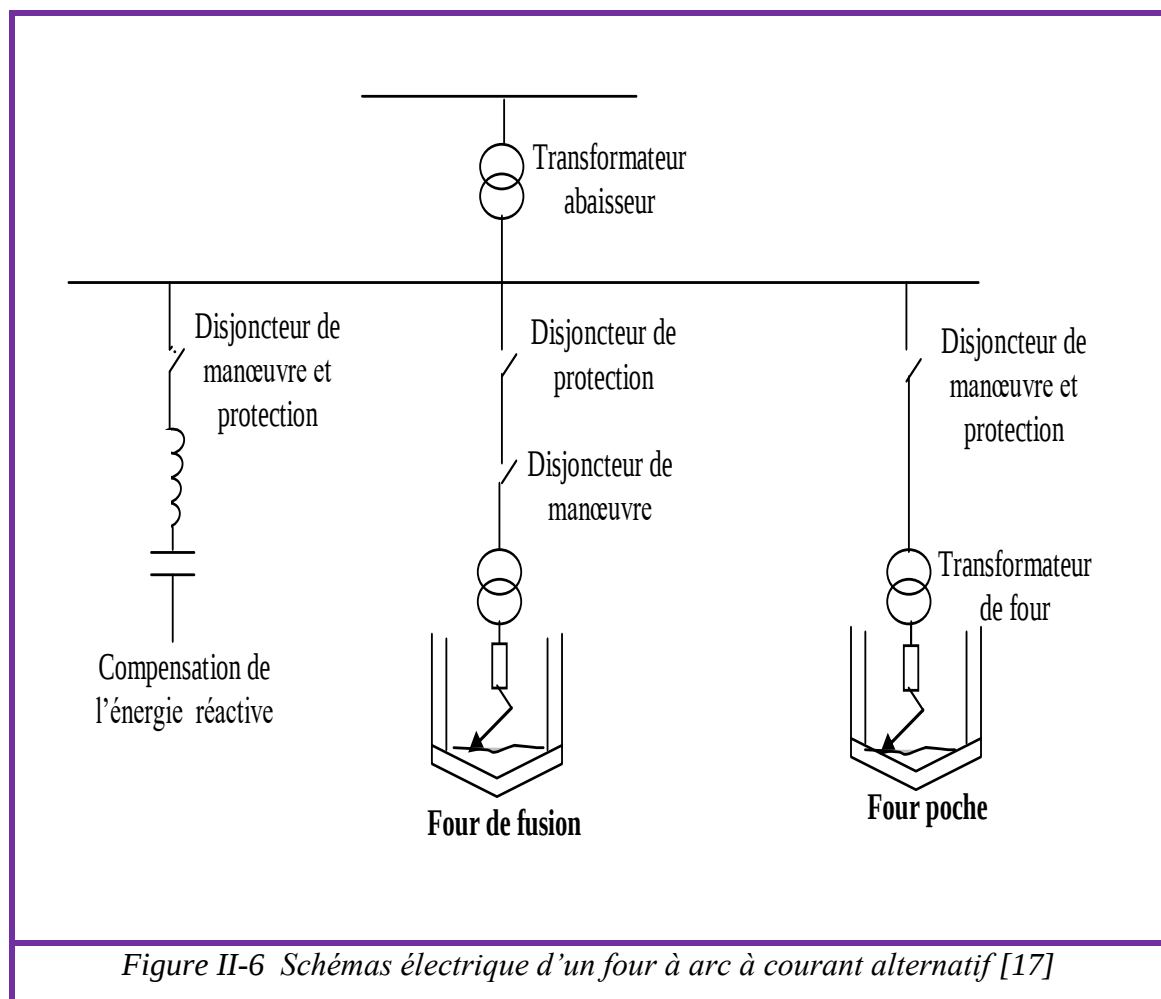
Toutes les parties métalliques soumises à des températures élevées sont refroidies par circulation d'eau. Le chargement des ferrailles se fait en général en deux ou trois fois par l'intermédiaire de paniers. La coulée se fait en une fois dans une poche en tôle garnie de

réfractaire et préalablement chauffée pour éviter un refroidissement trop rapide du métal liquide .

VIII.2.1.2. Description de la partie électrique :

Etant donnée les puissances mises en jeu, les fours à arcs de sidérurgie sont toujours raccordés au réseau haute tension. L'architecture d'alimentation électrique la plus couramment répandue comporte :

- Un transformateur abaisseur permettant de passer de la haute à une moyenne tension intermédiaire.
- Un disjoncteur de protection et un disjoncteur de manœuvre.
- Un transformateur de four réglable en charge, permettant de passer de la tension intermédiaire à des basses tensions au niveau du four.
- Un ensemble de câbles souples et une porte électrode.
- Un système de compensation d'énergie réactive comprenant un filtrage anti-harmonique ; la compensation d'énergie réactive peut être obtenue soit par un dispositif plus élaboré de compensation statique [18].



VIII.2.2. Four alimenté en courant continu :**VIII.2.2.1. Définition générale de EAF-DC :**

Du point de vue descriptif, le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif. Il s'en distingue toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs électrodes de sole.

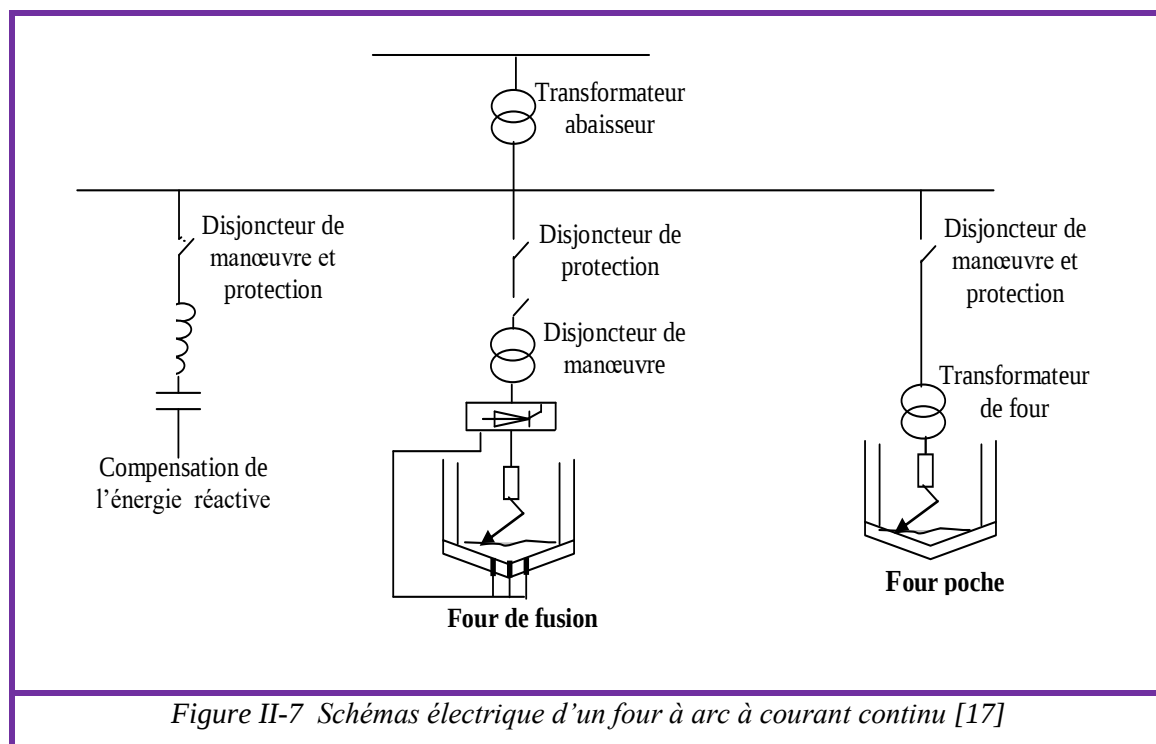
Autrefois, les fours à courant continu de grande puissance étaient équipés d'un système de trois électrodes alimentées chacune par un redresseur spécifique. Aujourd'hui, le système mono-électrode, alimenté par un ou plusieurs redresseurs en parallèle ou en série, équipe la grande majorité des fours à courant continu [17].

VIII.2.2.2. 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 :

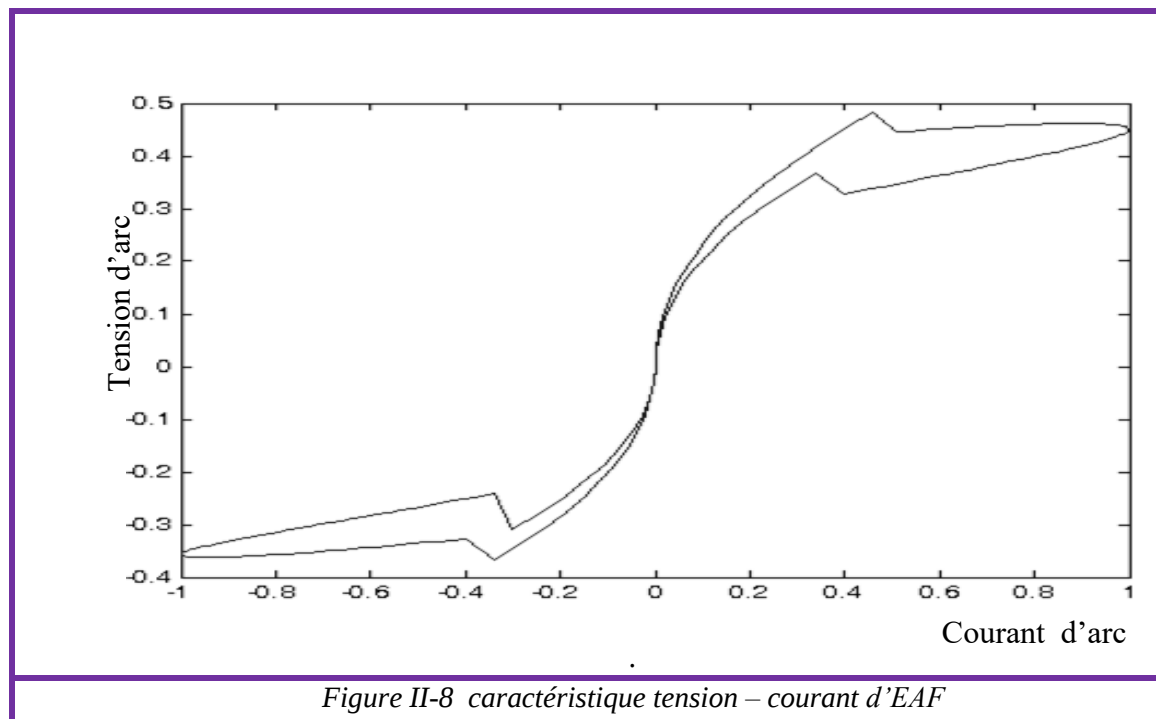
- Un transformateur abaisseur permettant de passer de la haute tension à une moyenne tension.
- Un ou deux disjoncteurs de protection et de manœuvre.
- Un transformateur de four permettant de passer de la tension intermédiaire à des basses tensions.
- Un redresseur.
- Un ensemble de câbles souples et 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 $p=12$ [23,16].



IX-Caractéristique Tension - Courant [V- I] du four à arc :

L'irrégularité de l'onde de tension est provoquée par le déclenchement brusque et l'interruption de la sorcière courante fournit, ainsi une source de courants harmonique « figure II-8 », donc la tension et le courant devient considérablement de forme sinusoïdale symétrique [24,25].



X. Avantages et inconvénients du four à arc [17] :**X.1. Avantages :**

Le four à arc présente un certain nombre de qualités que n'ont pas les autres procédés :

- Souplesse et précision du réglage de la température.
- Choix et constance de l'atmosphère dans le four.
- Facilité dans la conduite et l'exploitation.
- Facilité d'automatisation.
- Minimum d'effluents gazeux.
- Possibilité de travailler avec des parois froides.
- Températures élevées.
- Souplesse de conduite.
- Maîtrise indépendante de l'intensité et de la tension.
- Possibilité de travailler avec une voûte froide (arc submergé).
- Taille modulable.
- Grande rapidité de fusion.

Utilisé à l'origine comme accessoires destiné à produire une matière première de lux, le four à arc est maintenant devenu un important outil de production lourde. Dont on ne cesse d'augmenter la capacité et la puissance nominale pour on améliore la productivité. Cette évolution résulte non seulement de l'amélioration des données économiques liées aux progrès techniques mais aussi de la facilité d'adaptation aux fluctuations du marché ou à l'évolution d'un site sidérurgie.

X.2. Inconvénients :

- Consommation d'électrodes.
- Vaporisation en surface (arc rayonnant).
- Erosion des réfractaires.
- Initier la fusion lorsque le bain n'est pas conducteur à froid.
- Influence de la résistivité du bain (arc submergé).

XI. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par des généralités sur les différentes méthodes utilisées pour la production de l'acier, ensuite nous avons fait aperçu général sur les fours à arc, concernant leurs descriptions, types, rôles, avantages et inconvénients ...etc.

Dans ce contexte, l'évolution du marché de l'acier en mode et plus particulièrement le rapport entre sa production et sa consommation, ses exportations et importations joueront de plus en plus un rôle très important dans le marché mondial de l'acier.

L'utilisation des fours à arc est de plus en plus envisagée, dans les pays industrialisés (Etas Unis, l'Europe), par les sidérurgistes des usines intégrées, confrontés aux coûts élevés d'entretien des hauts fourneaux et aux problèmes environnementaux.

Chapitre Trois

Etude et Modélisation du D-STATCOM

I. Introduction :

La modélisation est une étape très importante pour étudier le comportement d'un phénomène physique. Dans la littérature beaucoup des recherches ont été développés [29,31] pour modéliser les dispositifs FACTS. Parmi ces modèles, celles développés par [30,38].

Ce chapitre présente la modélisation des différents composants du réseau électrique à savoir : les équipements de compensation d'énergie réactive, et leur rôle tels que la stabilité, le contrôle de la tension et de l'écoulement de puissance.

La compensation de l'énergie réactive des ligne de transmissions modifie les caractéristiques électriques de manière à répondre à d'éventuelles demandes en charge. On trouve trois sortes de compensation : la compensation shunt , série et hybride .

La compensation shunt est utilisée afin de contrôler la tension et la puissance transmise le long des lignes. La compensation série quant à elle, est utilisée dans le but de contrôler la transmise par la réduction ou l'augmentation de l'impédance de la ligne, cette compensation est employée dans le cas de longues lignes de transmissions.

II. Systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) :

Les dispositifs FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Le concept FACTS, introduit en 1986 par *Electric Power Research Institute* (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique [38].

Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques [38, 39].

Des études et des réalisations pratiques ont mis en évidence l'énorme potentiel des dispositifs FACTS.

Avec leur capacité à modifier l'impédance apparente d'une ligne de transport, ils peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que celui de la puissance réactive et de la tension. En régime permanent, les FACTS permettent d'utiliser les lignes plus près de leur limite thermique en repoussant les limitations liées à la stabilité.

Leur vitesse de commande élevée leur confère également un grand nombre d'avantages en régime transitoire ainsi qu'en cas de court-circuit.

De manière générale, les dispositifs FACTS agissent en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux nœuds, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les phases des tensions.

Un autre avantage des équipements FACTS réside dans le fait que cette technologie autorise une extension des limites du réseau d'une manière échelonnée en installant les FACTS pas à pas lorsqu'ils deviennent nécessaires.

Il est ainsi possible de répartir les investissements dans le temps. De plus, avec les FACTS de la dernière génération, il est possible de déplacer une installation en l'espace de quelques mois, si les conditions d'exploitation venaient à changer en rendant le dispositif inutile dans son emplacement initial [30].

Plusieurs types de FACTS avec des architectures et des technologies différents, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (*Static Var Compensator*), le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), le STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), et l'UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis.

Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre. La position de l'installation dans le réseau est également un paramètre important pour son efficacité. Lorsque plusieurs dispositifs sont insérés dans un réseau, il convient que leurs effets soient coordonnés afin qu'ils n'agissent pas de façon opposée [29].

Dans ce cas, la stratégie de contrôle revêt une importance toute particulière.

II.1. Définitions et généralités :

Selon l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), la définition du terme FACTS est la suivante : Système de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basées sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau [38].

Avec leurs aptitudes de modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances.

Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport.

En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de leurs limites en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité. Finalement, il faut noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes, Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau [40].

II.2. Rôle des dispositifs FACTS :

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels le thyristor et le thyristor GTO [39].

Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques [32].

Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs.

De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire.

Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions.

En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- ❖ Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée;
- ❖ Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimer, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages. De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [30].

Ils permettent en particulier :

- ❖ D'accroître le réserve de stabilité transitoire ;
- ❖ D'amortir les oscillations de puissance ;
- ❖ De supporter de manière dynamique la tension. Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone [29].

III. Types des dispositifs FACTS :

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories [39] :

- ✓ Les compensateurs parallèles ;
- ✓ Les compensateurs séries ;
- ✓ Les compensateurs hybrides (série - parallèle).

Dans cette section, nous essayons de présenter les FACTS les plus populaires appartenant à chaque catégorie :

III.1. Les systèmes de compensation shunt :

Le compensateur d'énergie réactive a déjà fait ses preuves sous la forme d'une machine synchrone couplée au réseau et fonctionnant à vide. La puissance active alors consommée est uniquement liée aux pertes des machines. Le réglage du transfert d'énergie réactive se fait par le biais de l'excitation de la machine [42].

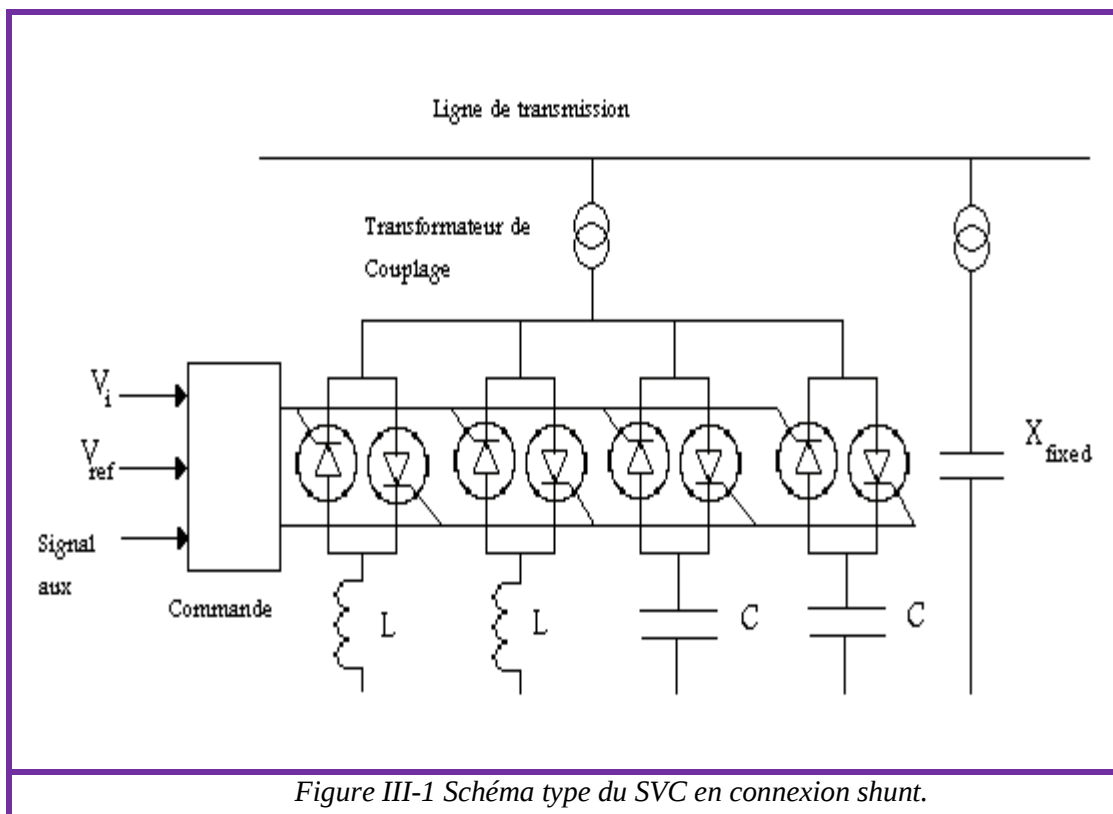
Ce principe de réglage, outre les nuisances sonores, nécessite un coup d'investissement initial et d'entretien non négligeables. Par ailleurs, l'inertie de la machine implique des temps de réponse conséquents.

Des inductances et des condensateurs commandés par des interrupteurs mécaniques ont été largement utilisés et le demeurent encore. Ce sont tout simplement

des l'inductance ou des batteries condensateurs qui sont connectées au réseau en fonction de l'énergie réactive que l'on veut absorber ou fournir. Cette technique ne permet pas un réglage fin, et n'a pas un temps de réponse suffisamment rapide pour compenser de fortes variations d'énergie, de plus, les parties mécaniques demandent une importante [38,39] .

III.1.1. Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) :

La figure II.1 est le diagramme unifilaire de la connexion shunt du SVC (Static Var Compensator). Le SVC est composé des thyristors commandés par des capacités (TSCs) et d'autres par des réactances (TCRs). La génération de la puissance réactive varie constamment entre des valeurs capacitives et inductives mises en jeu dans le circuit. Le SVC est utilisé afin de réguler la tension des systèmes de transport, à la valeur de référence. L'installation d'un SVC à un ou plusieurs points appropriés dans le réseau peut augmenter la capacité de transfert et réduire les pertes tout en maintenant le profile de la tension pendant le régime perturbé [33].

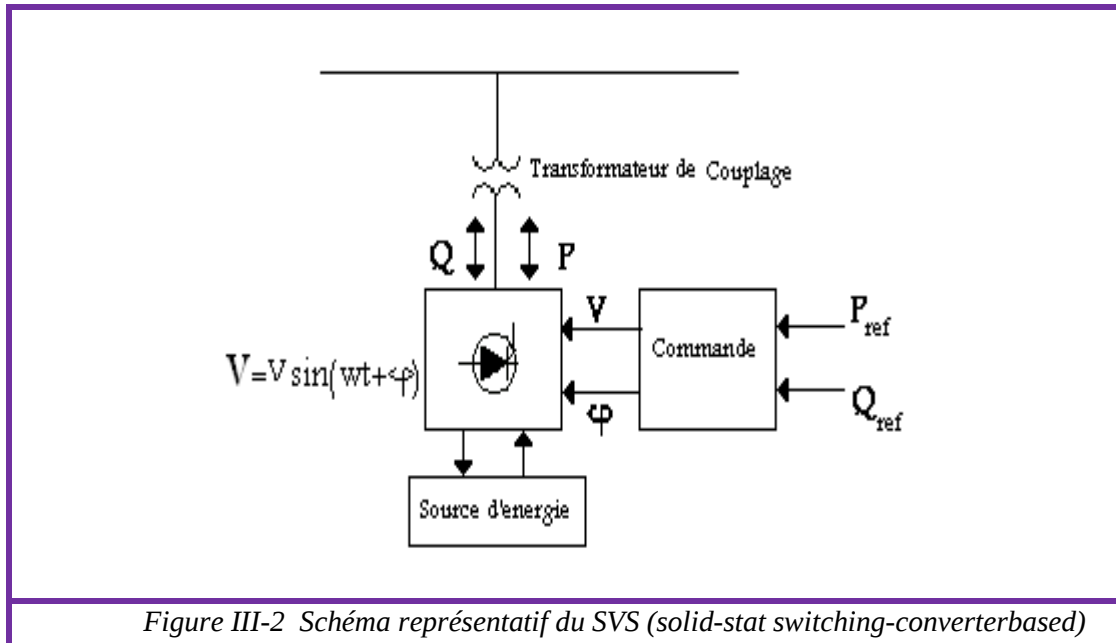


III.1.2. Compensateur statique (STATCOM) :

Le dispositif STATCOM (Compensateur statique) a une caractéristique semblable au compensateur synchrone, mais comme dispositif électronique, il n'a aucune inertie et est supérieur au compensateur synchrone : une meilleure dynamique,

une charge de placement inférieure et des coûts de fonctionnement et d'entretien inférieurs. Le modèle fonctionnel du SVS est décrit par « la figure III.2. » [42].

L'amplitude V et le déphasage φ , sont définis respectivement par la valeur de référence de Q_{ref} et P_{ref} . Les valeurs de V et φ déterminent les puissances réactive et active échangées entre le SVS et le système AC.



Le SATACOM est utilisé aussi comme un compensateur statique d'énergie réactive, SVC, pour la commande de la tension de transmission par la compensation shunt réactive.

Le STATCOM fournit une puissance réactive capacitive maximale, pour n'importe quelle tension même si elle est inférieure à zéro. Cette possibilité donnée par le STATCOM, prouve qu'il est plus efficace que le SVC, dans l'amélioration de la stabilité transitoire.

L'amplitude variable de la tension triphasée V contrôle l'échange de puissance réactive entre le STATCOM et le système AC. Dans ce cas, l'amplitude de la tension augmente au-dessus de celle de la tension du système AC. Le STATCOM agit comme une capacité et génère une puissance réactive. Lorsque l'amplitude de la tension produite décroît au-dessous de celle du système AC, le STATCOM agit comme une inductance et absorbe la puissance réactive [35,42].

Le STATCOM génère ou absorbe la puissance réactive (Figure III-3). Ce qui lui permet d'amortir les oscillations du réseau [5,9].

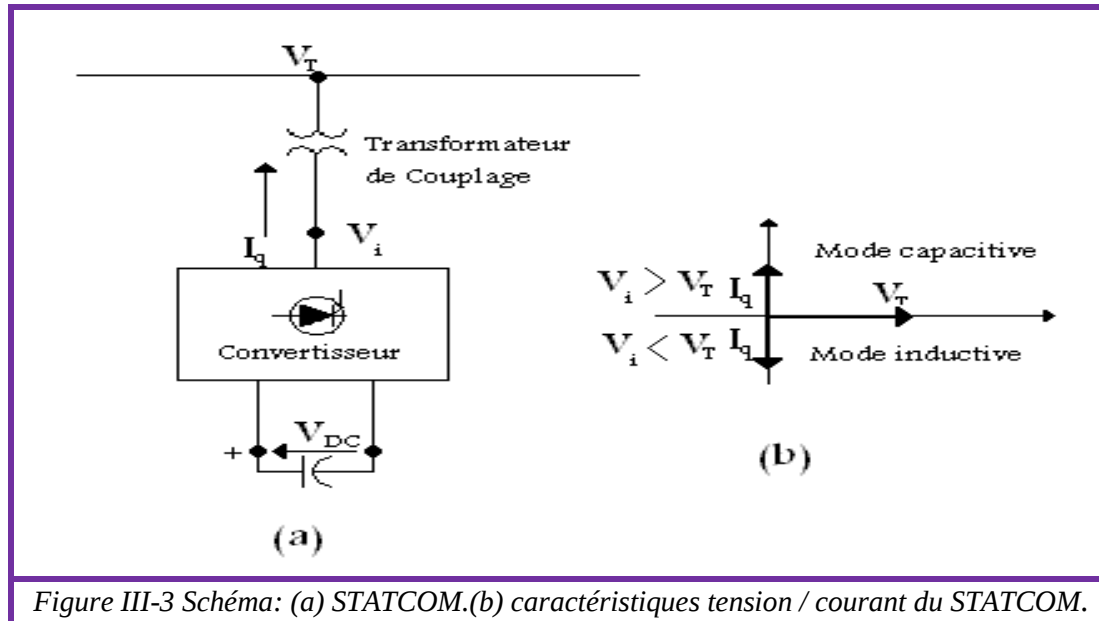


Figure III-3 Schéma: (a) STATCOM.(b) caractéristiques tension / courant du STATCOM.

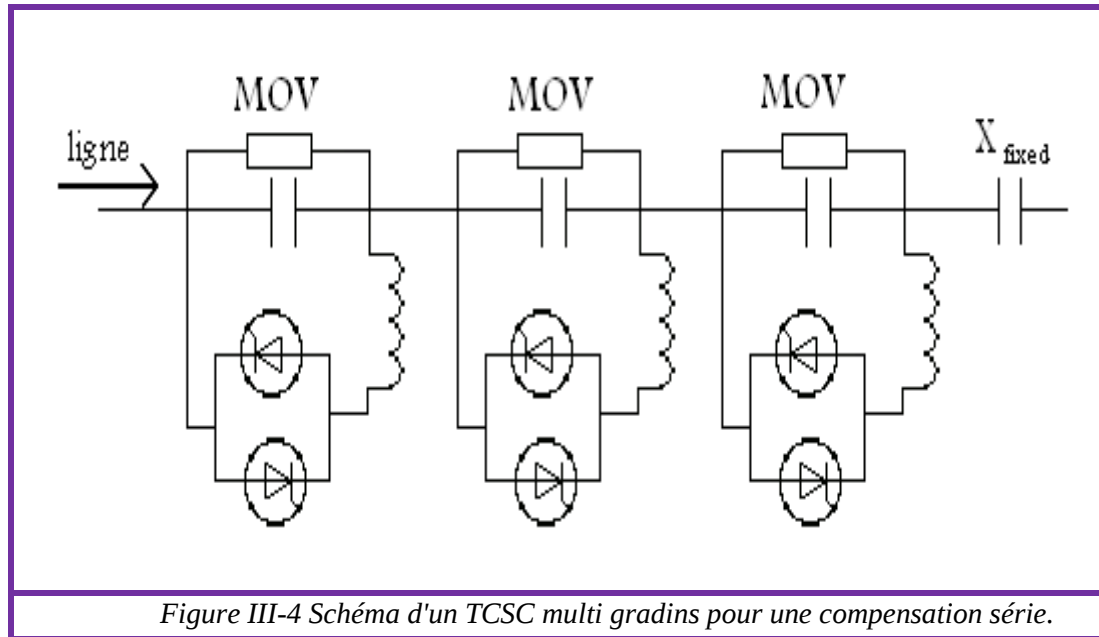
III.2. Les systèmes de compensation série :

Le principe de ces compensateurs est de modifier l'impédance de la ligne de transport en insérant des éléments en série avec la ligne. Pour modifier l'impédance d'une ligne essentiellement inductrice. On insère de éléments capacitifs. On va bien sur chercher à contrôler l'impédance de la ligne, en utilisant des condensateurs séries réglables [42] .

III.2.1.Capacités série commandées par thyristor (TCSC) :

Les condensateurs en série commandés par thyristor (TCSC) fournissent une technologie prouvée qui adresse des problèmes dynamiques spécifiques dans des systèmes de transmission. Le gradin du TCSC est composé de capacités fixes en parallèle avec des thyristors, en série avec une bobine. Chaque gradin est en parallèle avec une varistance (MOV) en métal oxyde, qui protège le gradin contre les surtensions. Séparés et disposés en série, les gradins forment ainsi un système complet de compensation. La capacité principale de valeur fixe est disposée en séries avec les gradins.

La figure (III-4) décrit le schéma de compensation série d'une ligne de transmission, dans lequel est inclut un TCSC à plusieurs modules. Il est possible de varier l'impédance totale de compensateur en modifiant l'angle d'amorçage du thyristor. La compensation série de la ligne de transmission, commandé par thyristor permet d'amortir les fluctuations de puissance car le TCSC est essentiellement utilisé afin de contrôler l'écoulement de puissance [38,39].

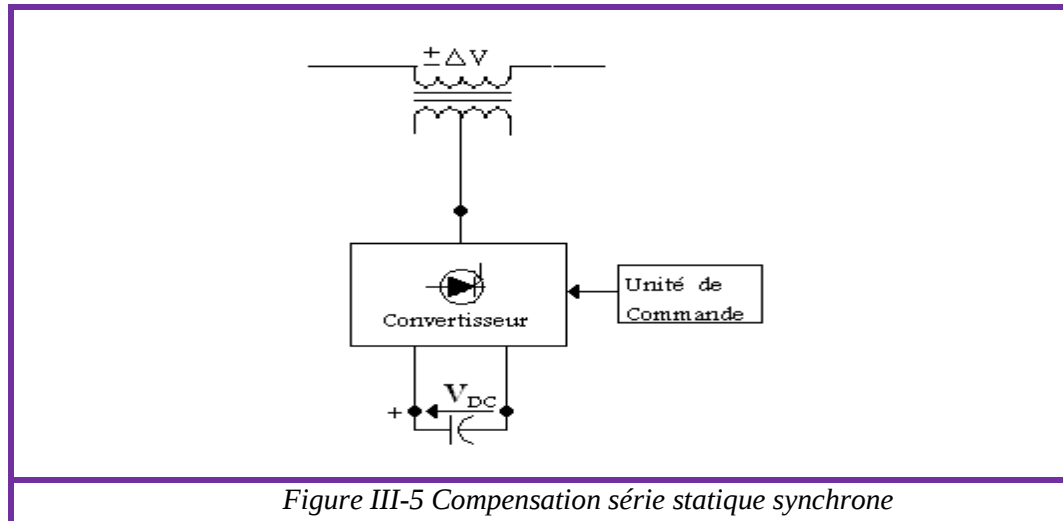


III.2.2. Compensateur Série Statique Synchrone (SSSC) :

Le SSSC est utilisé pour injecter une tension en série dans la ligne de transport. La figure II.7 représente un dispositif dans lequel des tensions en série, sont injectées dans la ligne de transport afin d'accroître ou de décroître la tension à travers l'impédance inductive de la ligne et par la suite augmenter le courant fondamental de la ligne et la puissance transmise. Par conséquent, si le déphasage de la tension injectée ΔV est choisie à 90° degré en arrière par rapport au déphasage du courant de la ligne, nous obtenons une compensation série équivalente à celle fournie par un condensateur série à la fréquence fondamentale. Par contre, si le déphasage de ΔV est de 90° en avance sur le courant de la ligne, la compensation série a le même effet que lorsque l'impédance réactive de la ligne augmente.

Contrairement à la compensation série conventionnelle, la tension injectée ΔV fournie par le SSSC est indépendante du courant de la ligne. Le SSSC permet de fournir une tension de compensation constante en présence d'un courant de ligne variable.

L'amplitude de la tension injectée ΔV peut être commandée indépendamment de l'amplitude du courant de la ligne. Le pouvoir que possède le SSSC pour la compensation de la ligne de transport, dans les deux modes capacitif et inductif, peut être utilisé dans l'amortissement des oscillations du réseau [29,38].

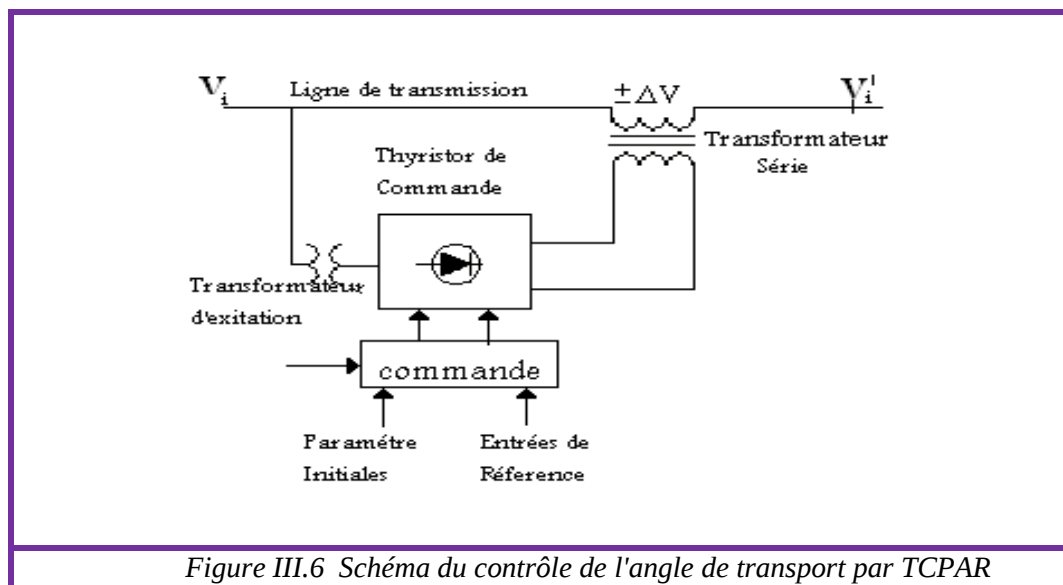


III.2.3. Régulateur de déphasage commandé par thyristor (TCPAR) :

Dans les lignes de transmission, les puissances actives P et réactive Q sont des fonctions du déphasage entre les deux tensions de départ et d'arrivée. Placé en série avec la ligne de transmission, le TCPAR met les tensions en quadrature et modifie le déphasage de la tension à travers la ligne et par conséquent, commande l'écoulement de puissance [42].

Le schéma type TCPAR est montré sur la figure III.6 qui comporte un transformateur d'excitation relié par shunt, un transformateur d'insertion de série et un arrangement de commutateur de thyristor reliant une combinaison choisie de tension.

La capacité du TCPAR à maintenir l'angle interne pendant les premières oscillations peut également être utilisée efficacement pour augmenter la marge de stabilité du système [38].



III.3. Les systèmes de compensation hybrides Série-Parallèle :

III.3.1. Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC) :

Si on remplace la capacité C dans la figure III.6 par un accumulateur d'énergie (DC) ayant une capacité infinie, le déphasage de la tension série ΔV peut être choisi indépendamment du courant de la ligne entre 0 et 2π . Ceci est possible lorsque la source de tension synchrone, SVC, génère et absorbe la puissance active et réactive.

Dans un cas idéal, la puissance réactive est généralement produite ou absorbée, mais en pratique la puissance active est générée et absorbée par l'accumulateur d'énergie (DC). Si la source DC est disponible, elle peut être considérée comme le système de puissance AC [34].

L'implantation pratique d'un tel dispositif, dans lequel la source d'énergie DC est alimentée par le système de puissance AC est décrite dans la figure II.9. Le convertisseur à connexion shunt fournit la puissance active que l'onduleur à connexion série échange avec la ligne. Cette figure montre que les deux convertisseurs AC-DC peuvent fournir la compensation nécessaire tout en assurant un échange de puissance active et réactive à travers la liaison capacitive DC.

L'un du convertisseur est placé en série et l'autre en parallèle avec la ligne transmission [34,35].

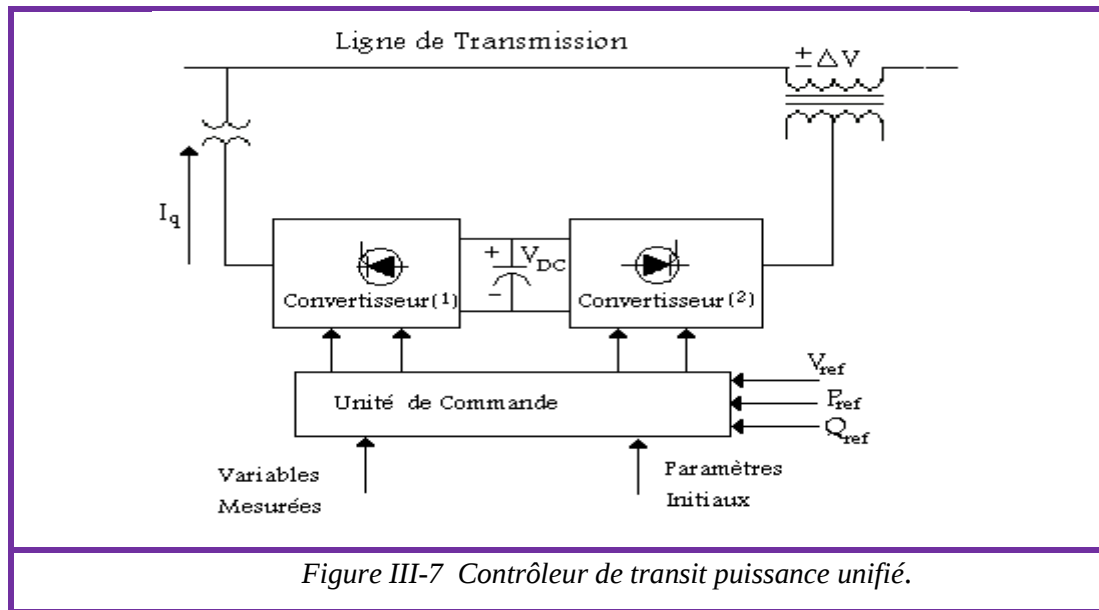
Le convertisseur (2) est utilisé pour injecter une tension série ΔV à la tension terminale du réseau AC, avec une amplitude et un déphasage variable. Cette tension injectée, agit comme une source de tension AC dans laquelle le courant qui circule est celui de la ligne. La génération de l'énergie active demandée par le convertisseur (2) est assurée par la connexion en shunt du convertisseur (1) avec le système de puissance AC.

La génération de la puissance réactive dans le convertisseur shunt est indépendante de la puissance active échangée avec la source terminale DC. Par conséquent, le convertisseur shunt peut aussi accomplir la fonction d'un STATCOM indépendant. Grâce à ce dispositif, il est possible de fournir une tension série ΔV avec une amplitude et un déphasage ϕ appropriés.

Le UPFC peut réaliser une multitude de fonction qui permettent le contrôle de l'écoulement de puissance. Les différentes fonctions du contrôle de l'écoulement de puissance du UPFC, sont les suivantes:

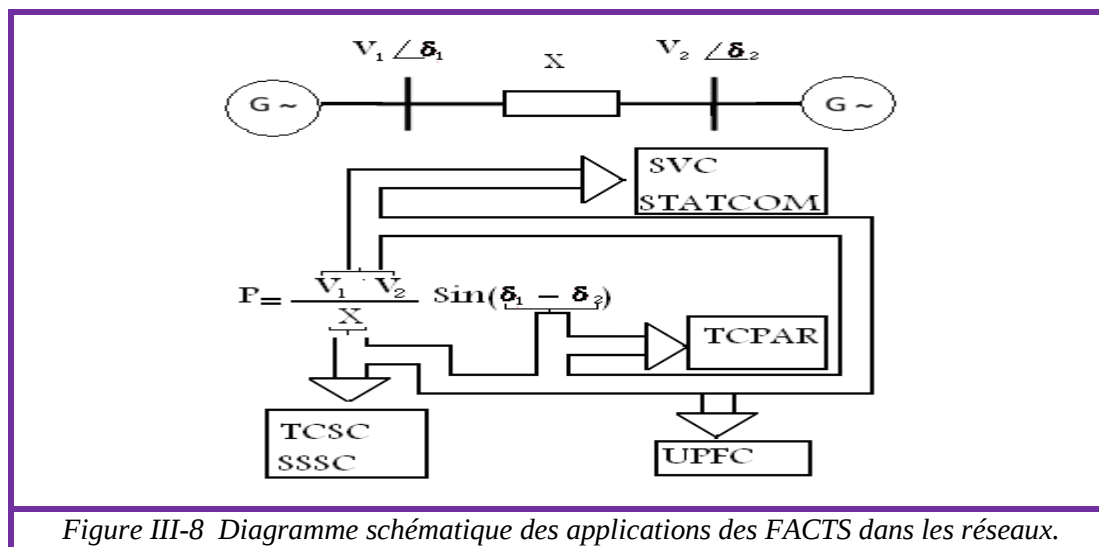
- Commande de la tension d'arrivée et réglage de la tension de départ.
- Commande de la compensation série de la ligne.
- Contrôle par réglage de déphasage.
- Combinaison de toutes les commandes de la tension terminale, de la compensation série de la ligne ainsi que le réglage du déphasage.

Le UPFC est extrêmement puissant grâce à son pouvoir d'agir sur différents paramètres, ce qui permet d'avoir une commande adéquate de l'écoulement de puissance [34,35].



IV. Applications et avantages des FACTS :

L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base du la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif [38].



La figure III-8 représente la puissance transmise entre deux noeuds du système. Elle dépend des tensions aux deux extrémités de l'interconnexion, de l'impédance de la ligne et de la différence d'angle de phase entre les deux systèmes. Les différents dispositifs de FACTS peuvent activement influencer un ou plusieurs de ces paramètres pour la commande du flux de puissance et pour l'amélioration de la stabilité de tension aux nœuds de l'interconnexion.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être récapitulées comme suit:

- Systèmes maillés: Commande du transit de puissance.
- Systèmes radiaux et lignes parallèles: commande de l'impédance.
- Systèmes faiblement connectés: commande de la tension.

Le tableau III-1 résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique [31].

Tableau III-1 Application des FACTS a la résolution des problèmes dans le réseau [5]

	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC STATCOM	★	★★★	★	★★
TCSC	★★	★	★★★	★★
SSSC	★★★	★	★★★	★★
TCPAR	★★★	★★	★	★★
UPFC	★★★	★★★	★★★	★★★

Les lignes de transport constituent une composante importante du réseau. Elles sont constituées d'impédances série et shunt. L'impédance série peut affecter le maximum de puissance transmise à travers la ligne et l'impédance shunt est à prédominance capacitive. L'impédance série de la ligne, les tensions de départ et d'arrivée ainsi que le déphasage entre les tensions, déterminent la puissance transitée.

Les FACTS sont utilisés afin de changer les paramètres série et shunt ainsi que le déphasage des tensions d'arrivées des lignes de transport dans le but de contrôler l'écoulement de puissance [34].

Voici quelques avantages des dispositifs FACTS :

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité du système énergétique (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique

V. D-STATCOM :

En anglais « Distribution Static Compensator » c'est une STATCOM appliquée en moyenne tension [44].

V.1. Hypothèse simplificatrices :

La modélisation de D-STATCOM s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices suivant :

- ⇒ Tous les interrupteurs sont supposés idéals ;
- ⇒ Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées ;
- ⇒ Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que la fondamentale ;
- ⇒ L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance L_p [45].

V.2. Modélisation de D-STATCOM :

V.2. 1. Modèle Mathématique Simplifié :

Le D-STATCOM, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure III.9 en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecte ce dispositif: Pour le modèle simplifié du D-STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur.

Le courant du D- STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du D-STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a [38]:

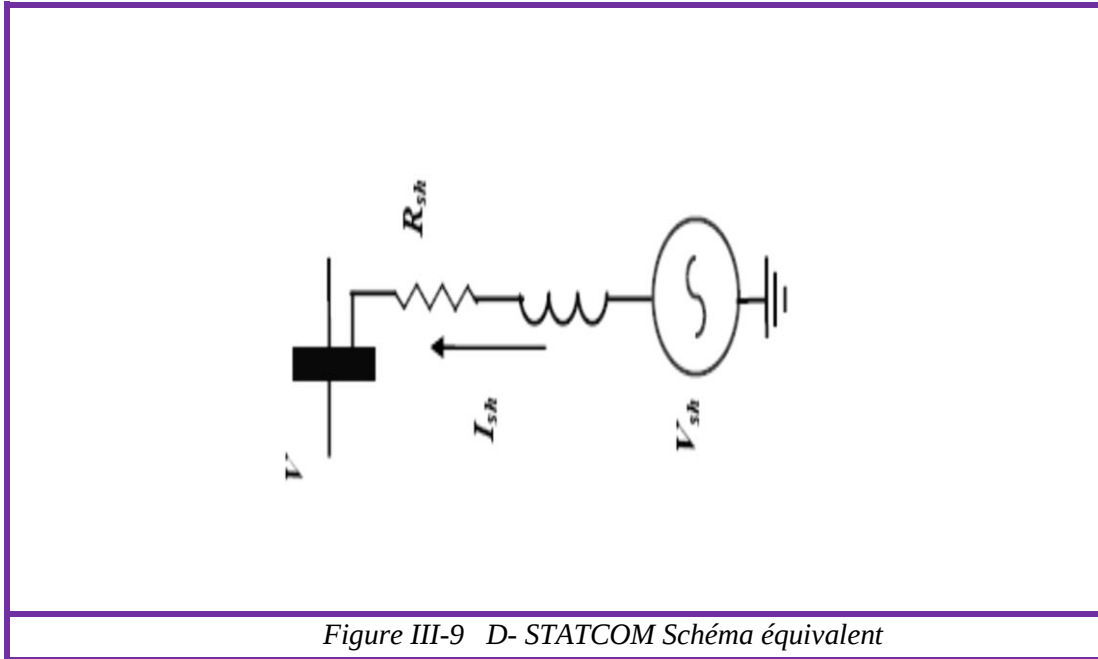


Figure III-9 D- STATCOM Schéma équivalent

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où les grandeurs en triphasé sont:

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bch} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bch} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe en multipliant l'équation(III. 2) par la matrice de la transformation de **CLARK** suivante:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{3} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tout les grandeurs par le phasor $e^{-j\gamma}$ avec $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$ la pulsation des grandeurs en question voir la (figure III-10).

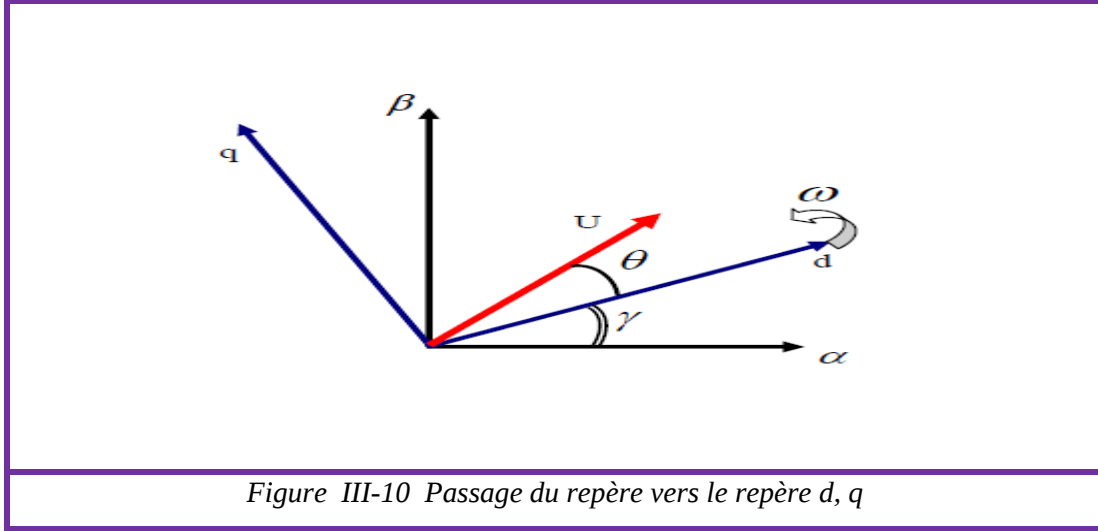


Figure III-10 Passage du repère vers le repère d, q

Donc :

$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} e^{-j\gamma}$ Et inversement $\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} e^{j\gamma}$ En appliquant cette écriture sur l'équation (III.1) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \cdot \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (III.4)$$

Après simplification de calcul en aboutit aux équations dynamiques du D-STATCOM dans le repère (d,q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} \cdot I_{shd} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad (III.5)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} \cdot I_{shq} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad (III.6)$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du D- STATCOM comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

V.2.2. Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petites échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC. Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu [44,45].

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continu (Figure III.11).

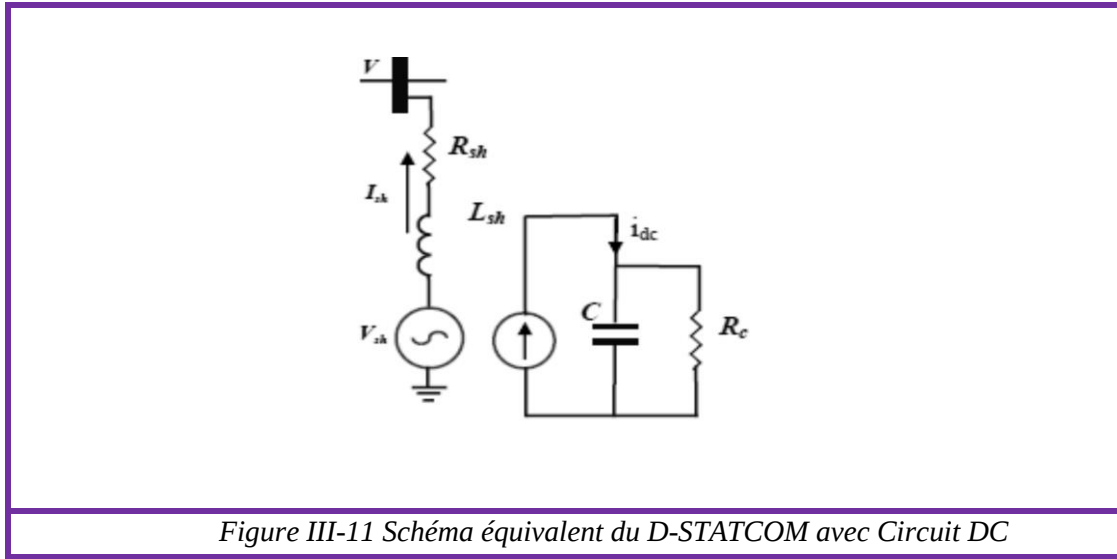


Figure III-11 Schéma équivalent du D-STATCOM avec Circuit DC

On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = v \cos \theta + jv \sin \theta \quad (\text{III.8})$$

v : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimé par:

$$v = m * U_{dc} \quad (\text{III.9})$$

m : est l'indice de modulation il ne dépend que du type de l'onduleur. En substituant les équations (III.8) et (III.9) dans les équations (III.4) et (III.3) on aboutit aux équations:

$$V_d - m U_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \omega I_{shq} \quad (\text{III.10})$$

$$V_q - m U_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \omega I_{shd} \quad (\text{III.11})$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (III.12) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (III.13):

$$P_{sh} = \frac{3}{2}(V_{shd} \cdot I_{shd} + V_{shq} \cdot I_{shq}) \quad (III.12)$$

$$U_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{3}{2}(V_{shd} \cdot I_{shd} + V_{shq} \cdot I_{shq}) \quad (III.13)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " i_c " et le courant résistif " i_{rc} " dans la branche de la résistance R_{dc} .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (III.14)$$

De ces équations (III.8-9-13 et 14) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du D-STATCOM comme suit :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}m(I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (III.15)$$

Les équations (III.10-11-15) forment le système d'équation d'état du **D- STATCOM** en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & w & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -w & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos \theta & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \sin \theta & -\frac{1}{R_c \cdot C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment.

Ce système qu'on doit linéaires autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & w & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -w & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos \theta_0 & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_c \cdot C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} (I_{shd} \sin \theta_0 + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

Le courant réactive est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue U_{dc} constante.

V.3. Contrôle du D-STATCOM :

Dans la totalité des applications pratiques le D-STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquence maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^* , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I_{shd}^*, I_{shq}^*) sont donc les grandeurs de références du D-STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées [43].

V.3.1. Détermination des Références :

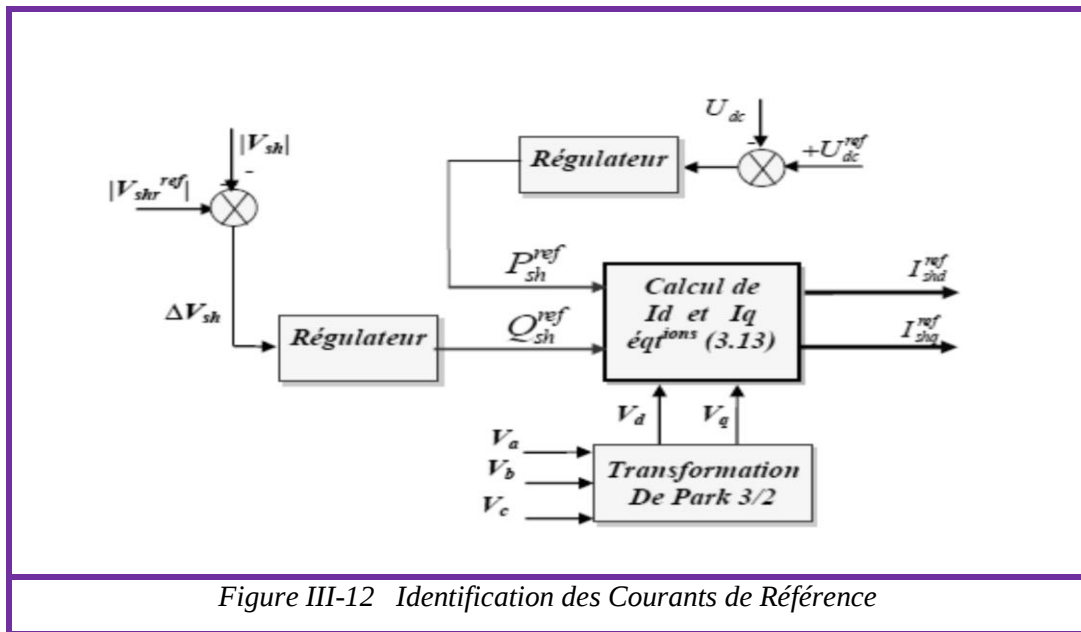
Les puissances injectées par le D-STATCOM sont la puissance réactive Q_{sh}^* et la puissance active $P_{sh}^* \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur.

Ces puissances qui sont les images des courants (I_{shd}^*, I_{shq}^*) active et réactive qu'on déterminer depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre.

On peut résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure(III-12) suivante [42,44]:



V.3.2. Régulateur PI avec compensation de pôles :

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du D-STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure suivante (exemple du MATLAB) (Figure III-13) [42,44]:

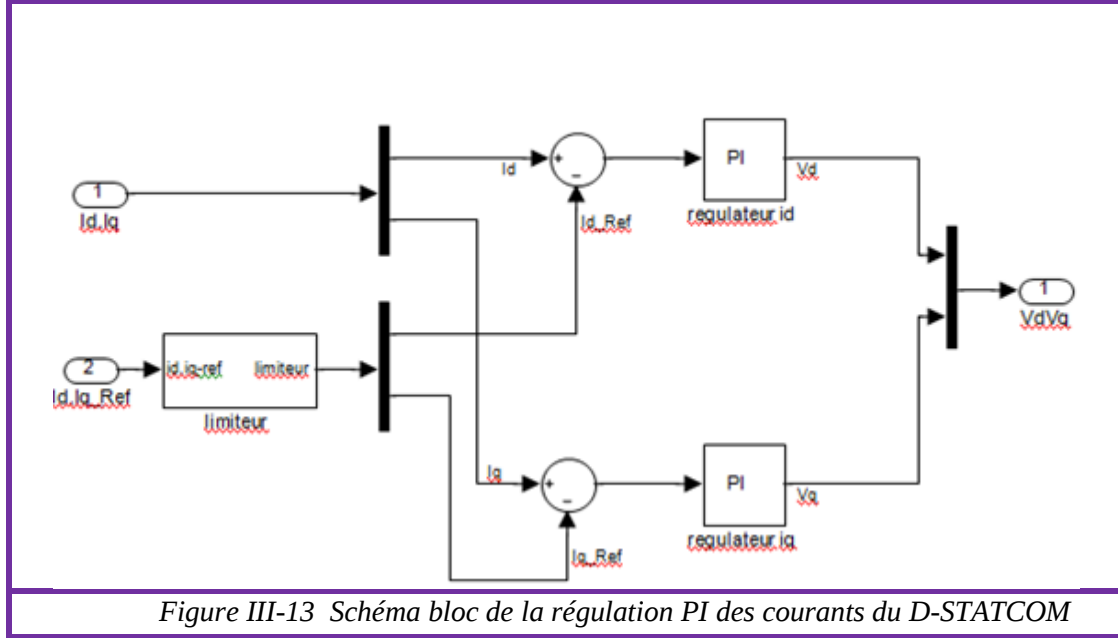


Figure III-13 Schéma bloc de la régulation PI des courants du D-STATCOM

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est:

$$G(s) = \left(Kp + \frac{Ki}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = Kp \left(\frac{s + \frac{Ki}{Kp}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad (III.19)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}}$$

$$\text{Et } G(s) \text{ devient: } G(s) = Kp \left(\frac{1}{s} \right) \quad (III.20)$$

T_{BO} : Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{G(s) + 1} = \frac{Kp}{s + Kp} = \frac{1}{T_{BF}s + 1} \quad (III.21)$$

$$T_{BF} = \frac{1}{Kp} \quad (III.22)$$

Avec T_{BF} est la constante de temps de la régulation en boucle fermée.

En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (III.20 et 21) les gains du contrôleur PI.

$$Kp = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{Et} \quad Ki = Kp * \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (III.23)$$

V.3.3. Régulation de la tension continue U_{dc} :

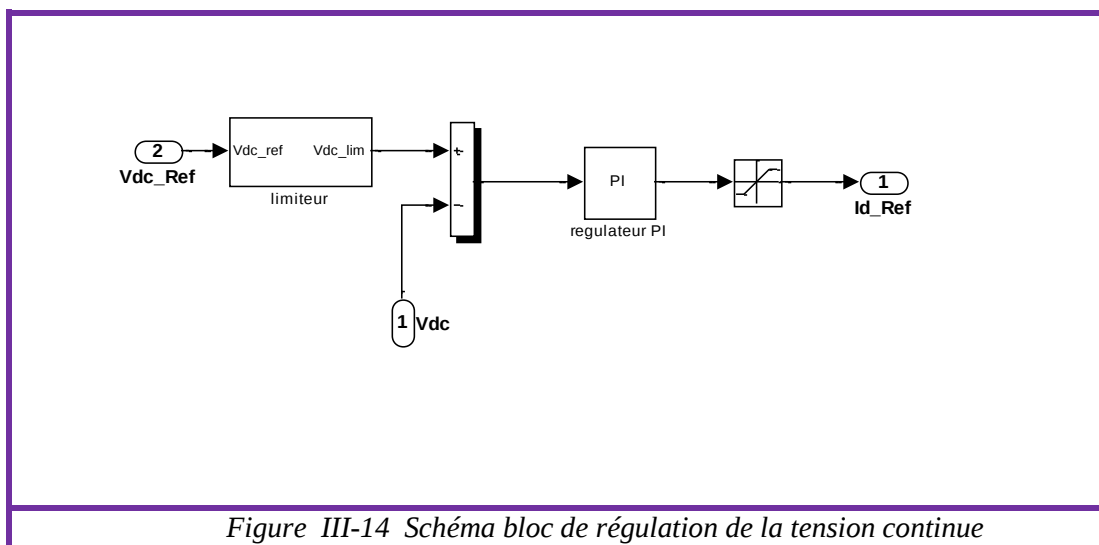
La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du D-STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante [42]:

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 * P_{sh}}{C} \quad (III.24)$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C * s} \quad (III.25)$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique (exemple de MATLAB)



La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est :

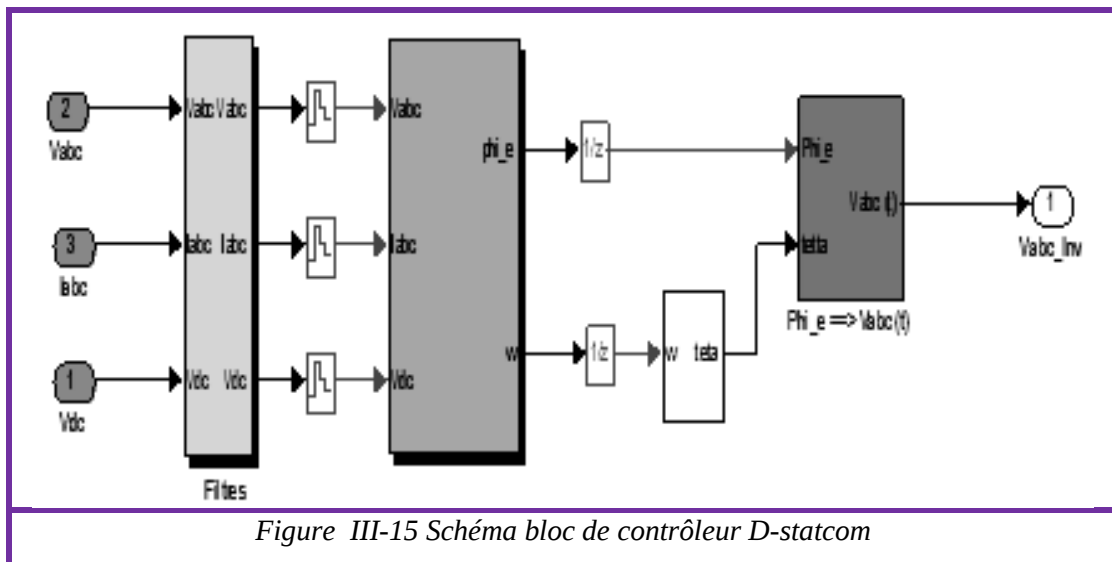
$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{\frac{2Kp}{C}s + \frac{2Ki}{C}}{s^2 + \frac{2Kp}{C}s + \frac{2Ki}{C}} \quad (III.26)$$

$$\text{Avec : } \omega_n^2 = \frac{2Ki}{C}$$

$$\xi = Kp \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot C \cdot Ki}} \quad (III.27)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi $\xi = 0.7$.

finalement on détermine à partir des équations (III.27) les valeurs des gains Kp et Ki .



VI. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté vue globale (overview) sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS, ainsi que leurs applications et avantages.

Aussi nous avons présenté dans ce chapitre des modèles simples pour lesquels nous avons identifié les références de leurs systèmes de commande de dispositif appelé « D-STATCOM ».

Chapitre Quatre

Applications et Simulations

I. Introduction :

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité et la dissymétrie de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquences du continu jusqu'à quelques centaines de hertz [17].

Durant le chapitre I, nous avons présenté les différents perturbations qui existent dans les réseau électriques tels que :

- ✓ Le creux de tension.
- ✓ Fluctuation de la tension (flicker).
- ✓ La pollution harmonique.
- ✓ Les Surtensions
- ✓ Déséquilibre
- ✓

Et d'après le chapitre II on a défini une charge industriel le très polluante c'est le **four à arc électrique** qui a une nature de perturbation stochastique c'est-à-dire il génère presque toutes les perturbations décrit ci-dessus.

II. Présentation du travail :

Dans ce chapitre on fait une application sous l'environnement (MATLAB-SIMULINK) de l'un des dispositifs FACTS « D-STATCOM » connecté en shunt (en parallèle) avec un four à arc électrique « EAF », dont le but est de minimiser les différentes perturbations électriques générées par ce four à arc, et savoir exactement comment le D-STATCOM réagit avec ces phénomènes. Dans le premier cas on commence par la simulation du fonctionnement du four seul c'est à dire sans le D-STATCOM (figure IV-1), et en tirant les différentes allures de tension et de courant en monophasé et triphasé.

Le deuxième cas c'est l'utilisation de D-STATCOM en parallèle avec le four à arc (régime avec D-STATCOM) et on tire les mêmes allures ,afin de faire une comparaison entre les deux régimes de fonctionnement.

Les paramètre du réseau étudié sont rapportés dans le tableau IV-1.

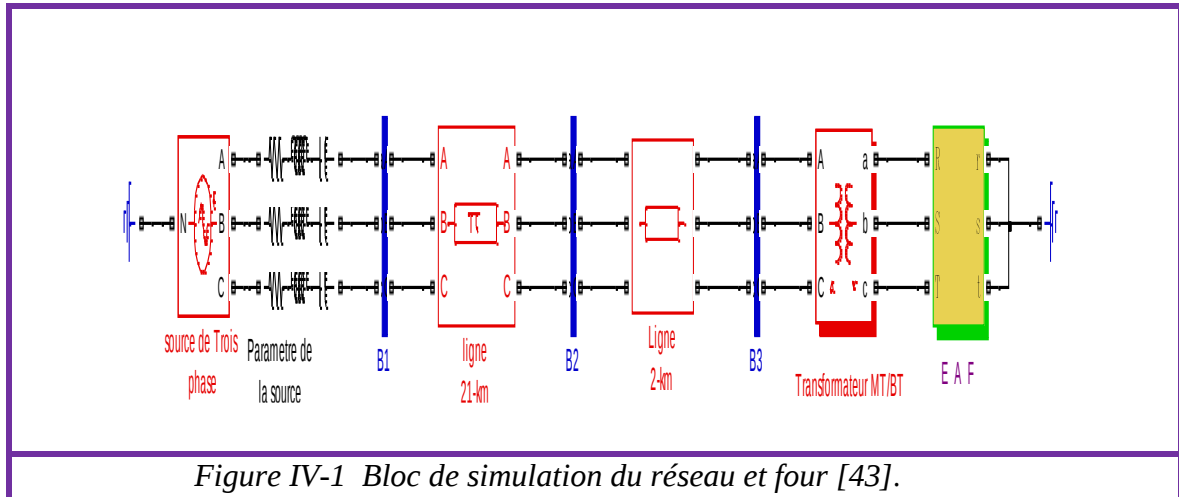


Figure IV-1 Bloc de simulation du réseau et four [43].

Tableau IV- 1 Les paramètres du réseau étudié

Elément	Paramétré
La source " trois phase"	$U_{\text{phase-phase}}=25 \times 1.06 \text{KV}$, $\frac{x}{y}=2.5 \text{Pu}$ $f=50 \text{ Hz}$, $S=1000 \text{MVA}$
Ligne 1	$l=21 \text{Km}$ $R_1=0.1153 \Omega/\text{km}$, $R_0=0.3963 \Omega/\text{km}$ $L_1=1.048 \text{e-}3 \text{H}/\text{km}$, $L_2=2.730 \text{e-}3 \text{H}/\text{km}$ $C_1=11.33 \text{e-}9 \text{F}/\text{km}$, $C_2=5.338 \text{e-}9 \text{F}/\text{km}$
Transformateur "MT/BT"	$S_T=100 \text{ MVA}$, $m=\frac{600}{25000}$ $R_T=0.002 \text{Pu}$, $L_T=0.04 \text{Pu}$, $Y_{\Delta 11}$
Ligne 2	$L=2 \text{km}$

III. Modélisation du système étudié :

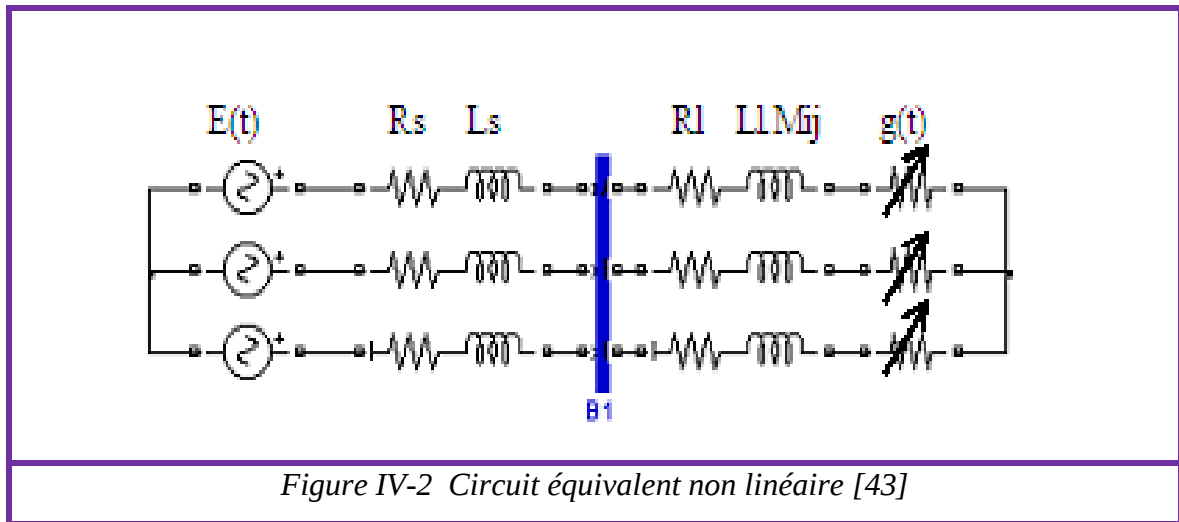
III.1. Modélisation du four :

Plusieurs modèles ont été proposés pour le four à arc pendant ces dernières années dont leur but est de faciliter la tâche de leur simulation et intégration sous l'environnement numérique de l'ordinateur [43,44].

On décrit ici quelques modèles utilisés :

- Modelé basse sur méthode de caractéristiques la tension et le courant.
- Modelé source de tension harmonique.
- Modelé circuit équivalent non linéaire de domaine temps.
- Modelé de traitement stochastique et aléatoire.
- Modelé solution d'équation différentielle non linéaire dans le domaine harmonique [43].

Pour notre application on choisit le modèle du circuit équivalent non linéaire de domaine temps (figure IV-2).



– **Les paramètres du circuit électrique**

$R_{L1}=0.0004 \Omega$, $R_{L2}=0.0004\Omega$, $R_{L3}=0.0004\Omega$, $R_s=0.1m\Omega$

$L_1=15.97 \text{ mH}$, $L_2=15.97 \text{ mH}$, $L_3=15.33 \text{ mH}$, $L_s=1mH$

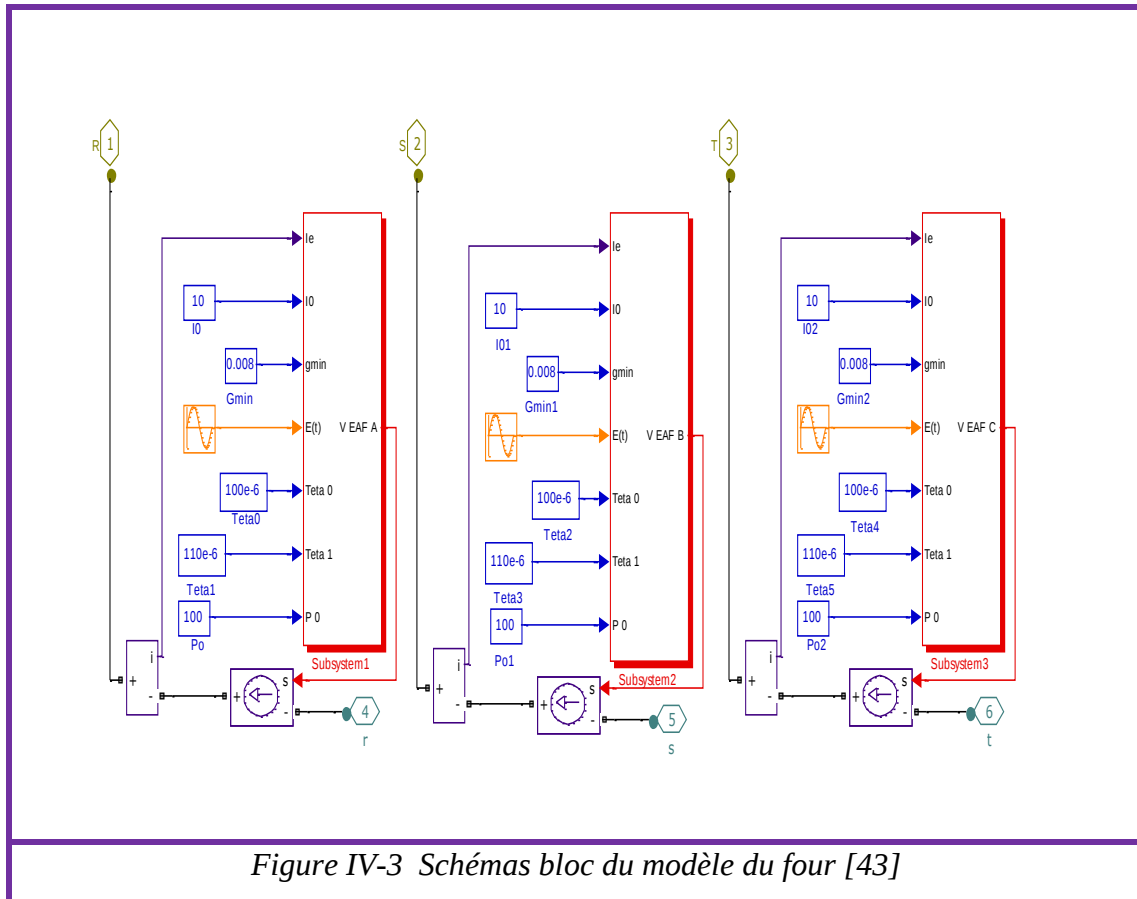
$M_{12}=4.58 \text{ mH}$, $M_{13}=3.89 \text{ mH}$, $M_{23}=4.58mH$,

– **L'expression de la résistance d'arc électrique [45]**

$$g(t) = g_{\min} + \left(1 - \exp\left(-\frac{i^2}{i_o^2}\right)\right) \frac{v_i}{E_o^2} + \left(\exp\left(-\frac{i^2}{i_o^2}\right)\right) \left(\frac{i^2}{p_o} - \theta \frac{dg}{dt}\right) \quad (\text{VI-1})$$

$\theta_0=0.000110$, $E_o=200V$, $\theta_1=0.000100$; $p_o=100$; $i_o=10$; $g_{\min}=0.008$

D'après le modèle mathématique choisi, on peut faire leur simulation sous l'environnement SIMININK comme suit (figure IV.3).

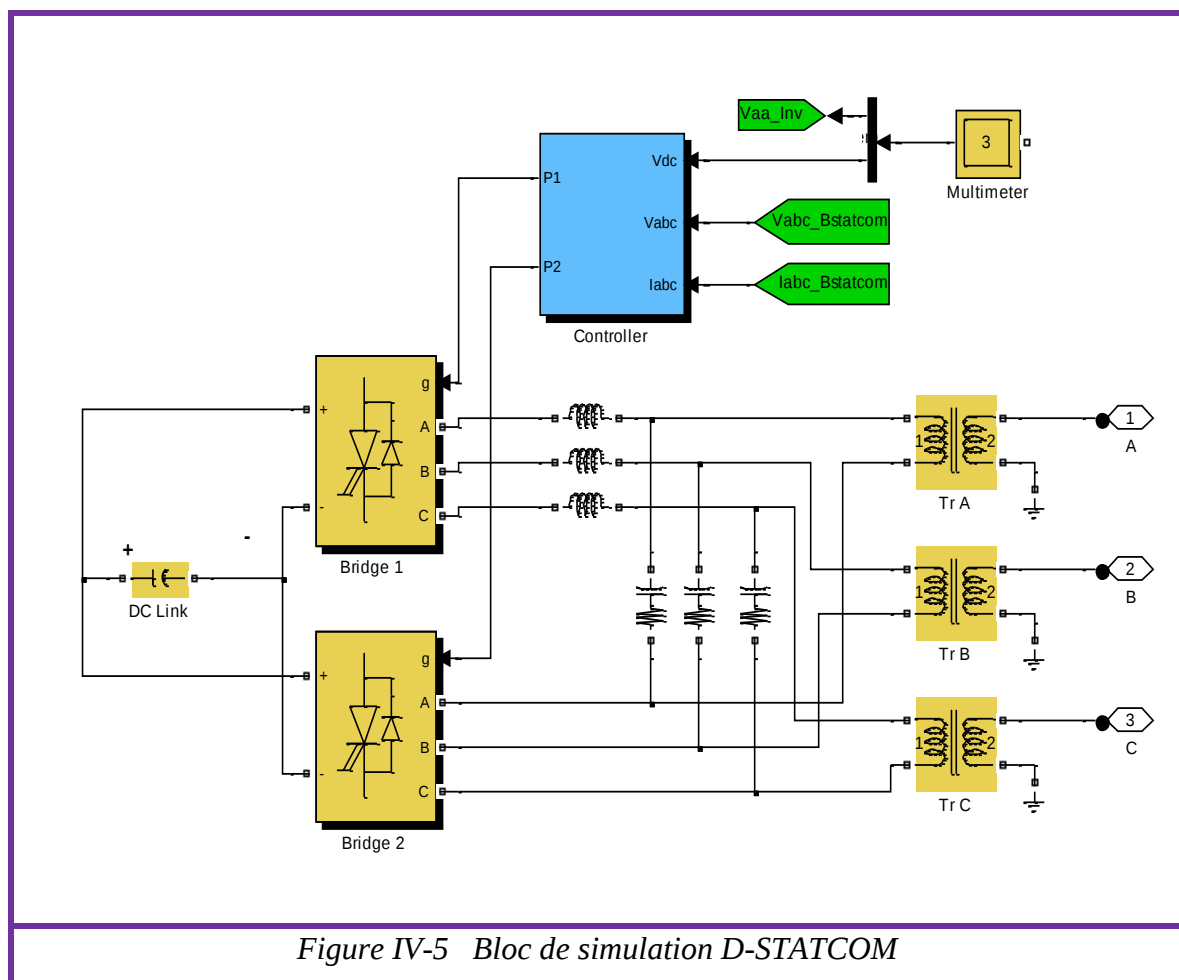
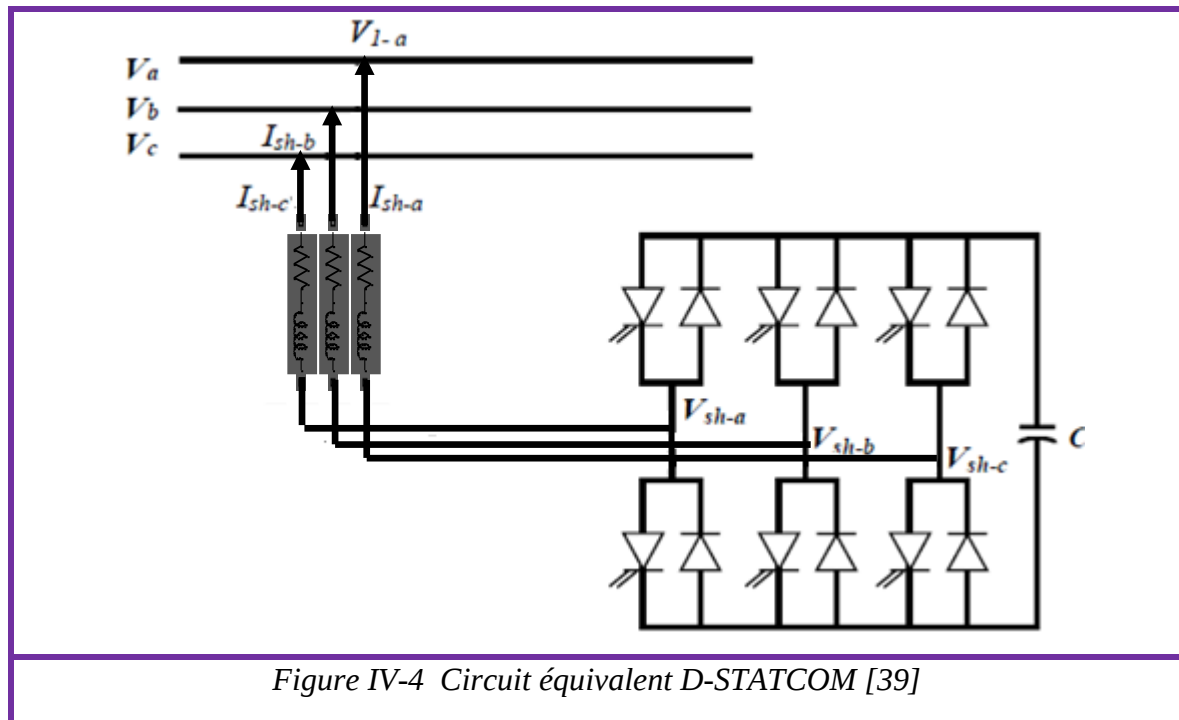


III.2. Modélisation du D-STATCOM

On utilise le modèle qui définit par les lois de fonctionnement et de commande développées dans les chapitre III.

La figure (IV-4) représente le schéma de base d'un D STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de D-STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [43,45].

La figure IV-5 représente le bloc de simulation D-STATCOM .



III.2.1. Test de fonctionnement du D-STATCOM :

La tableau IV-2 représente les paramètres de D-STATCOM .

Tableau IV-2 Les paramètres de D-STATCOM [30,45]

L'élément	Paramétré	L'élément	Paramétré
Résistance et capacité longitudinal	R=9.42e-004 C= 100e-6 F	Transformateur " MT/ HT "	Pn(VA) fn(Hz)=[3e6 50]
Inductance transversal	L=800e-6 H		$R_1=R_2=0.0001, \Omega$
DC –link	C=10000e-6 F		$L_1=L_2=0.3H$ $V_1/V_2(rms)=1250/14434$
D-STATCOM	$V_{ref} = 1.0pu$	Control	Régulateur Vac
		D-STATCOM	Ki,Kp =2500,0.55
			Régulateur Vdc
			Ki,Kp= 0.001,0.15
			Régulateur de courant
			Ki,Kp,Kd 0.8,200,0

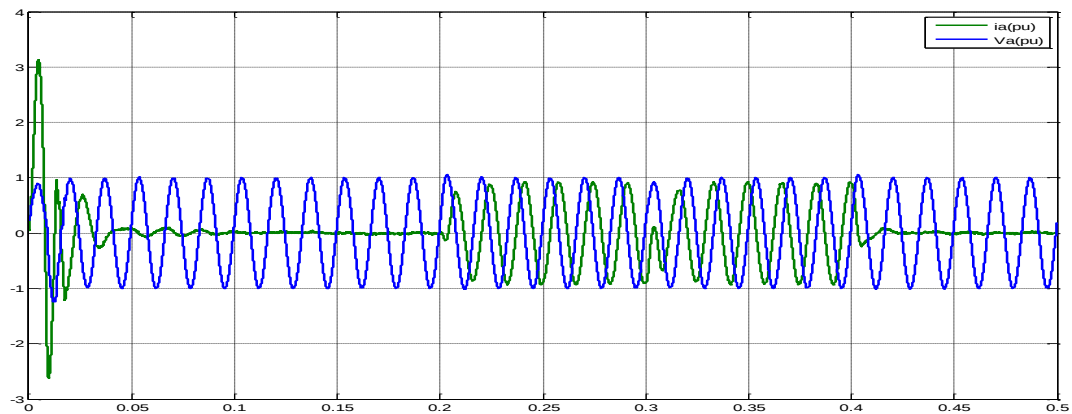
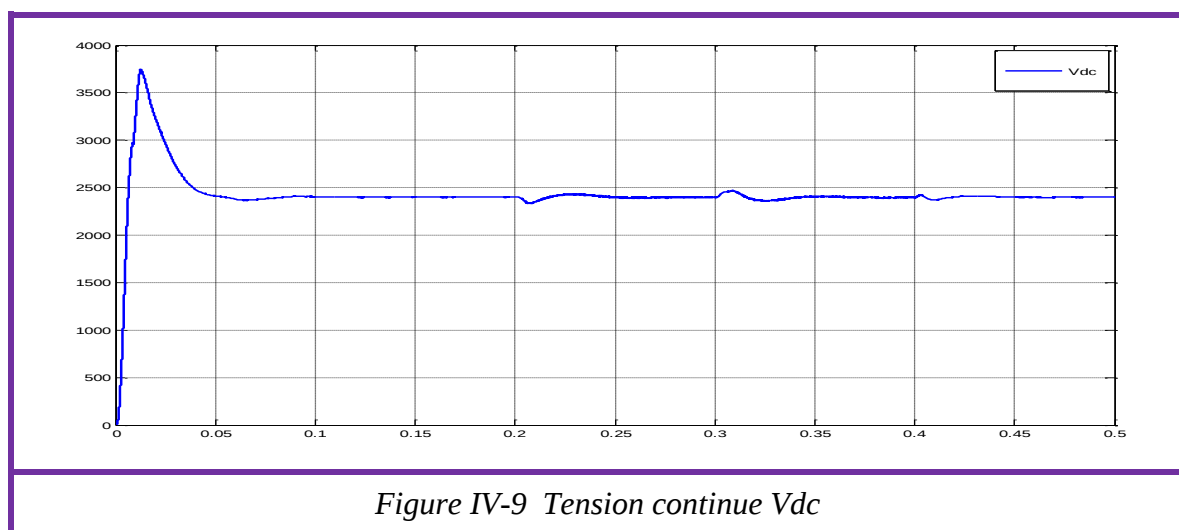
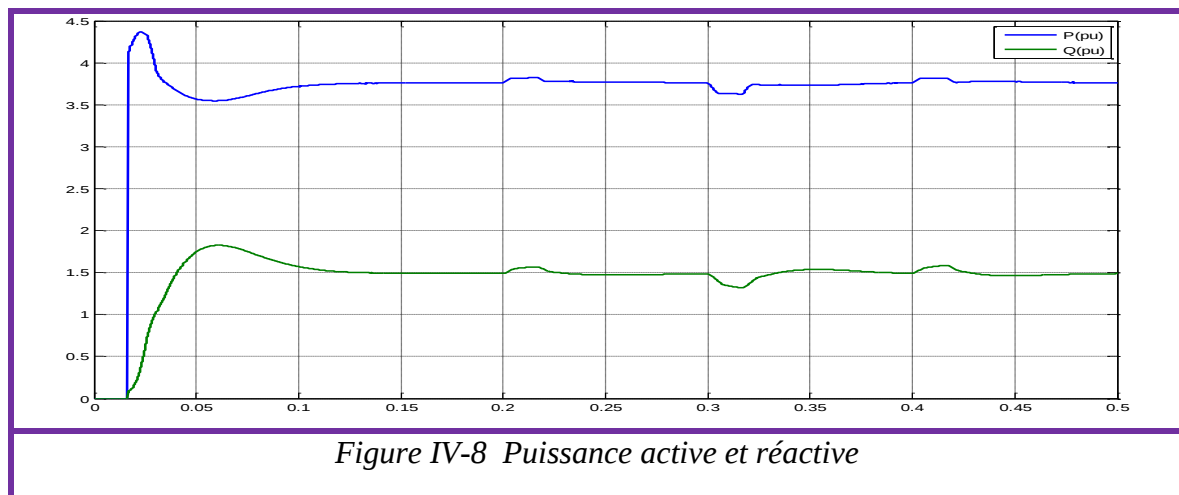
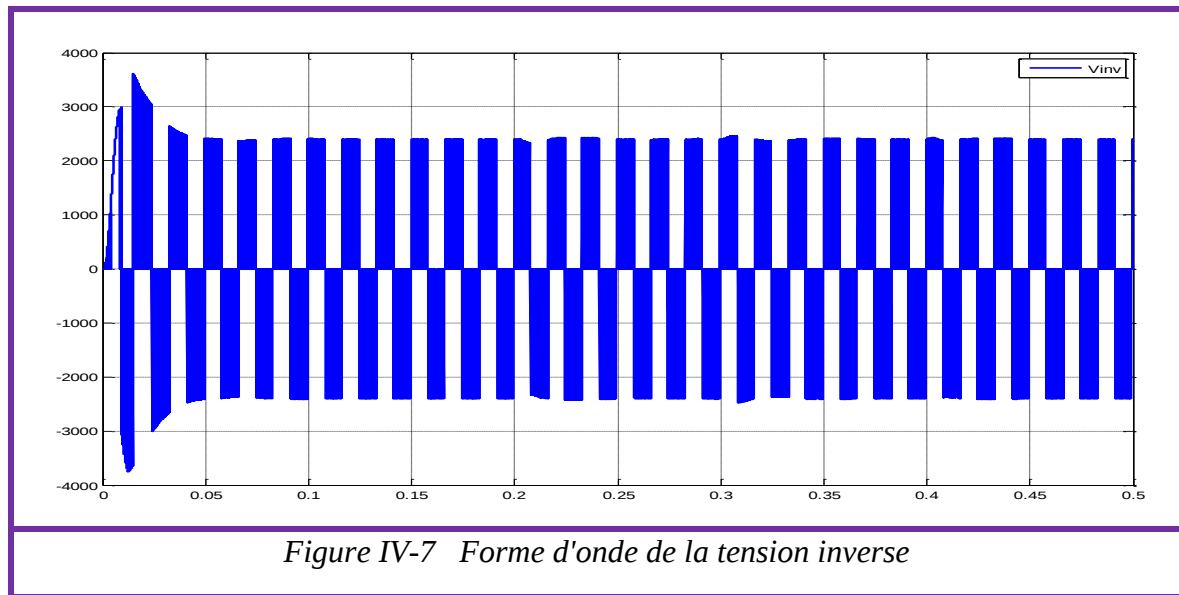


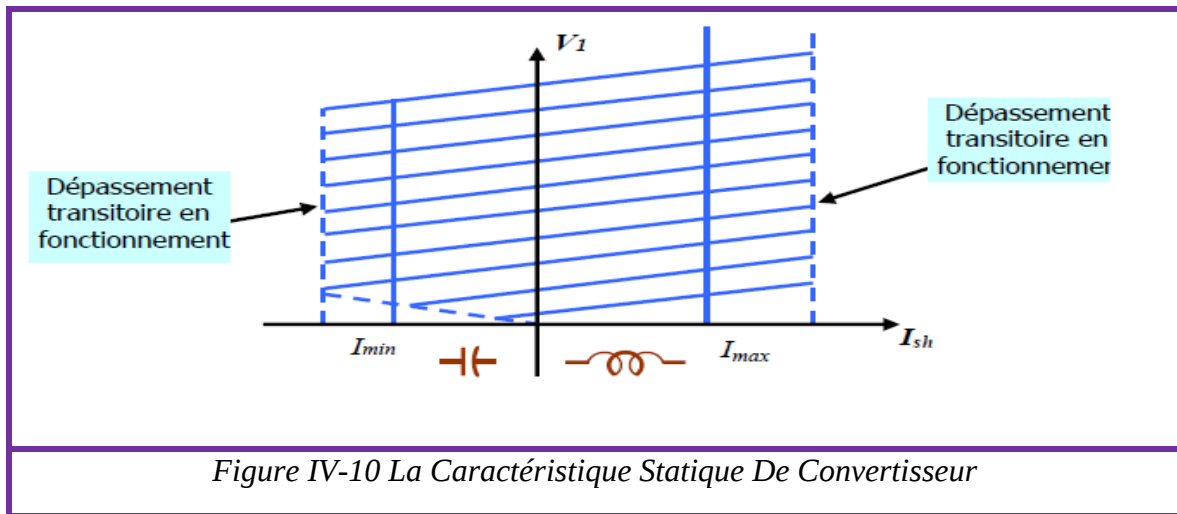
Figure IV-6 Courant et tension monophasé générée par D-STATCOM



III.2.2. Commentaires :

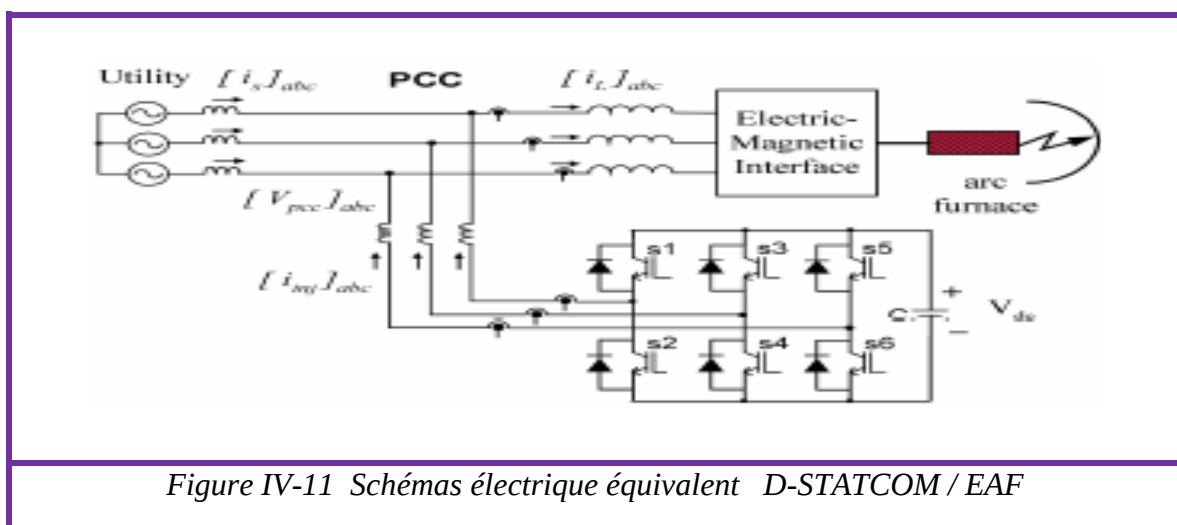
Les figures (IV-6 et IV-7) montrent les allures de la tension et de courant lors du passage du fonctionnement inductif au fonctionnement capacitif qui nous donne la caractéristique statique de dispositif étudié (la figure IV-10).

La figure IV-8 montre les résultats pour la puissance active et réactive, ce qui montre que le D-STATCOM peut être travaillé comme un générateur de puissance réactive (capacité) ou comme un consommateur de la puissance réactive (réactance). Voir la (figure IV-10).

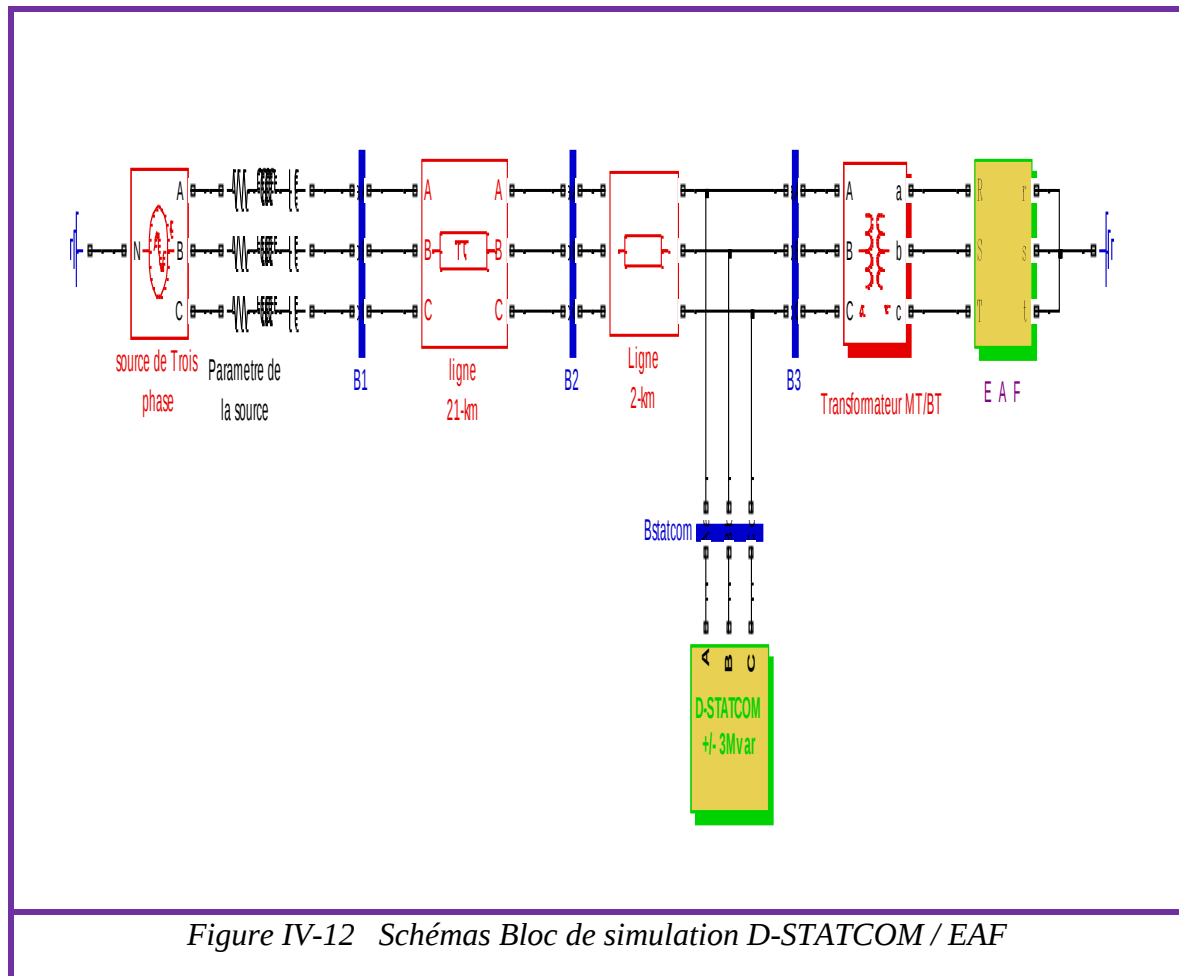


III.3. Modélisation Four /D-STATCOM :

La figure IV-11 montre le schémas électrique triphasé de l'ensemble four à arc / D-STATCOM



La figure IV-12 montre le schémas bloc de simulation de l'ensemble four à arc D- STATCOM



V. Résultats de simulation :

On lance la simulation correspondante à la figure IV.12 dans les deux cas :

- ❖ Sans D-STATCOM « Régime de fonctionnement du four à arc seul »
- ❖ Avec D STATCOM « Régime après la connexion du D-STATCOM avec le four à arc .

Dans les deux cas , les résultats obtenus sont tirés au niveau de **jdb B₃**

V.1. Simulation sans D-STATCOM :

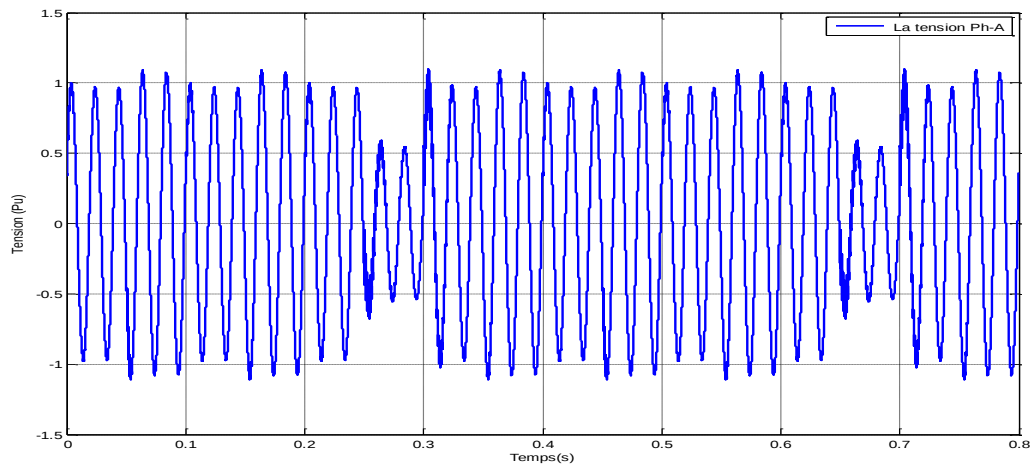


Figure IV-13 L'allure de tension V_a sans D-SATATCOM

- On fait un zoom sur la figure IV-13 , on obtient la figure IV-14 qui montre clairement l'apparition du phénomène du creux de la tension.

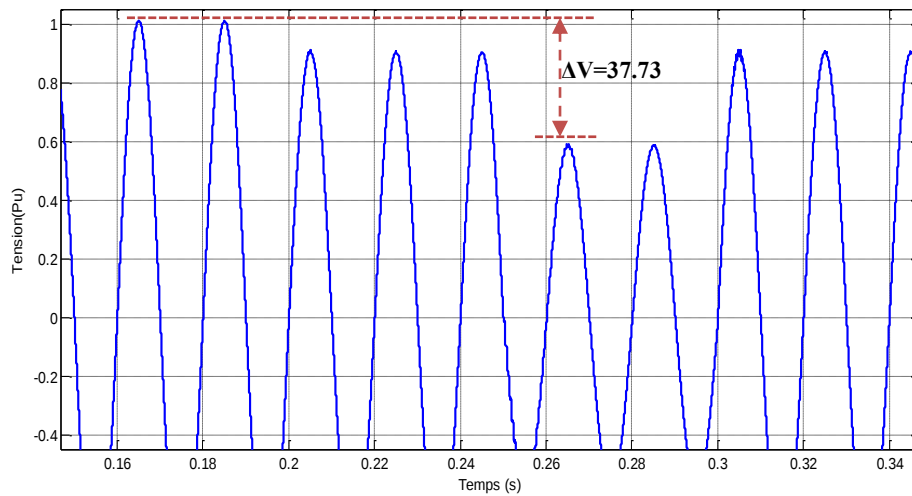


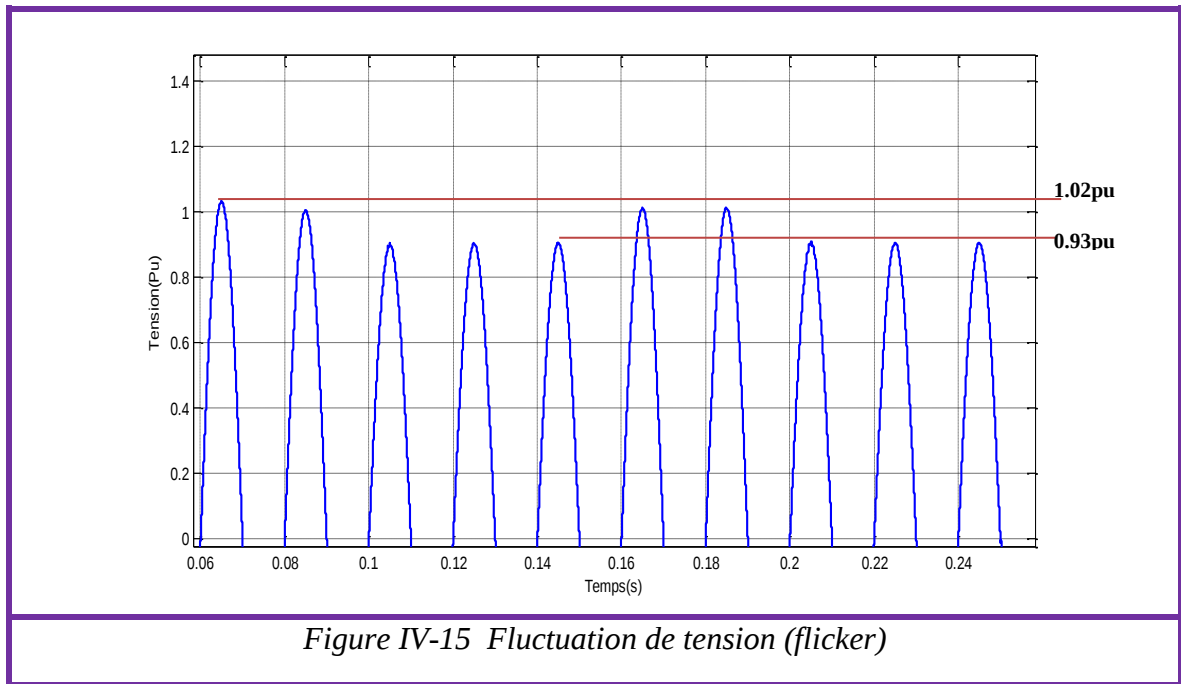
Figure IV-14 Creux de la tension

▪ **Calcule le creux de tension**

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right) \% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100 \quad (\text{IV.2})$$

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right) \% = \frac{1 - 0.6}{1.06} \times 100 = 37.73\%$$

D'après le même zoom on voit clairement un autre phénomène très impressionnant c'est la fluctuation de tension.



Le facteur du fluctuation $\left(\frac{\Delta u}{u_n}\right)$ au niveau du PCC peut être calculer à partir de la formule suivant :

$$\frac{\Delta u}{u_n} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100\% \quad (IV.3)$$

Avec :

- $U_{\max}$: valeur de tension maximum au niveau PCC.
- $U_{\min}$: valeur de tension minimum au niveau PCC.
- U_n : valeur de tension estimer au niveau PCC.

$$\frac{\Delta u}{u_n} = \frac{1.02 - 0.93}{1.06} \times 100\% = 8.49\%$$

- Un autre zoom plus approfondie de la figure IV.13 montre un grand dépassement de la tension, c'est le phénomène du surtension transitoire .

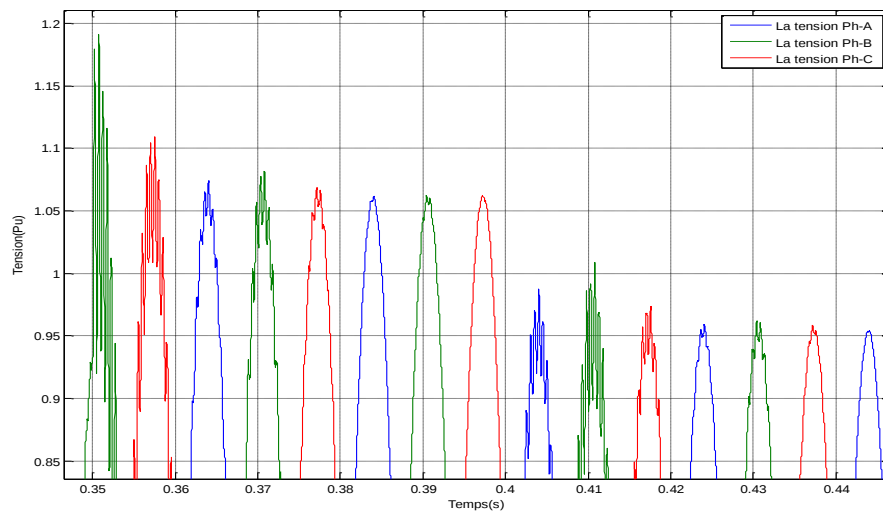
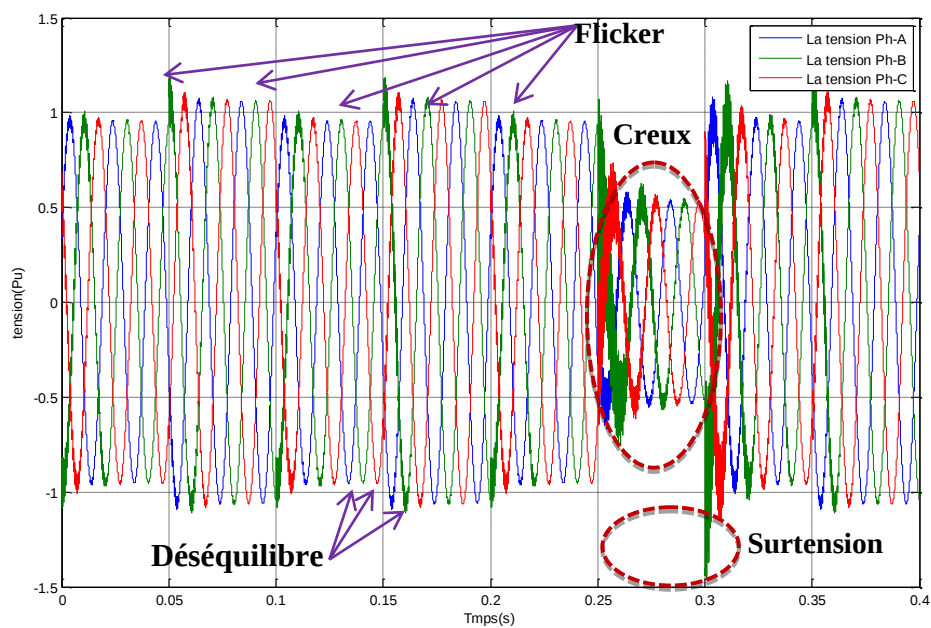


Figure IV-16 Surtension transitoire

➤ **Résumé les phénomènes liée à la tension**

Figure IV-17 L'allure des trois tensions V_a , V_b et V_c

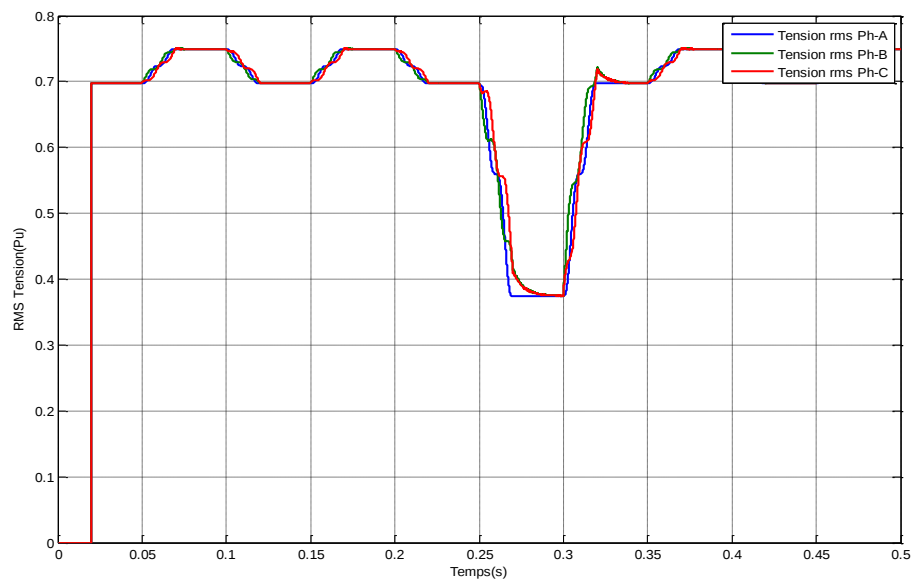


Figure IV-18 L'allure des trois tensions (rms) V_a , V_b et V_c sous D-SATATCOM

➤ **Phénomènes liée la forme d'onde du courant**

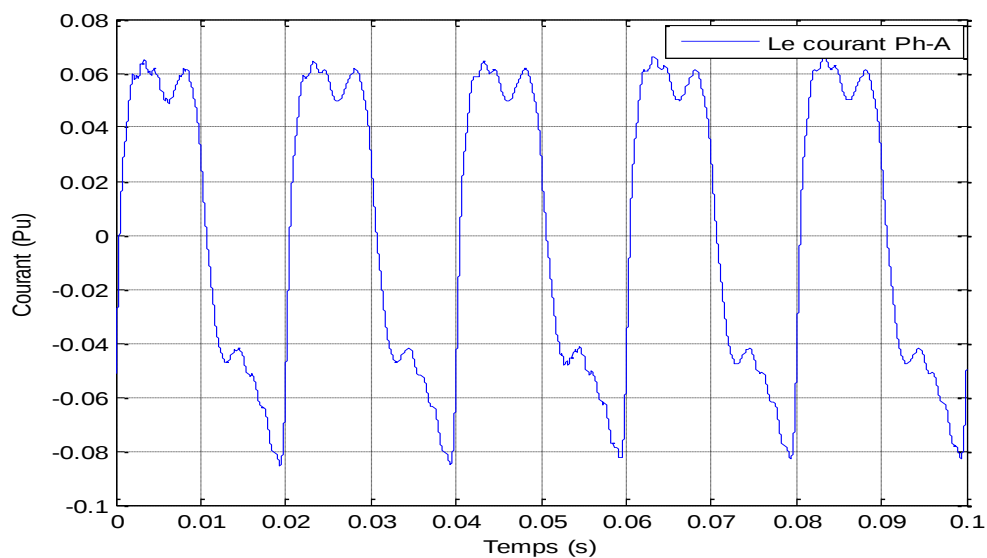


Figure IV-19 L'allure de courant en étape de fusion

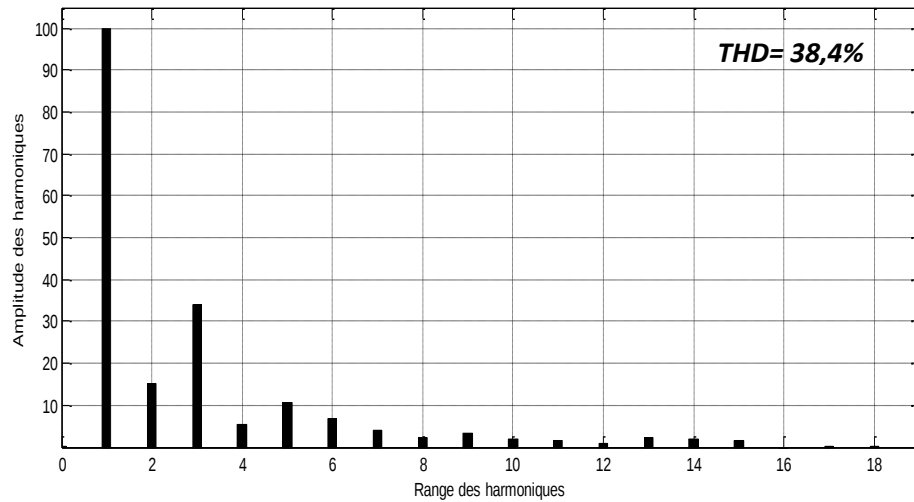
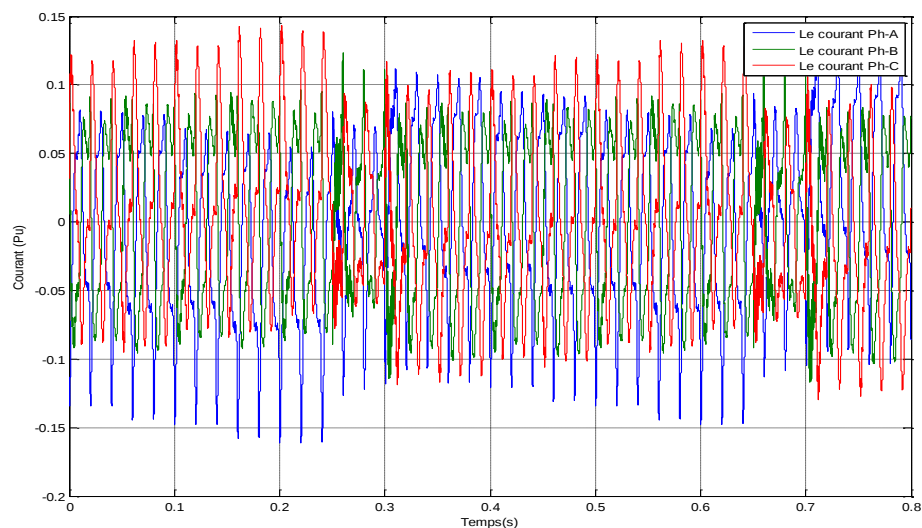


Figure IV-20 Spectre d'harmonique du four en étape de fusion

Tableau IV-3 Harmoniques générées par le four à arc

Rang harmonique	2	3	4	5	6	7	8
I_h [%]	14.45	32.62	5.1	10.04	6.56	3.59	2.22
Rang harmonique	9	10	11	12	13	14	15
I_h [%]	3.19	1.69	1.34	0.71	2.28	1.69	1.6

Figure IV-21 Les allures instantanées des courants i_a , i_b et i_c

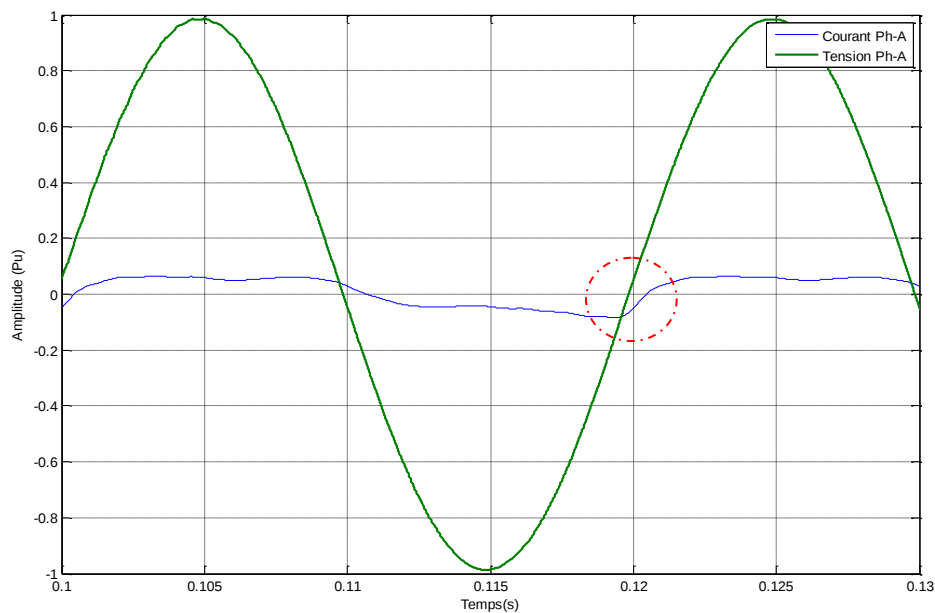


Figure IV-22 Déphasage entre la tension et le courant

L'existence de ce déphasage « $\varphi = 18^\circ$ », montre clairement que il y un surplus de la puissance réactive.

IV.2. Analyse des résultats de simulations :

D'après les résultats obtenues on peut dire que le fonctionnement du four à arc surtout pendant la phase de fusion provoque plusieurs perturbation (flicker , creux de tension , surtension , déséquilibre et les harmoniques....) comme montrées sur les figures (IV-15 à 23) puisque que :

- En début du cycle de fusion l'arc pose les grands problèmes ; en effet, dans cette phase la charge métallique perturbe le fonctionnement de l'arc par ses mouvements et son hétérogénéité physique. Cela se traduit par des variations de la tension d'arc pouvant aller jusqu'à des courts circuits ou des interruptions de fonctionnement (extinction d'arc). Les extinctions, les courts-circuits et les variations de tension d'arc, se traduisent par **des fluctuations** de la puissance transmise à la ferraille à fondre.
- Aussi pendant la fusion des ferrailles, les amplitudes des tensions d'arc sont souvent très différentes. Cette dissymétrie entraîne des **fluctuations** de puissance active et réactive. Ces fluctuations limitent le transfert d'énergie électrique entre l'alimentation et la charge et par

conséquence la puissance installée de l'alimentation ne peut pas être exploitée complètement.

- L'arc électrique est instable et dissymétrique, donc contient tous les types **d'harmoniques** (pairs impairs).

IV.3. Simulation Avec D-STATCOM :

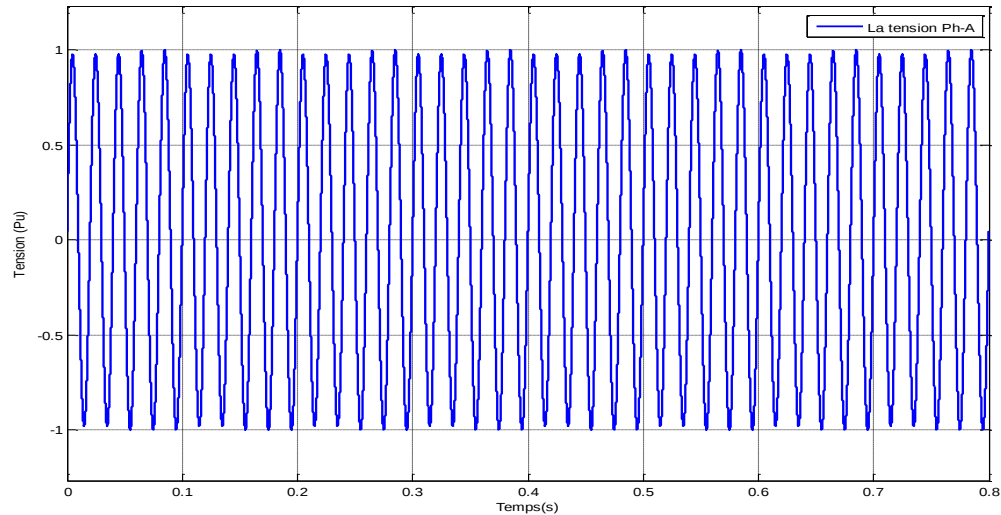


Figure IV-23 L'allure de tension V_a avec D-SATATCOM

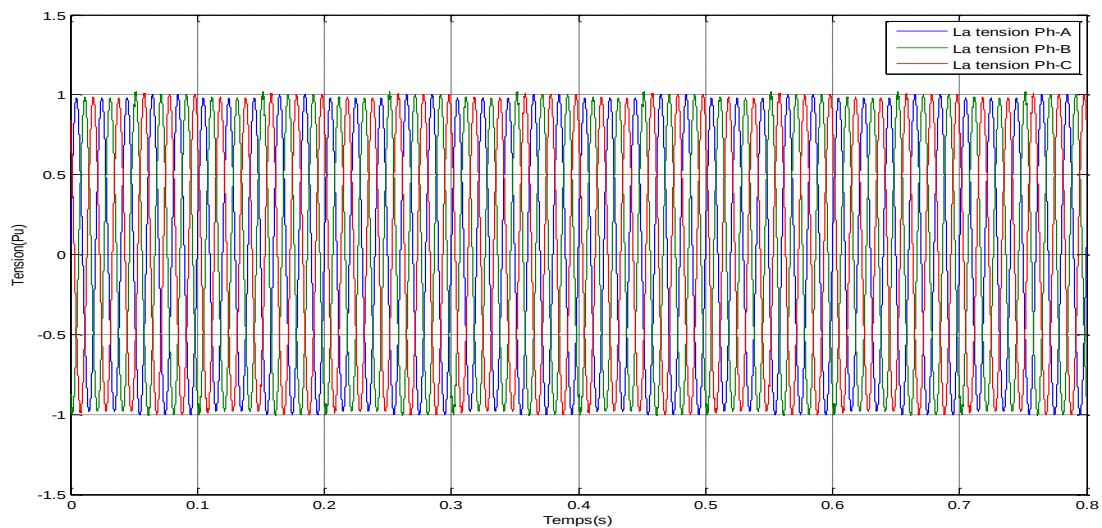
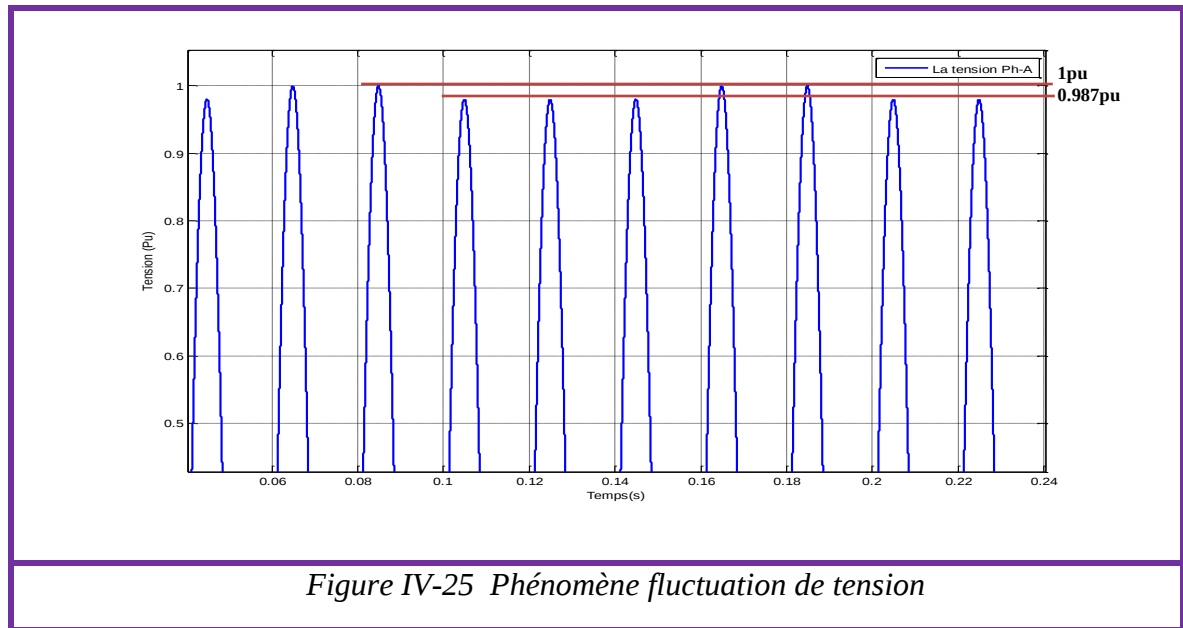


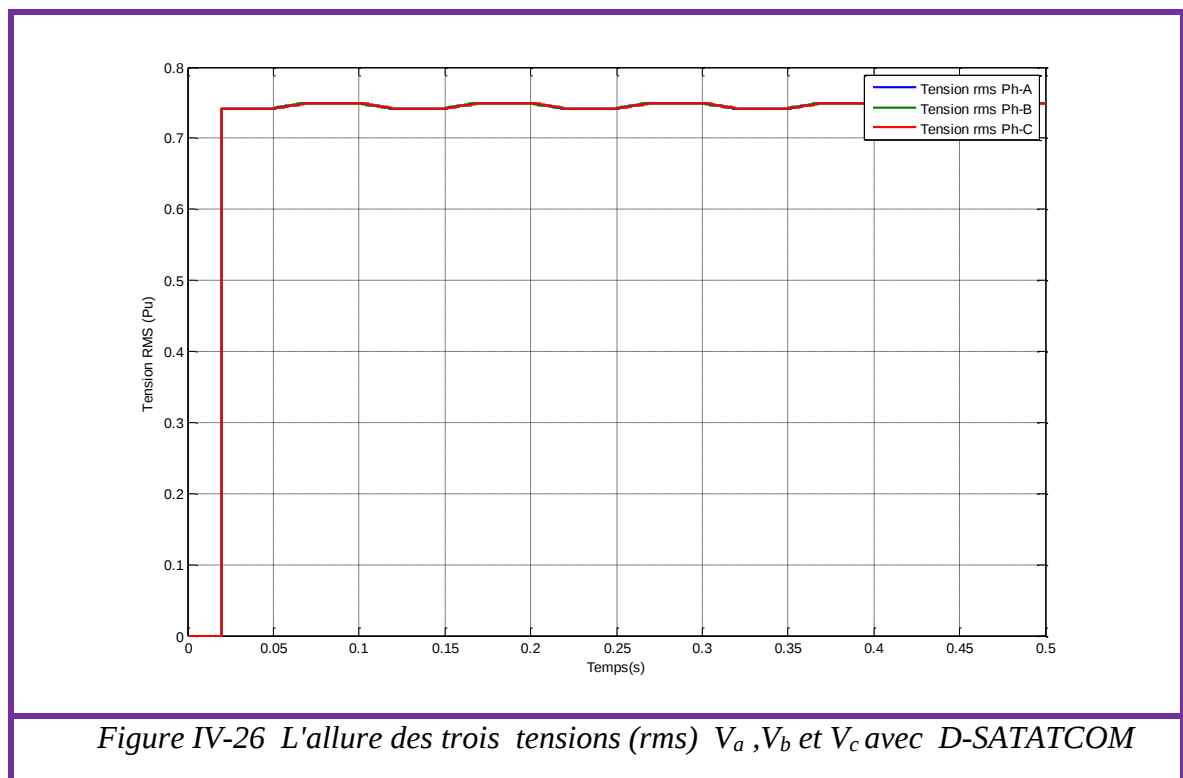
Figure IV-24 Les allures des trois tensions

Zoom sur la figure IV.23 nous donne



- Calcule le taux de flicker :

$$\left(\frac{\Delta U}{U_n} \right) \% = \frac{1 - 0.987}{1.06} \times 100\% = 1.23\%$$



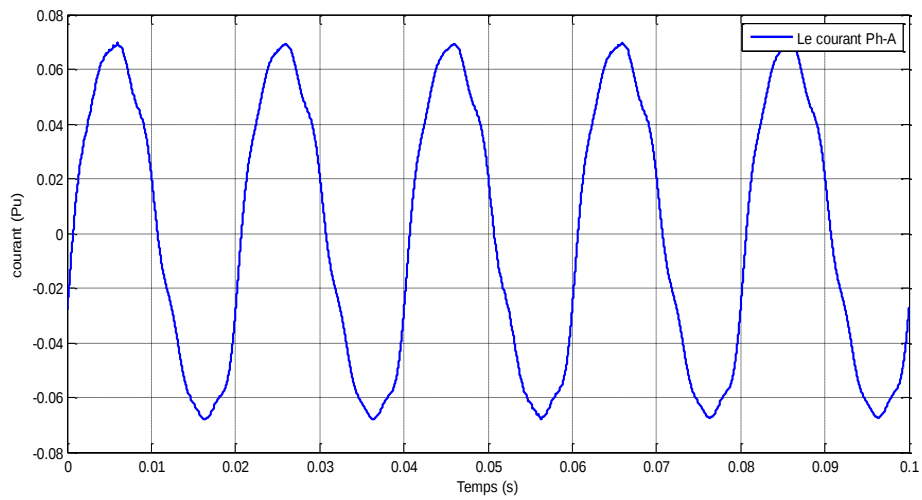


Figure IV-27 L'allure du courant i_a avec D-SATATCOM

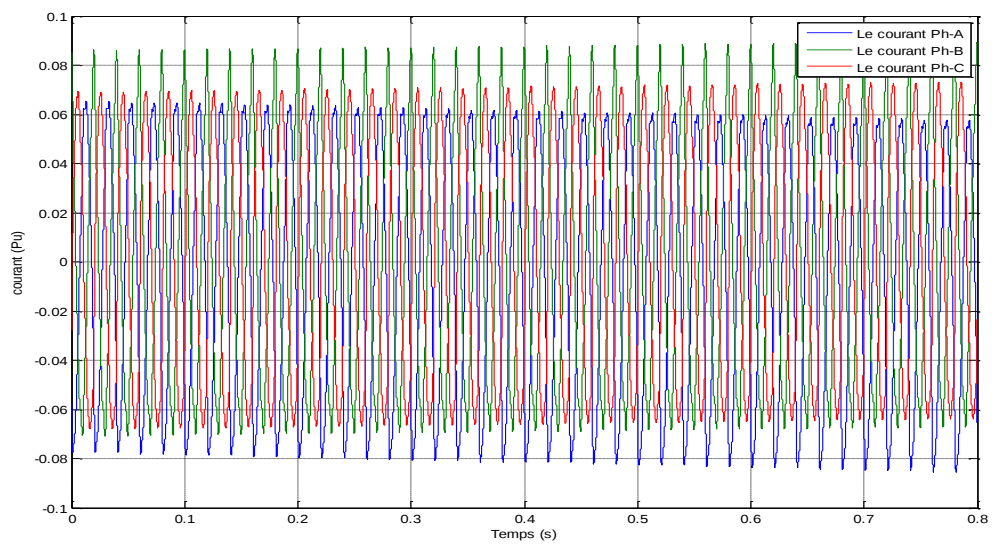


Figure IV-28 L'allure des trois courants

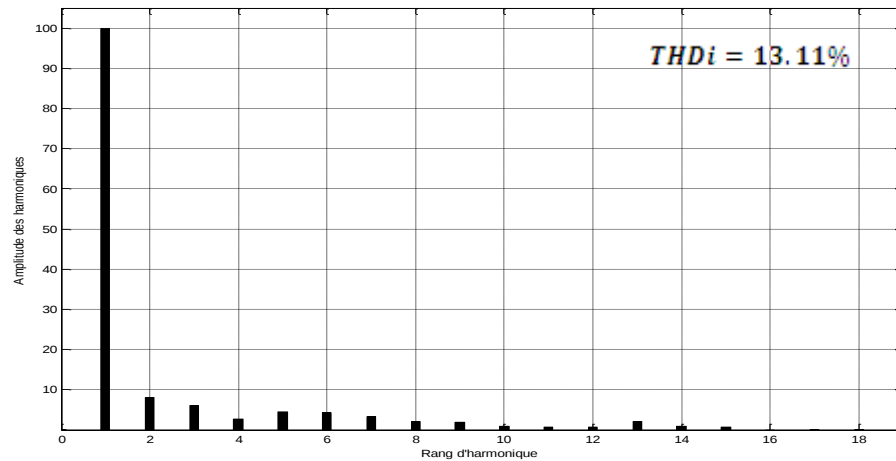
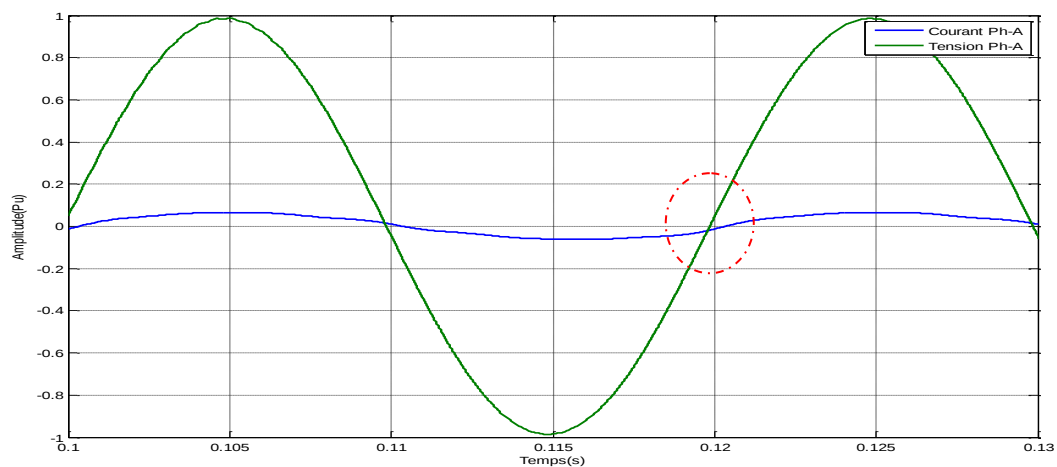


Figure IV-29 Spectre d'harmonique du four avec D-STATCOM

Tableau IV-4 Harmoniques générées par le four à arc avec D-STATCOM

Rang harmonique	2	3	4	5	6	7	8
I_h [%]	7.7	5.8	2.5	4.2	4.06	3.1	1.98
Rang harmonique	9	10	11	12	13	14	15
I_h [%]	1.75	0.82	0.66	0.33	2.09	0.82	0.65

Figure IV-30 Déphasage entre la tension et le courant « $\varphi = 5^\circ$ »

IV.4. Commentaires et discussions :

Après l'utilisation du D-STATCOM on constate que il y a des améliorations sur tous le plan de la qualité d'énergie électrique :

- 1- Compensation le phénomène du flicker à cause du courant réactif injecter par le D-STATCOM de **8,49%** jusqu' à **1,23%** ; donc ce pourcentage est sous la norme (2%).
- 2- Compensation des perturbations harmoniques c' est à dire réduire la valeur du THD de **38,4 %** jusqu' à **13,11%** à cause la puissance réactive générée par le D-STATCOM, qui joue le rôle d'un piège pour harmoniques.
- 3- Compensation de la puissance réactive; on constate une diminution du déphasage entre la tension et le courant de **18°** jusqu' à **5°** (figure IV.22 et 29), et sa revient au double rôle de notre D-STATCOM absorption et génération de la puissance réactive.

V. Conclusion :

A la suite de l'analyse effectuée, on peut constater que le fonctionnement du four à arc a un effet négatif relatif à la qualité de l'énergie électrique « déformation de la forme d'onde, augmentation du THD, flicker , déséquilibre».

L'utilisation du D-STATCOM fait un avantage très important c'est la diminution de phénomène du fluctuations de tension et les autres perturbations , toutefois le niveau de ces fluctuations est ronde dans la norme utilisé , par contre pour les autres perturbations on remarque des grandes minimisation.

Conclusion Générale

Ce travail traite les perturbations électriques générées par les fours à arc (harmoniques, flicker, creux de tension, déséquilibre....) c'est-à-dire leurs origines, effets, conséquences ...etc., et on présente aussi la situation actuelle des réseaux électriques qui est devenue très préoccupante, puisque la qualité de l'énergie électrique délivrée vers les installations industrielle se dégrade incontestablement.

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité, la non linéarité et la dissymétrie de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquence du continu jusqu'à quelques centaines de hertz.

Donc notre but dans ce mémoire est la réduction de ces perturbations, et pour réaliser ce but on utilise une méthode moderne c'est un élément de la famille FACTS appelée D-STATCOM.

Ce dispositif n'échange pas d'énergie active avec le réseau, leur compensation n'est pas faite par des condensateurs connectée directement au réseau ce qui élimine totalement le problème de résonance.

Après l'étude accomplie dans ce mémoire concernant la compensation dynamique dans les réseaux électriques en utilisant les dispositifs FACTS, on peut conclure que l'intégration de cette nouvelle technologie (D-STATCOM) dans la structure des réseaux électriques, permet d'améliorer la qualité d'énergie électrique, et dans notre cas réduire les phénomènes perturbatrices du four à arc tel que : le flicker, les harmoniques et le déséquilibregénéré par le four à arc à courant alternatif.

L'Annexe

Annexe A : Autre charge polluante :

A.1. Le four à arc à courant continu [DC EAF] :

L'alimentation électrique du four à arc à courant continu comporte un système de redressement alternatif/continu, à base de circuits électroniques de puissance ,les harmoniques générée par le DC EAF présente de figure A.1 .

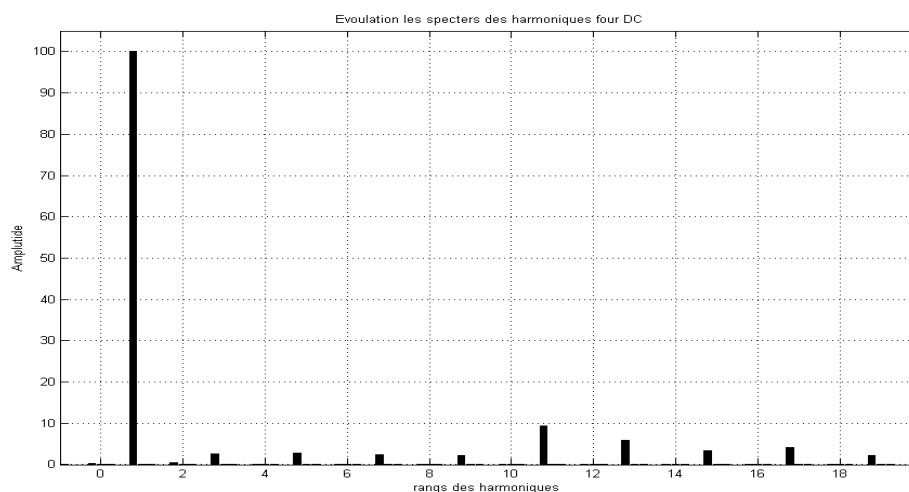


Figure A.1 Les allures des spectres des harmoniques de DC EAF

A.2. Redresseur en pont triphasé à thyristors (Pd3) :

Ci-dessous le schéma global du montage redresseur parallèle double triphasé Pd3

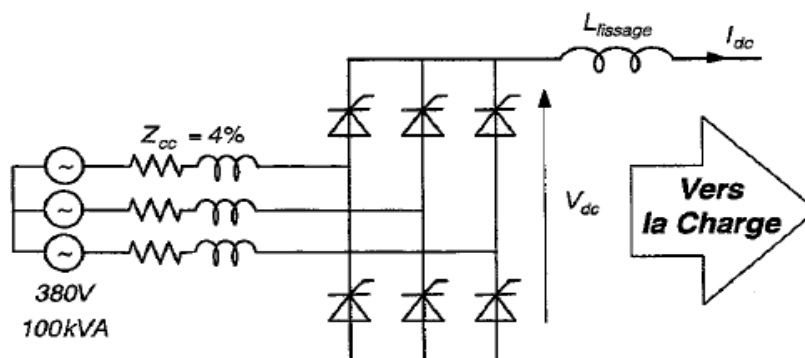


Figure A.2 Schéma du montage redresseur en pont triphasé à thyristors (Pd3)

Les allures des courants Pd3 et spectres des harmoniques :

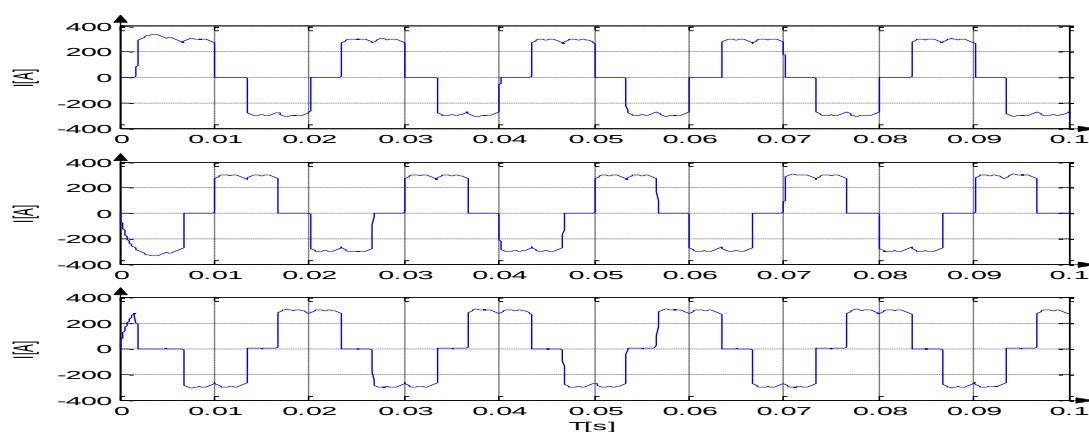


Figure A.3 Les allures des courants Pd3

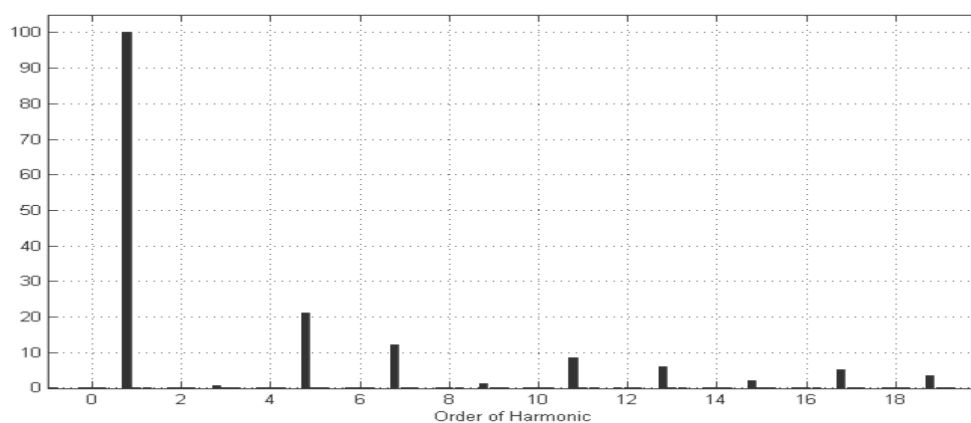


Figure A.4 Les allures des spectres des harmoniques Pd3

A.3. Redresseur dodécaphasé à thyristors (P12) :

Ci-dessous le schéma global du montage redresseur dodécaphasé P12

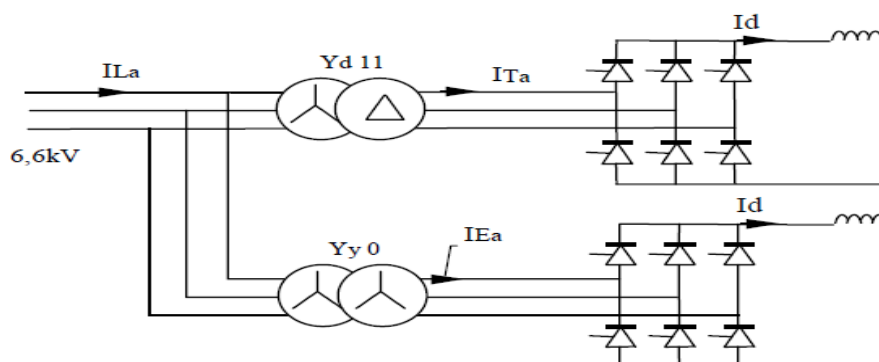


Figure A.5 schéma du montage redresseur dodécaphasé P12

Les allures des courants P12 et spectres des harmoniques :

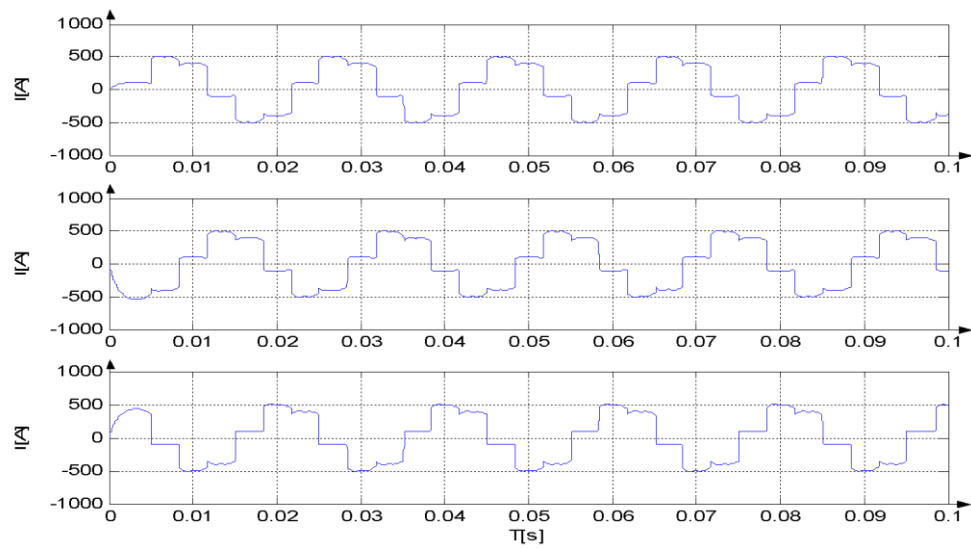


Figure A.6 Les allures des Les allures des courants Pd3

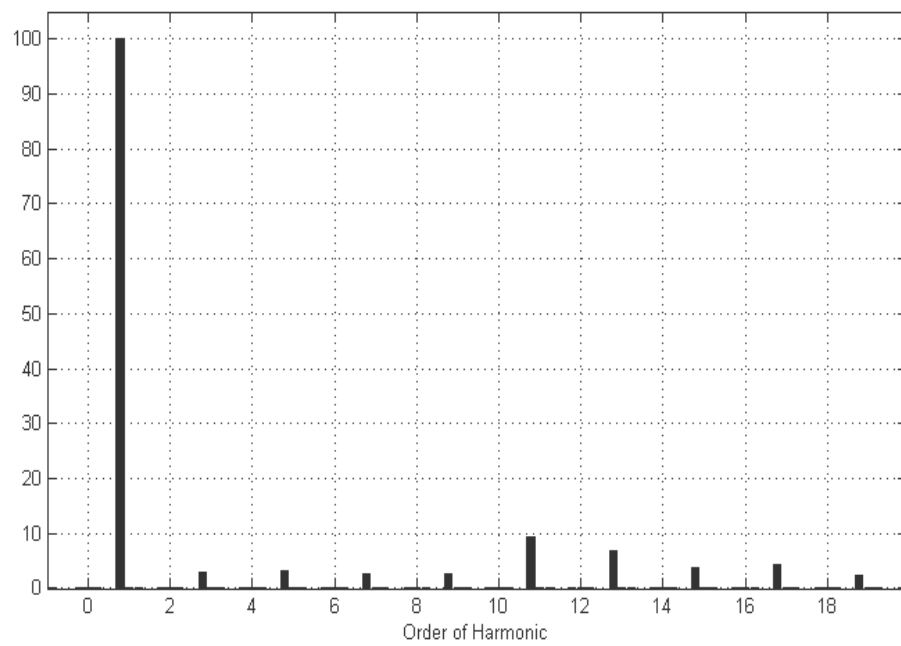


Figure A.7 Les allures des spectres des harmoniques

Annexe B: La solution moderne de dépollution :**B.1. La solution moderne de dépollution :**

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques [31].

B.1.1. Filtre actif (ou compensateur actif) :**B.1.1.a. Applications typiques :**

- Installations tertiaires avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200 kVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, bureautique...).
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

B.1.1.b. Principe de fonctionnement :

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non-linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge.

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne I_s soit sinusoïdal.

B.1.2. Filtre hybride :**B.1.2.a. Applications typiques :**

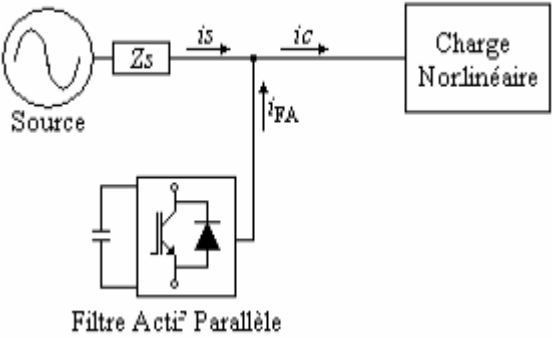
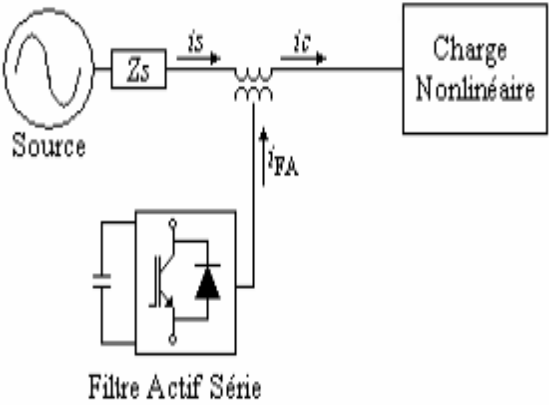
- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.

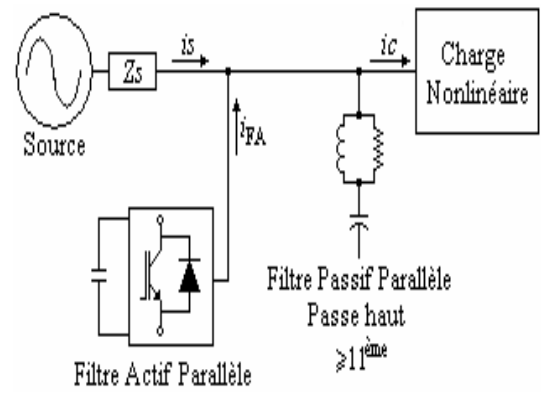
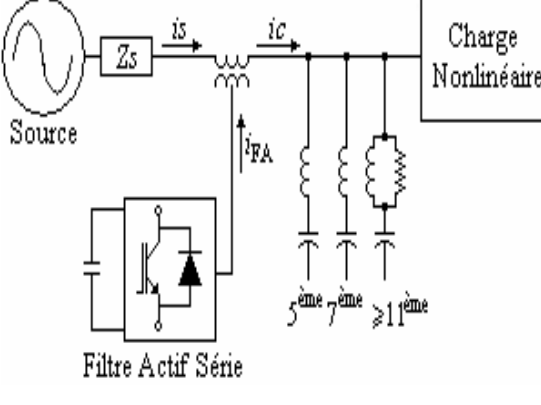
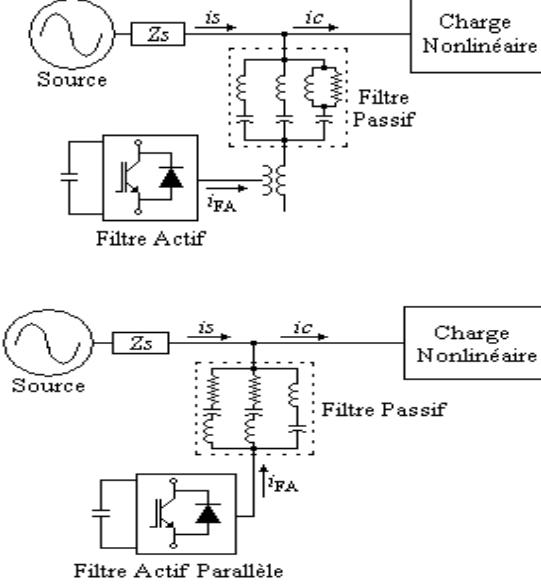
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.
- Recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique.

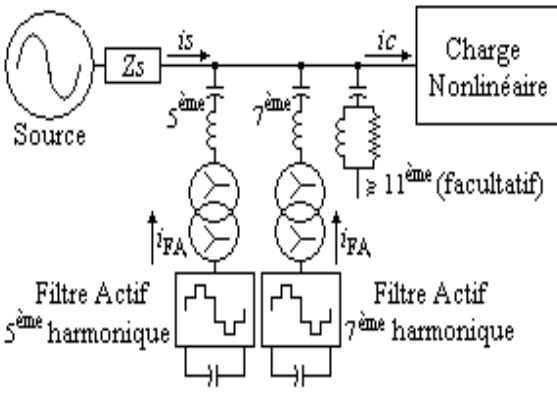
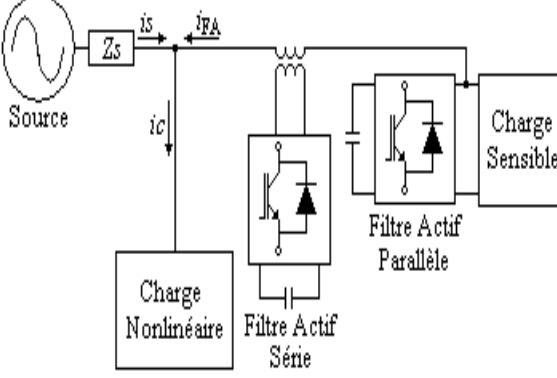
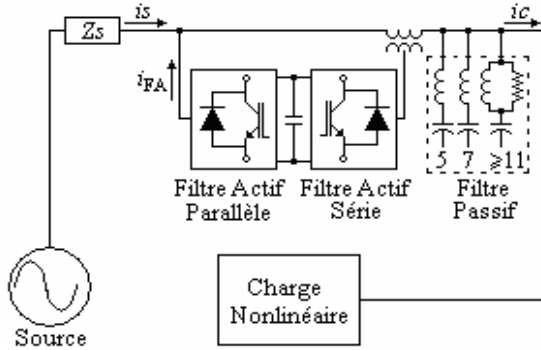
B.1.2.b. Principe de fonctionnement :

Les deux types de filtre passif et actif peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride. Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

Le tableau suivant présente les types des filtres actifs, avec les avantages et les inconvénients de chaque type.

Type	Configuration	Avantages/Inconvénients
1. Actif Parallèle <i>Sasaki & Machida</i> 1971 <i>Gyugyi & Strycula</i> 1976	 Filtre Actif Parallèle	♣ Avantages: Elimination des courants harmoniques, compensation de l'énergie réactive, correction du facteur de puissance, rééquilibrage des courants de la charge non-linéaire. ♣ Inconvénients: Coût et pertes élevés, limité aux charges de faible et moyenne puissance, risque d'écoulement des courants de compensation dans les filtres passifs raccordés au même réseau.
2. Actif Série <i>Gyugyi & Strycula</i> 1976	 Filtre Actif Série	♣ Avantages: Isolation et absorption des tensions harmoniques, rééquilibrage et régulation des tensions alimentant la charge non-linéaire. ♣ Inconvénients: Coût et pertes élevés, difficulté de protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.

3. Actif Parallèle & Passif Parallèle Takeda et al. 1987		♣ Avantages: Dimensionnement réduit du filtre actif destiné seulement aux basses fréquences harmoniques, applicabilité aux fortes puissances, régulation de l'énergie réactive, suppression des creux de tension des fours à arc et des cyclo-convertisseurs. ♣ Inconvénients: Les courants de compensation peuvent circuler dans les filtres passifs, les courants harmoniques peuvent transiter dans le filtre actif.
4. Actif Série & Passif Parallèle Peng et al. 1988		♣ Avantages: Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de compensation du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif. ♣ Inconvénients: Difficulté à protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.
5. Mise en série Actif & Passif Fujita & Akagi 199 Rastogi et al. 1995		♣ Avantages: Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de filtrage du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif, protection aisée du filtre actif contre les surintensités, pas de grande nécessité aux transformateurs de couplage. ♣ Inconvénients: Incapacité à contrôler l'énergie réactive.

6. Actif Parallèle Dédié aux 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques <i>Cheng et al.</i> 1996		♣ Avantages: Isolation source-charge aux fréquences dominantes (5^{ème} et 7^{ème}), obéissance à la norme standard IEEE 519, applicabilité aux charges de forte puissance, taux très réduits des filtres actifs (1% à 2%), moindre pertes par commutation en comparant avec les onduleurs MLI, et équilibre des puissances des bus continus des deux onduleurs.
7. Combinaison Actif Parallèle & Actif Série <i>Moran</i> 1989		♣ Avantages: Isolation d'harmoniques entre la charge sensible placée en aval et la charge non-linéaire placée en amont, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs, correction des distorsions de la tension d'entrée. ♣ Inconvénients: Incapacité de rééquilibrage des courants de charge et de compensation du courant du neutre.
8. Hybride: Actif Parallèle, Actif Série & Passif Parallèle <i>Fujita & Akagi</i> 1998		♣ Avantages: Elimination d'harmoniques et des courants de séquence négative, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs, correction des distorsions et des déséquilibres de la tension d'entrée, compensation des creux de tension. ♣ Inconvénients: Fluctuations à basses fréquences de la puissance active s'écoulant à partir ou vers le filtre série

		lors de l'absorption des creux de tension.
9. AC Actif Parallèle & DC Actif Série <i>Barbosa et al.</i> 1998		♣ Avantages: Elimination des courants harmoniques du côté alternatif AC et des ondulations de la tension redressée du côté continu DC.
10. DC Actif parallèle Pour HVDC <i>Zhang et al.</i> 1993		♣ Avantages: Elimination des courants et tensions harmoniques engendrés par les systèmes HVDC (haute tension continue) et de traction.

Tableau. B.1 Les types des filtres actifs, avec les avantages et les inconvénients de chaque type.

Annexe C: Norme des mesure des perturbations :

C.1: Le flicker des tension :

Le flicker est un phénomène de gêne physiologique visuelle ressenti par les utilisateurs de lampes alimentées par une source perturbée. La gêne correspondant au scintillement se manifeste sur les lampes. Attention, les charges perturbatrices peuvent se trouver connectées à tout niveau de tension. La norme de référence concernant cette grandeur est la norme : **IEC 61000-3-7**.

Ci-dessous, fluctuations typiques de la tension entrainant du flicker :

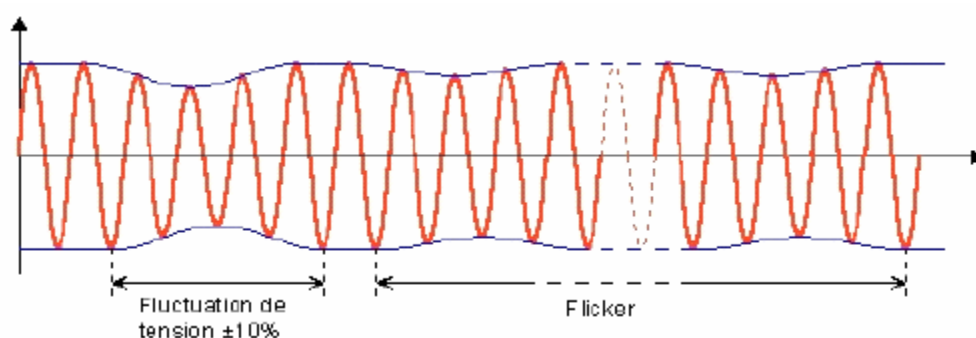


Figure C.1 Les allures des spectres des harmoniques

Le Flicker est un calcul statistique issu de la mesure des variations rapides de tension et défini par la norme **EN61000-4-15**.

C.2. creux de tension :

Le tableau suivant positionnent les phénomènes dans la grille des creux de tension qui sont normalement générés sur le réseau d'alimentation. Le premier identifie les événements qui génèrent les creux de tension.

AMPL/DURÉE->	<0,1s	0,1s<t<0,5s	0,5s<t<1s	1s<t<3s	3s<t<20s	20s<t<60s	>60s
10% ... <15%	Variation de charge		Démarrage de charge motrice				Défaut au client
15% ... <30%							
30% ... <60%							
60% ... <100%							
100%	Défaut intempestif au client						

Tableau C.1 Valeur de creux de tension

- ❖ Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Norme **CENELEC EN50160**

C.3. Classification des perturbations de l'alimentation électrique :

Phénomènes (Durée typique)	Type	Section du document	Effets possibles	Mesure	Valeurs Cibles ou indicatives
De longue durée ou permanents (> 1 min)	• Tension en régime permanent	5.1 et 5.2	Échauffement de l'électronique, des moteurs et des transformateurs	Valeurs efficaces sur 10 minutes	Cibles
	• Tension de neutre	5.3	Tensions parasites pouvant affecter la production agricole		Cibles
	• Interruption	5.4	Arrêt des équipements	Durée d'interruption	Cibles et indicatives
	• Tension harmonique	5.5	Échauffement de l'électronique, des moteurs et des transformateurs	Valeurs efficaces sur 10 minutes	Cibles
	• Déséquilibre de tension	5.6		Valeurs efficaces sur 2 heures	Indicatives
	• Papillotement	5.7	Inconvénients physiologiques	Moyenne cubique sur 2 heures	Cibles
Transitoires lents (> 0,008 s et ≤ 1 min)	• Coupure brève	5.8	Arrêt des équipements	Durée d'interruption	Indicatives
	• Creux de tension	5.9	Arrêt des procédés industriels ou mauvais fonctionnement des équipements	Valeurs efficaces sur 1 cycle à quelques secondes	Indicatives
	• Surtension temporaire	5.10			Indicatives
	• Variations de fréquence	5.11			Cibles
	• Variations rapides de tension	5.12			Indicatives
Transitoires rapides (≤ 0,008 s)	• Surtension transitoire	5.13 et 5.14	Arrêt des procédés industriels, claquage des isolants	Valeur crête et forme d'onde Voir référence [2]	Indicatives

Tableau C.2 Valeur de creux de tension

- ❖ Tensions recommandées pour les réseaux à courant alternatifs de 0 à 50 000V ,
Norme **ACNOR CAN3-C235-83**

Annexe D: Quelques photos de station de fusion d'acier :

D.1. photo représentant four à arc :



D.2. photo représentant l'appareil de mesure :



D.3. photo représentant l'appareil de mesure Les harmoniques :



Les références bibliographiques

- [1] **Vanya Ignatova** «*Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*» Thèse Doctorat, Université JOSEPH FOURIER 20 (Octobre 2006)
- [2] **M. A. E. Alali**, «*Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension* », Thèse Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I (2002).
- [3] **A. Robert**, «*Qualité de l'électricité dans la marche libéralise*», Université de Liège, Séminaire organisé par le Professeur Jean-Louis LILIEN (2010).
- [4] **Thierry Deflandre et Philippe Maurs** ; «*Les harmoniques sur les réseaux électriques* » ; Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES -(1998).
- [5] **R. CALVAS** «*Les perturbations électriques en BT* », Cahier Technique n° 141(1990).
- [6] **C. COLLOMBET, J.-M. LUPIN et J. SCHONEK** «*Perturbations harmoniques dans les réseaux et leur traitement* », Cahier Technique n° 152(1998).
- [7] **J.-N. FIORINA** «*Onduleurs et harmoniques (cas des charges non linéaires)* », Cahier Technique n° 159(2000).
- [8] **J.-N. FIORINA** «*Harmoniques en amont des redresseurs des ASI* », Cahier Technique n° 160(2001).
- [9] **G. THOMASSET** «*La conception des réseaux industriels en HT* » , Cahier Technique n° 169(2001).
- [10] **P. Meynaud** ; «*Qualité de la tension dans les réseaux électriques, creux de tension, flicker et harmoniques* » ; Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 260, pp.1-25, (1990).
- [11] **R. Ott**, «*Qualité de la tension ; Fluctuations et flicker, Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique*», D 4 263, pp.1-20, (1990).
- [12] **L. Zellouma**, «*contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de filtrage actif*», Thèse de Doctorat, Annaba (2010).
- [13] **D. Mohamed Salah**, «*étude comparative des redresseurs Cascades et multiniveaux a commande MLI*», Mémoire de Magistère, Constantine (2005).
- [14] **P. Ferracci**, «*La qualité de l'énergie électrique*», Cahier technique n°199, (2001).
- [15] **D. Chapman**, «*Notions de Power Quality*», Copper Development Association, (2002).

- [16] **G. Postiglione**, «*Nouvelle alimentation pour les fours à arc à courant alternatif*», thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse (2006).
- [17] **Y. Djeghader**, «*Étude de la propagation et caractéristiques des harmoniques stochastiques générées par un four à arc*», Thèse de Doctorat, université d'Annaba (2011).
- [18] **M. Kratz**, «*Four à arc, Techniques de l'ingénieur*» Traité Génie électrique, D 5 920, pp.5-(1999).
- [19] **B. Trentini**, Aciéries. «*Évolution des procédés*», Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7600, pp 1-11(2004).
- [20] **P. Ayed, C. Ouvradou, J.Astier**, «*Aciérie électrique*», Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7 700, pp.1-24.(2004)
- [21] **M. Nadif, C. Gatellier** ; «*Influence d'une addition de (Ca ou de Mg) sur la solubilité de l'oxygène et du soufre dans l'acier liquide (étude de laboratoire)* ». Revue de Métallurgie. CIT 83, n° 5, p. 377-394 Mai (1986).
- [22] **W.E. Schwabe, C.G. Robinson** ; «*Nouveaux développements dans l'UHP . Conférence Internationale sur le four à arcs électrique en Aciéries Cannes*», (7-9 Juin 1971).
- [23] **G.Maurer**, «*Nouvelles techniques du four à arcs à courant continu à impédance d'arc élevée*», IRSID RE ACI 83/1010 (1983).
- [24] **Y. Djeghader, H. Labar, K. Bounaya**, «*Modelling and Parametrical Approximation of an Electric Arc Furnace of Steelmaking*», JEE, Volume 9 / (2009 – Edition 3).
- [25] **Y. Djeghader, H. Labar, K. Bounaya**, «*Analysis of Harmonics Generated by Different Structures of a DC EAF, International Review on Modelling and Simulations*» (2008).
- [26] **S. Vacquité**, «*Arc électrique*», Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique D 2 870, pp. 3-(1995).
- [27] **Gérard Hermal**, «*Etude technico- économique de la valorisation des fumées de fours à arc électrique avant filtration*» FUCHS Tecgnology GMBG Winkelstraße 28 D-77974 Meißenheim (2010)
- [28] **T. Zheng, E. B. Makram and A. A. Girgis**, «*Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Distortion, in Proceedings of IEEE Int'l Conf. Harmonics Quality of Power* » (ICHQP),Greece, pp. 1079-1085,(Oct. 1998)
- [29] **A. Kazemi, H. Andamim** «*Facts devices in deregulated electric power systems*», IEEE April (2004).
- [30] **K.Anuradha Hyderabad, India** «*Modeling of Electric Arc Furnace & Control Algorithms for voltage flicker mitigation using D-STATCOM* » Baha University (March 07,2010).
- [31] **P. Yan, A. Sekarm** «*Steady-state analysis of power system having multiple FACTS devices using line-flow-based equations* », (January 2005).
- [32] **Philip Moore, Peter Ashmole**, «*Fkexible AC transmsion systems part 3 convensational FACTS controllers*», Power engineering journal(AUGUST 1997).

- [33] **Delendi LOUARDI**, «*Contrôle de l'Écoulement de Puissance Active par Système FACTS*», Thèse de Magister, Université de Batna, (2009).
- [34] **K. Belacheheb**, «*Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport* », Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, (21 Juin 2001).
- [35] **T. Allaoui**, «*Régulation Robuste de l'UPFC Pour Optimiser l'Écoulement des Puissances Dans Un Réseau Électrique* », Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (Avril 2002).
- [36] **A. A. Ladjici, A. Barar**, «*Introduction aux systèmes flexibles de transmission en courant alternatif FACTS* », Mémoire d'ingénieur, Ecole National Polytechnique, Alger, (Juin 2002).
- [37] **J. L. Thomas**, «*Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS*», 10ème entretien Physique» – industrie, Paris, (19 Octobre 2006).
- [38] **L. Kartobi**, «*Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Électriques* », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique (2006).
- [39] **A. ALIBI** , «*Contrôle des Réseaux Électriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)* », Mémoire de Magister , Université de Batna (2009)
- [40] **R. HAIMOUR**, «*Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique* », Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran (2009)
- [41] **S. Siroj**, «*The Modeling and Control of a Cascaded-Multilevel Converter-Based D-STATCOM* », Thèse de doctorat , Université de Blacksburg, Virginia (2004).
- [42] **J. Ndayizamba**, «*Contribution à l'analyse de la compensation série avancée dans les réseaux de transport d'énergie électrique* », Thèse de doctorat, Université de Montréal (1996).
- [43] **Abdolreza Tavakoli, Mehdi Ehsan, Seyed Mohammad Tagie Batahiee** «*SIMULINK Study of Electric Arc Furnace Inactive Power Compensation by Using STATCOM* »Islamic Azad University of Lahijan NO.10, (Autumn 2006).
- [44] **National Electric** «*National Fire Protection Association* » Code - NEC-(1996).
- [45] **Mazurov M.I, Nikolaev A.V., Lozinova N.G.** «*Improvement of Voltage Quality in AC Network by Use of D-STATCOM* » Baha University. Downloaded on (March 07,2010)
- [46] **Y.F. Wang, J.G. Jiang, L.S. Ge and X.J. Yang** "«*Mitigation of Electric Arc Furnace Voltage Flicker Using Static Synchronous Compensator*» p 1-4244-0449-5/06, (2006)

الملخص :

الهدف من هذا العمل هو تحسين مؤشرات جودة الطاقة أي التخفيف من الظواهر التشويشية المختلفة (التوافقيات، الاضطرابات، عدم الاتزان، هبوط الجهد....).

في صناعة الحديد و الصلب، فرن القوس الكهربائي هو أداة للذوبان مخصص لصهر المعادن الأولية، بشكل عام، الخردة. ويعتبر كجهاز كهربائي جد مشوش بسبب عدم الاستقرار، والاختية وعدم تماثل القوس الكهربائي .

للد من الظواهر التشويشية الناتجة عن أفران القوس، قمنا في هذا العمل باستخدام تقنية FACTS خاصة D-STATCOM فقمنا بدراسة وتحليل النموذج بين هذه التقنية و فرن القوس باستعمال بيئة MATLAB/SIMILINK

أخيرا دراستنا تظهر فعالية هذه التقنية خاصة في التخفيف من تذبذب الجهد و التوافقيات

Résumé

L'objectif de ce travail est consiste à améliorer les indices de la qualité de l'énergie électrique, c'est-à-dire atténuer les différents phénomènes perturbateurs qui existent dans les réseaux électriques (les harmoniques, le flicker , les déséquilibres, creux de tension).

Dans l'industrie moderne , 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 perturbations électriques générées par les fours à arc, en utilisant dans ce travail les dispositifs FACTS en particulier le dispositif shunt (D-STATCOM) , on va étudier et analyser la modélisation et l'intégration de ce dispositifs avec le four à arc, dans l'environnement MATLAB/SIMILINK.

Enfin notre étude montre l'efficacité de ce dispositif surtout coté atténuation du flicker de tension et les harmoniques.

Abstract

The objective of this work is to improve the quality indices of electric energy, that is to say, mitigate different stress factors that exist in power systems (harmonics, flicker, imbalance, hollow voltage).

In modern industry, the arc furnace is a merge tool for melting a metal stage is, in general, scrap metal. And electrical equipment considered very disruptive because of the instability, nonlinearity and asymmetry of the electric arc.

To minimize electrical interference generated by arc furnaces, in this work using the FACTS devices especially the shunt device (D-STATCOM), we will study and analyze modeling and integration of devices with the arc furnace in the MATLAB / SIMILINK.

Finally our study shows the effectiveness of this device above listed mitigation of voltage flicker and harmonics.