

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR - ANNABA- UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA -

جامعة باجي مختار - عنابة-

Année 2010

Faculté des sciences de l'ingénieur  
Département d'Electrotechnique

**THESE**

**Présentée en vue d'obtention du diplôme de DOCTORAT**

**Étude de la propagation et caractéristiques  
des harmoniques stochastiques générées  
par un four à arc**

Option

**Réseaux Electriques**

Par

**DJEGHADER Yacine**

DIRECTEUR DE THESE : **Dr. LABAR Hocine** M.C. UNIVERSITE D'ANNABA

**DEVANT LE JURY**

Président	: A.LMZADMI	M.C.	Université de Guelma.
Examineurs	: E.B.AZZAG	M.C.	Université d'Annaba.
	A.OMEIRI	M.C.	Université d'Annaba.
	D.DIB	M.C.	Université de Tébessa.
	L.RAHMANI	M.C.	Université de Sétif.

# Remerciements

Je remercie en premier lieu « **DIEU** » tout puissant pour m'avoir donné et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

- Il me fait plaisir de prendre ces quelques lignes, si peu nombreuses, afin de remercier les personnes qui m'ont soutenu durant ce projet de recherche.
  
- ✓ De façon spéciale, je tiens à remercier mon directeur de thèse **Dr. LABAR Hocine** maître de conférences à l'université d'Annaba pour son orientation et encouragement, pour son support et son professionnalisme qui ont rendu possible la réalisation de ce travail.
- ✓ Mes remerciements vont également à tous les membres **d'ARCELOR - MITTAL - ANNABA** spécialement de l'aciérie électrique et le poste 60 pour leurs aides et contributions pendant ma période de stage et ainsi que durant mes plusieurs visites de consultations.
- ✓ Mes remerciements vont aussi aux membres de **SONELGAZ**, spécialement la filière de transport d'électricité qui ont accepté de me faire les mesures nécessaires.
- ✓ Sans oublier les personnes de la SDT/DCT/MDN, surtout mon chef de bureau le Lieutenant-colonel **CHRAITIA Salah** qui m'a aidé beaucoup et donné tous le nécessaire pendant mon service nationale.
- ✓ J'adresse mes remerciements aux **président et membres du jury** qui ont accepté d'examiner cette thèse en lui apportant de l'intérêt.
  - ❖ **Président** : Dr. A.Lmzadmi maître de conférences à l'université de Guelma.
  - ❖ **Examineurs** :
    - Dr. E.B.Azzag maître de conférences à l'université d'Annaba.
    - Dr. A.Omeiri maître de conférences à l'université d'Annaba.
    - Dr. D.Dib maître de conférences à l'université de Tébessa.
    - Dr. L.Rahmani maître de conférences à l'université de Sétif.
  
- Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis, et que ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Djeghader Yacine

## المخلص

فرن القوس الكهربائي هو نظام الكترول حراري يعمل على استخدام الطاقة التي يوفرها القوس الكهربائي لتسخين الحمولة. أفران القوس الكهربائي تستخدم بشكل تقريبي في صناعة الحديد الصلب من الخردة أو الحديد المعاد أين تتكون الأفراس خاصة بين كل قطب من الأقطاب الثلاثة و المعدن و هذا الأخير ينصهر عن طريق حرارة الأفراس التي تحدث حفر في المعدن.

فرن القوس هو جهاز كهربائي جد مشوش بسبب عدم الاستقرار في القوس. الاضطرابات الناتجة هي عشوائية تغطي نطاق من التردد المستمر إلى بعض مئات من هيرتز. بالإضافة إلى ذلك لاختية القوس الكهربائي التي تنتج التوافقيات (التي تتغير عشوائيا أثناء العمل) , و كذلك الظواهر (الضوضاء ، والمجالات الكهرومغناطيسية) ، وعدم الاتزان.

ونحن في هذه الأطروحة قدمنا نموذج جديد يتعلق أساسا بمعالم فرن القوس الكهربائي، الذي أظهر عنصر جديد الذي هو " المكثفة " الذي يعبر عن وجود الحقل الساكن لان الأقطاب تغير باستمرار وضعياتها، و هذا النموذج الجديد يسهل الاندماج في حلقة التعديل و كذلك في تحسين نوعية الطاقة الكهربائية خلال عمل الفرن الكهربائي.

للتخفيف من التوافقيات التي تولدها فرن القوس الكهربائي طريقة التعويض حتى أدنى الرتب "حتى رتبة 13" بصورة عامة كافية. طريقة أخرى للحد من التوافقيات " و خصوصا في 5 و 7" هي تغيير هيكله التغذية لأفران القوس أين يتم استعمال مقومات ثابتة ذات اثني عشرة نبضة هذه الدراسة بينت فضائل القوس الكهربائي ذو التيار المستمر خاصة في حالة تحسين الطاقة الكهربائية " تخفيف التوافقيات , الارتجاج ... " لكن في المقابل فهي ذو تكلفة عالية بسبب غلاء أنصاف النواقل و كذلك اللواحق.

## Abstract

The arc furnace is a system using electrothermal energy provided by an electric arc to heat a load. Electric arc furnaces are used almost exclusively for the manufacture of steel from scrap recovery or arcs develop between each of three electrodes in graphite and metal, this last melt by direct attack bows digging wells in the solid metal charge.

The electrical arc furnace equipment is very disruptive because of the instability of the arc. The random perturbations are produced, covering a frequency band continuum to a few hundred hertz. In addition, the nonlinearity of an arc produces harmonics (which fluctuate randomly during casting) and radiated phenomena (noise, electromagnetic fields), and imbalance.

In this thesis we create a new mathematical model that depends mainly by the parameters of electric arc furnace, which is matched by a new parameter is inferred that the capacitor through the existence of static fields since electrode position changes continuously, and this new model is easy for integration in the loop and also helps in optimizing and improving the power quality during of arc furnace operation.

To mitigate the harmonics generated by the arc furnace the compensation of harmonics of the lowest ranks (until the rank 13) is generally sufficient. Another method of reducing harmonic « especially 5 and 7 » is the change of power architecture for arc furnaces, or using static converters twelve pulse, this study shows that the advantages of a direct current furnace mainly as energy minimizing harmonic , flicker .But also a very expensive because of high prices of power semiconductors and accessories.

## Résumé

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Les fours à arc sont utilisés presque exclusivement pour la fabrication d'acier à partir de ferraille de récupération où les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, ce dernier fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide.

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquence du continu jusqu'à quelques centaines de hertz. De plus, la non linéarité de l'arc produit des harmoniques (qui fluctuent aléatoirement au cours de la coulée) ainsi que des phénomènes rayonnés (bruit, champs électromagnétiques), et le déséquilibre.

Dans cette thèse nous avons développé un nouveau modèle mathématique qui dépend essentiellement par les paramètres électriques du four, et qui fait l'appariation d'un nouveau paramètre c'est le condensateur qui est déduit à travers l'existence du champ statique puisque les électrodes changent continuellement de position, et ce nouveau modèle facilite l'intégration dans la boucle de régulations et aussi contribue à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique durant le fonctionnement du four à arc.

Pour atténuer les harmoniques générées par les fours à arcs la compensation des harmoniques des rangs les plus bas (jusqu'au rang 13) est généralement suffisante. Autre méthode de réduction des harmonique « spécialement 5 et 7 » est le changement de l'architecture d'alimentation pour les fours à arcs, où en utilisant les convertisseurs statique de deux pulsations, cette étude montre les avantages du four à arc à courant continue surtout coté qualité d'énergie « minimiser les harmonique, flicker,... », Mais présente aussi un coût très cher à cause de forte prix des semi-conducteurs de puissances ainsi que des accessoires nécessaires.

## TABLE DES MATIERES

### Introduction générale

I. Généralités.....	1
II. Problématique et domaine d'étude de la thèse.....	3

### Chapitre I : Technologies des fours à arcs

I. Introduction.....	5
II. Arc électrique.....	5
II.1. Définition.....	5
II.2. Propriétés.....	6
III. Conditions de fonctionnement d'un four à arc.....	7
III.1. Composition du four à arc.....	7
III.2. Point de vue électrique.....	9
III.3. Point de vue thermique.....	10
III.3.1. Chargement.....	10
III.3.2. Fusion.....	10
III.3.3. Affinage.....	11
IV. Classification des fours à arc.....	13
IV.1. Four à arc d'après leur nature d'arc.....	13
IV.1.1. Four à arc libre.....	13
IV.1.2. Four à arc sur résistance.....	13
IV.1.3. Four à arc sur charge.....	13
IV.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation.....	13
IV.2.1. Four alimenté en courant alternatif.....	13
IV.2.1.1. Description technologique.....	14
IV.2.1.2. Description de la partie électrique.....	16
IV.2.2. Four alimenté en courant continu.....	17
IV.2.2.1. Description de la partie électrique.....	17
V. Principe de la régulation.....	18
VI. Raccordement et marche du four.....	21
VII. Avantages et inconvénients du four à arc :.....	22
VII.1. Avantages.....	22
VII.2. Inconvénients.....	23
VIII. Evolution des données économiques.....	23
IX. Conclusion.....	24

## Chapitre II : Perturbations induites par les fours à arcs

I. Introduction .....	25
II. Caractéristiques des perturbations électriques .....	25
III. Fréquence « Déviations » .....	26
IV. Amplitude .....	26
IV.1 Creux de tension et coupures brèves .....	26
IV.1.1.Origine des creux de tension. ....	26
IV.2.2.Conséquences des creux de tension.....	27
IV.2. Flicker ou papillotement de l'éclairage.....	27
IV.2.1.Origine du flicker. ....	27
IV.2.2.Conséquences du flicker.....	29
V. Forme d'onde.....	30
V.1. Transitoires. ....	30
V.2. Phénomènes transitoires internes aux alimentations des fours à arc. ....	31
V.2.1. Surtensions : .....	31
V.3. Harmoniques.....	32
V.3.1.Origine des harmoniques. ....	32
V.3.2.Conséquences des harmoniques. ....	35
VI. Application sur le four « Expérimentation ».....	37
VII. Déséquilibre « Non Symétrie ».....	41
VII.1 .Origine de la non symétrie. ....	41
VII.2 .Conséquences de la non symétrie. ....	41
VIII. Conclusion .....	42

## Chapitre III : Modélisation et étude du four à arc

I. Introduction .....	43
II. Description du model du four. ....	44
II.1. Traitement des données. ....	46
II.2. Courbes caractéristiques du four « Etude énergétique ».....	47
II.3. Ajustement des paramètres caractéristiques du four.....	53
II.4. Distribution de l'impédance.....	54
II.5. Commentaires : .....	55
III. Approximation & Modélisation. ....	55
III.1. Analyse et commentaires des résultats .....	56
IV. Contribution du modèle proposé dans l'amélioration de la qualité d'énergie électrique...61	61
IV.1 Erreur dans le modèle de simulation : .....	61
IV.2. Régulation sans le modèle proposé « modèle réel ». ....	62
IV.3. Régulation avec le modèle proposé.....	63
V. Discussion.....	66
VI. Conclusion.....	66

## Chapitre IV : Amélioration du fonctionnement des fours à arc

I. Introduction .....	67
II. Solutions pour améliorer la qualité d'énergie électrique. ....	67
II.1. Techniques de compensation du flicker.....	67
II.1.2.Réactances linéaires ou saturables pour fours à courant alternatif. ....	69
II.1. 3.Compensateur statique de puissance réactive.....	69
II.2. Techniques de réduction des harmoniques. ....	70
II.2. 1.Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau.....	71
II.2. 2.Filtrage des harmoniques .....	71
II.3. Réduction du déséquilibre de la tension .....	73
III. Le four à arc à courant continue .....	75
III.1. Description du Modèle .....	75
III.2. Le redresseur hémiphase .....	76
III.3. Redresseur Dodécaphasé .....	78
IV. Différentes structures du four à arc. ....	80
IV.1. Analyse des résultats. ....	82
V. Etude les différentes étapes du fonctionnement. ....	83
V.1. Commentaire & Discussion.....	86
VI. Comparaison entre le four à courant continue et à courant alternatif .....	87
VII. Conclusion. ....	88

### Conclusion générale

Conclusion générale. ....	89
---------------------------	----

### Annexes et Bibliographie

Annexe N° 01 : .....	91
Annexe N° 02 : .....	92
Annexe N° 03 : .....	93
Annexe N° 04 : .....	96
Bibliographie .....	98

## LISTE DES SYMBOLES, NOTATIONS &amp; ABRÉVIATIONS

SYMBOLE	DESIGNATION
$P_{\text{four}}$	La puissance active consommée par le four.
$Q_{\text{four}}$	La puissance réactive consommée par le four.
$P_{\text{arc}}$	La puissance active de l'arc électrique.
$I_e$	Courant du four.
$E_{\text{TR}}$	Tension primaire du transformateur.
$U_1$	Tension secondaire du transformateur.
$Z_1$	L'impédance du four et les câble souples.
$R_1$	La résistance du four et les câble souples.
$X_1$	La réactance du four et les câble souples.
$d$	Distance entre l'électrode et la matière à fusionnée.
$Q_{\text{EAF}}^L$	C'est la puissance réactive inductive de l'arc.
$Q_{\text{arc}}^C$	C'est la puissance réactive capacitive de l'arc.
$S_{\text{ccn}}$	Puissance de court-circuit du réseau.
$S_{\text{ccf}}$	Puissance de court-circuit du four.
$R_{\text{comp}}$	Le facteur de réduction d'un compensateur statique.
$S_{\text{svc}}$	Puissance du compensateur
$S_f$	Puissance Apparente du four.
$f_0$	fréquence de résonance.
$U_d$	Composante de la tension directe.
$U_i$	Composante de la tension inverse.
$U_0$	Tension homopolaire
$I_d$	Courant continu.
$I_1$	la valeur efficace du fondamental
$p$	Indice de pulsation
$L$	Inductance.
$Z$	Impédance.
$\text{Cos } \varphi$	Facteur de puissance
BT	Basse tension
HT	Haute tension
THD	Taux d'harmonique de distorsion
PD3	Redresseur parallèle triphasé.
S3	Redresseur série triphasé.
P12	Redresseur à deux pulsations.
UHP	Ultra Haute Puissance.
EN	European Union.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
ATS	Association Technique de la Sidérurgie
IRSID	Institut de Recherche de la Sidérurgie.
IISI	International Iron and Steel Institute.

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>TABLEAU</b>	<b>TITRES</b>	<b>PAGE</b>
Tableau II.1	Les principaux effets des harmoniques.	36
Tableau II.2	Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables	40
Tableau III.1	Modèle proposé pour chaque étape de fonctionnement du four à arc	59
Tableau IV.1	Différentes techniques de compensation du flicker.	68
Tableau IV.2	Différentes techniques de compensation des harmoniques.	71
Tableau IV.3	Différents types de filtrage	73
Tableau IV.4	Solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations	74
Tableau IV.5	Résultats de simulations	81
Tableau IV.6	Différentes positions possibles des électrodes	83
Tableau IV.7	La norme : IEC-CEI 61000-3-6 - 1996,	83
Tableau IV.8	Valeurs des harmoniques dans la nouvelle technique.	87
Tableau IV.9	Comparaison des harmoniques avec la norme.	88

## LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES	PAGE
Figure I.1	La courbe ; $U_a=f(I)$	6
Figure I.2	Schéma de principe du four à arcs.	7
Figure I.3	Four électrique de fusion type Hérault	8
Figure I.4	Diagramme de fusion d'un four à arc : Exemple.	12
Figure I.5	Courbe caractéristique d'arc.	14
Figure I.6	Schémas électrique d'un four à arc à courant alternatif	16
Figure I.7	Schémas électrique d'un four à arc à courant continu	18
Figure I.8	Puissance absorbée par le four	19
Figure I.9	Courbes de charge théoriques d'un four à arc.	20
Figure I.10	Marche UHP d'un four à arc.	21
Figure I.11	Marche normale d'un four à arc.	22
Figure II.1	Exemple de fluctuation de la fréquence.	26
Figure II.2	Les creux de tension.	27
Figure II.3	Exemple de variations rapide de la tension	28
Figure II.4	Allure temporelle du courant absorbé par un four à arc.	30
Figure II.5	Les surtensions transitoires	30
Figure II.6	Représentation de la déformation de la tension.	34
Figure II.7	Spectre d'harmonique du four à arc.	38
Figure II.8	Harmoniques du courant générées par le four.	38
Figure II.9	Harmoniques de la tension générées par le four.	38
Figure II.10	Variation du THD.	39
Figure II.11	Variation de la puissance apparente du four.	39
Figure II.12	Variation du $\cos \varphi$ .	39
Figure II.13	Déséquilibre de tension.	41
Figure III.1	Four à arc électrique.	43
Figure III.2	Schémas monophasé du système étudié.	45
Figure III.3	Alimentation du Four à arc.	46
Figure III.4	Variation de la réactance d'arc.	48
Figure III.5	Variation de la résistance d'arc.	48
Figure III.6	Variation de la résistance du (four+câbles).	48
Figure III.7	Variation de la réactance du four.	49
Figure III.8	Variation de l'impédance d'arc.	49
Figure III.9	Variation de la réactance (four+câbles).	49
Figure III.10	Variation de la résistance du four.	50
Figure III.11	Variation de l'impédance (four + câbles).	50
Figure III.12	Variation de l'impédance du four.	50
Figure III.13	Variation de la puissance apparente.	51
Figure III.14	Variation de la puissance active.	51
Figure III.15	Variation de la puissance réactive.	51
Figure III.16	Variation du facteur de puissance.	52
Figure III.17	Variation de la tangente $\varphi$	52

Figure III.18	Variation de la puissance d'arc	52
Figure III.19	Variation de la puissance réactive en fonction la puissance d'arc.	53
Figure III.20	Processus électro-énergique du four.	53
Figure III.21	Distribution de la résistance $R_1$	54
Figure III.22	Distribution de la réactance $X_1$	54
Figure III.23	Variation du $X_{arc}$ avec l'ajustement.	55
Figure III.24	Variation du $R_{arc}$ avec l'ajustement.	56
Figure III.25	Modèle du four à arc.	57
Figure III.26	Dispersion du $X_{arc}^L$	58
Figure III.27	Dispersion du $X_{arc}^C$ .	58
Figure III.28	Caractéristique tension - courant [I-V] du four à arc.	60
Figure III.29	Erreur sur la mesure de la résistance	61
Figure III.30	Erreur sur la mesure de la réactance	62
Figure III.31	Variation de la puissance du four et la puissance d'arc (modèle réel)	62
Figure III.32	Variation du courant d'électrodes et la tension (modèle réel)	63
Figure III.33	Variation de la puissance du four et la puissance d'arc (modèle proposé)	63
Figure III.34	Variation du courant d'électrodes et la tension (modèle proposé)	64
Figure III.35	Coefficient de conversion d'énergie	64
Figure III.36	Influence des perturbations électriques sur la vitesse du moteur qui fait la régulation des électrodes.	65
Figure IV.1	Modèle proposé du four à arc	75
Figure IV.2	Schémas triphasés du four à arc	76
Figure IV.3	Schémas d'un redresseur Hédécaphasé.	76
Figure IV.4	Spectre d'harmonique de courant	77
Figure IV.5	formes de courant	77
Figure IV.6	Schémas d'un redresseur Dodécaphasé.	78
Figure IV.7	Courant du redresseur PD3	79
Figure IV.8	Courant du redresseur S3	79
Figure IV.9	Courant du redresseur P12	79
Figure IV.10	Différentes structures du four à arc	80
Figure IV.11	Cycle du bon fonctionnement	87
Figure IV.12	Spectre d'harmonique « four à courant alternatif »	87
Figure IV.13	Spectre d'harmonique « four à courant continu »	88

## I. Généralités

Au milieu du XIX<sup>em</sup> siècle, en 1851, la production mondiale de fer est de 60.000 t/an. Il s'agit alors bien de fer, obtenu à l'état pâteux car à l'époque on ne sait pas encore atteindre les hautes températures nécessaires à la fusion de l'acier. La seconde moitié de ce XIX<sup>em</sup> siècle va se révéler décisive pour la sidérurgie, avec quatre grandes inventions d'une immense portée pour le développement de cette industrie et, par là même, de l'économie mondiale. Ces inventions s'échelonnent sur plusieurs décennies [1]:

- 1856 : Bessemer en Grande-Bretagne obtient pour la première fois de l'acier liquide en insufflant de l'air à travers un bain de fonte.
- 1865 : Martin en France et simultanément Siemens en Allemagne produit de l'acier liquide en refondant des ferrailles dans un four à sole, avec une flamme de gaz de gazogène dont la haute température nécessaire est atteinte grâce au préchauffage de l'air de combustion.
- 1878 : Thomas en Grande-Bretagne réussit à affiner les fontes à haute teneur en phosphore en utilisant un revêtement en dolomie à la place du revêtement en silice du procédé Bessemer, et en ajoutant de la chaux.
- 1900 : Héroult en France réalise pour la première fois la production d'acier dans un four électrique à arc.

Avant la seconde guerre mondiale, le four électrique par la lenteur même de l'opération, était réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux. Les progrès réalisés pendant la guerre, en taille et puissance des unités, permirent dès 1950, au four électrique de rivaliser avec le four Martin pour l'élaboration d'aciers au carbone à partir de ferrailles, avec la construction d'aciéries de 500.000 à 1 000.000 t/an.

Parallèlement, le four électrique de plus petite taille se développait dans les mini-aciéries (mini-mills) américaines, puis italiennes, et surtout après que l'apparition de la coulée continue ait permis d'abandonner la coulée en petits lingots, dispendieuse et cause de défauts.

À partir du début des années 60, une série d'améliorations allaient faire du four électrique un outil hautement performant [1,2] :

- Utilisation maximale de la puissance active des transformateurs (facteur de puissance  $\approx 0,7$ ) améliorant le rendement thermique et la productivité.
- Apparition en 1970 des fours UHP (Ultra High Power) avec des puissances spécifiques de 500 kVA/t [3].

- Innovation par Daido Steel des parois métalliques refroidies à l'eau à la place du réfractaire, permettant d'augmenter fortement la puissance spécifique.
- Conjointement, emploi de lances à oxygène, de brûleurs fuel-oxygène, d'injections de poudre, d'électrodes de qualité améliorée, utilisation de trous de coulée excentrés... permettant d'augmenter les performances et de diminuer la consommation d'électricité.

Par contre, les technologies de préchauffage des ferrailles par les fumées du four n'ont pas fait l'unanimité, et l'acuité des problèmes de captage et de dépoussiérage des fumées s'est fortement accrue avec l'augmentation des performances des fours (et des exigences d'environnement). Les performances élevées du **four électrique à arc** (passé de 4 coulées par jour avant guerre à plus de 25 coulées par jour en 1990), pour un investissement relativement modeste, et les disponibilités en ferrailles expliquent la place prépondérante prise par cet outil dans la sidérurgie moderne en 1989 : 27 % dans le monde, 32 % hors URSS, pays de l'Europe de l'Est et Chine. Il est intéressant de constater que le four électrique moderne n'est pas tellement différent dans ses principes de celui inventé au début du siècle par Héroult. Des essais de four électrique à enfournement continu de ferrailles et coulée continue ou semi-continue de l'acier liquide ont été réalisés à la fin des années 60 et dans les années 70 par l'IRSID (Institut de Recherche de la Sidérurgie Française) et le NRIM au Japon [4] mais n'ont pas été suivis, à l'époque, d'application industrielle.

Nous avons constaté qu'au cours de ces dernières années l'implantation de complexe industriel de plus en plus nombreux du point de vue puissance installée et en particulier la sidérurgie, se sont vu équipés de fours (UHP) dont le but consiste à convertir les ferrailles ou d'autres charges métalliques en acier liquide dans un temps minimal, avec le plus haut taux d'apport d'énergie possible et une réduction au minimum des périodes hors tension, a donné un nouvel procédé électrique qui devient de plus compétitif aux autres procédés tel que ceux à oxygène. L'adaptation de l'alimentation continue et les progrès effectués dans la réduction des minerais (utilisation des produits pré-réduits) ont donné au four électrique à arc des avantages ; tel que pour certains des investissements, initiaux et le coût opérationnel sont plus bas que pour le procédé haute fourneaux «méthode d'oxygène». Cependant, le raccordement des fours à arcs au réseau électrique ne cesse de poser des problèmes aux électriciens. Le fonctionnement surtout intermittent, la nature non linéaire de l'arc provoquent des perturbations sur le réseau, ces perturbations varient selon le genre, la taille du four et la nature et les dimensions du produit enfourné. Donc il est nécessaire

d'étudier cet élément, important à la sidérurgie, surtout coté minimisation ces inconvénients qui sont essentiellement les perturbations, engendrées pendant son fonctionnement.

## II. Problématique et domaine d'étude de la thèse

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

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

A l'exception des creux de tension et interruptions, les perturbations sont la plupart du temps occasionnées par les utilisateurs de réseau, lorsqu'ils consomment ou produisent un courant qui n'est pas parfaitement symétrique, sinusoïdal et constant, alors par interaction avec l'impédance du réseau la qualité de la tension au point de raccordement va être détérioré.

Les perturbations de la tension peuvent résulter de :

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

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

**La problématique** de la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs en actions, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou

consommateurs d'électricité), ou intervenants divers (fournisseurs d'électricité ou de services) et parmi ces secteurs on trouve les aciéries électriques.

La proportion d'acier produit par des fours à arc électrique ne cesse de croître, atteignant actuellement environ 50 % de la production d'acier dans le monde. Il est donc important d'assurer des bons rendements de production par soucis d'économies mais aussi pour préserver notre environnement.

Donc dans cette thèse on va étudier le **four à arc** électrique qui est devenu petit à petit un acteur primordial de la sidérurgie mondiale, au début du chapitre I, on parlera des technologies des fours à arcs et leurs développements, ainsi que leurs rôles dans l'augmentation de la production mondiale en matières d'acier, puis ( chapitre II ), on fait un survol sur leurs impacts sur les réseaux électriques étudions les différentes perturbations induites pendant le fonctionnement de ces fours à arcs ( théories et expérimentations ). Dans le troisième chapitre nous proposerons notre propre modèle mathématique pour le four à arc étudié, et prouvons son importance dans l'amélioration de la qualité d'énergie électrique, et on termine ( chapitre IV ), par la démonstration des différentes méthodes utilisées par la réduction de ces perturbations, et en fin on fait une petite application sur l'effet du changement de l'architecture d'alimentation du four, particulièrement le four à arc à courant continu, où l'étude montre l'atténuation des harmoniques 5 et 7.

Dans notre recherche nous avons tenu compte dans tous le processus, l'aspect électro-énergétique « **Power Quality** » et non pas les domaines mécanique, chimique, métallurgique et la régulation qui ont des contraintes considérables sur le fonctionnement du four.

***N.B :** Notre étude a été faite sur le four à arc qui existe dans le complexe sidérurgique El-Hadjar -Annaba –Algérie.*

## I. Introduction

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. C'est au début du XX<sup>em</sup> siècle que sont apparus les premiers fours à arcs industriels. La fusion des ferrailles au four électrique a été rendue possible par l'invention du four à arc par le Français Paul Louis **Héroult** (1863-1914), la première application industrielle a eu lieu le 9 octobre 1900. Le procédé permet d'élaborer des aciers de qualité. Initialement, le four Héroult comportait deux électrodes reliées chacune à une borne d'une génératrices à courant continu ou alternatif. Assez rapidement, il a été équipé de trois électrodes reliées à un réseau triphasés. A cette époque, il existe un autre type de four à arc, aussi très répandu pour la fusion de l'acier ; le four de **Girode** ce four comportait une seule électrode de voûte, reliée à une des bornes d'une génératrice, et plusieurs électrodes de sole en acier, reliées ensemble à l'autre borne. La capacité de ces fours était de l'ordre de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes.

Depuis cette époque, bien que reposant sur les mêmes principes de base, les fours à arcs ont connus 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 tonnes 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. Selon certaines études prospectives, la filière électrique devrait continuer à croître pour couvrir, environ 50 % de la production d'acier dans le monde [5].

## II. Arc électrique

### II.1. Définition

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 cette espace brutalement très conducteurs alors qu'il était isolant (ou presque) avant l'amorçage. On s'explique ainsi que :

- 1- Un arc doit être préalablement amorcé pour amener à l'incandescence un point de la cathode ; le mode d'amorçage le plus simple consiste à mettre en contact les électrodes. Ce contact, toujours imparfait, présente une résistance «  $R$  » appréciable et, si le courant qui la traverse a une intensité «  $I$  » suffisante (produit  $RI^2$  assez grand), les surfaces en contact sont portées à l'incandescence. Cela explique qu'un arc ne puisse subsister avec une cathode froide ; par exemple, avec une cathode dans l'huile, surtout si celle-ci est en cuivre (bonne conductivité thermique), le maintien de l'arc est plus difficile.
- 2- La décharge par arc exige un minimum de tension et un maximum de courant. Le minimum de tension est compris entre 10 et 20 V suivant le gaz et la distance entre les électrodes à courant égale, quand on écarte les électrodes, la tension de l'arc s'accroît.

## II.2. Propriétés

L'arc électrique, dont la forme caractéristique est au mouvement de l'air ascendant est dit arc voltaïque. Il est lumineux, instable et dégage de la chaleur. On peut en première approximation assimiler un arc électrique à une résistance variable. Alors que, si «  $I$  » le courant de l'arc, la tension s'exprime, par la relation usuelle.

$$U_a = R_a \cdot I \quad (I.1)$$

La courbe caractéristique de l'arc  $U_a = f(I)$  est donnée par la figure suivante, pour des valeurs croissantes de la longueur d'arc [6,7].

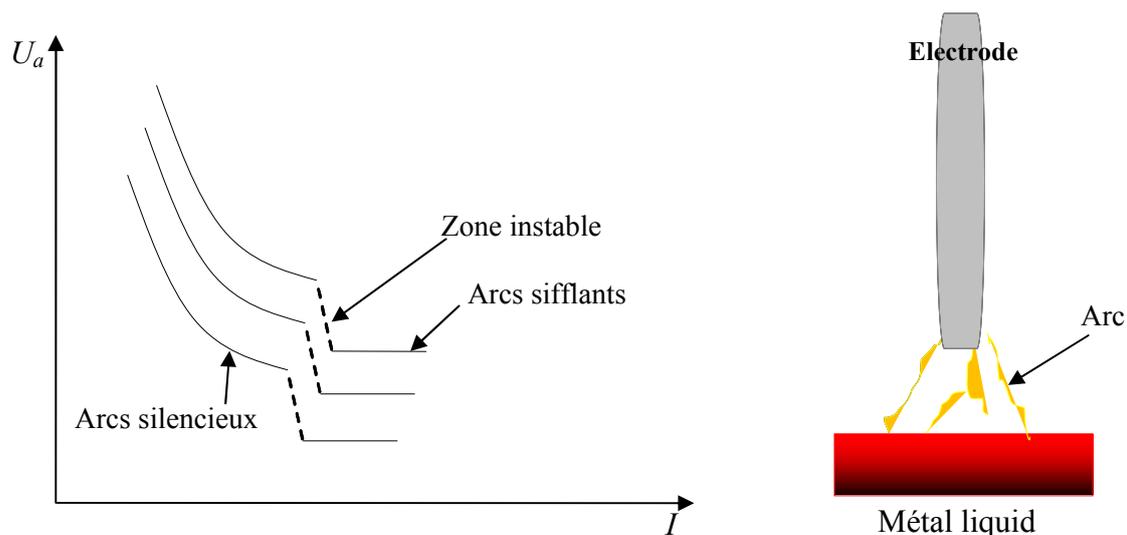


Figure I.1 : La courbe «  $U_a = f(I)$  »

### III. Conditions de fonctionnement d'un four à arc

#### III.1. Composition du four à arc

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Il existe plusieurs types de fours à arcs, le type le plus utilisé est le four dit de **Héroult** (ou encore four à arc sur charge), du nom de l'inventeur de ce procédé à la fin du XIX<sup>em</sup> siècle. Dans ce type de four, l'arc s'établit entre les électrodes (raccordées au réseau de puissance) et la charge à chauffer.

Le four à arc se compose d'une cuve garnie réfractaire et l'énergie nécessaire est fournie par des arcs électriques jaillissant entre des électrodes en graphites et la charge [8]

Les principaux éléments constitutifs du four électrique sont :

- L'alimentation électrique.
- L'enceinte du four proprement dite capable de contenir d'abord des ferrailles fondre, de densité relativement faible (donc nécessité d'un grand volume disponible), puis l'acier liquide porte à des températures de 1600 à 1700°C (donc nécessité d'un revêtement intérieur du cuve à l'aide de réfractaires), notamment au fond de cuve (sol réfractaire).
- Les installations annexes, telle que le système d'aspiration et traitement des fumés et les systèmes d'additions.

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 I.2 [5,9].

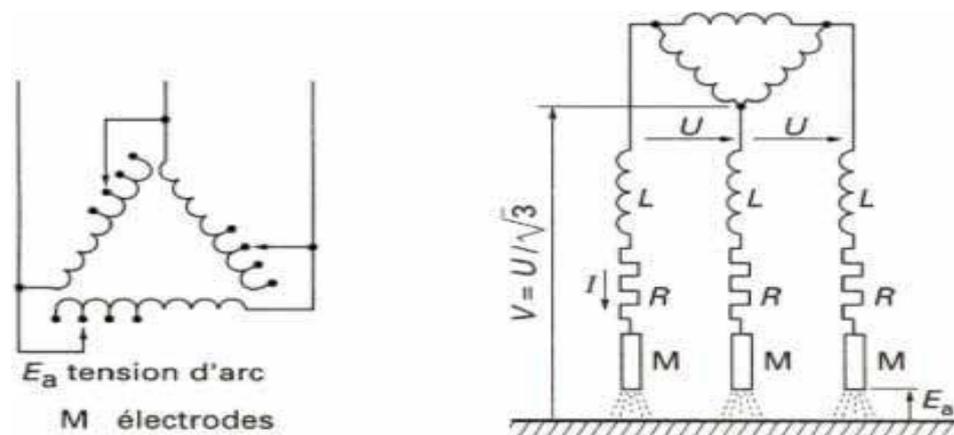


Figure I.2 : Schéma de principe du four à arc

La figure suivante présente une vue du four à arc le plus utilisé actuellement dans les aciéries électriques.

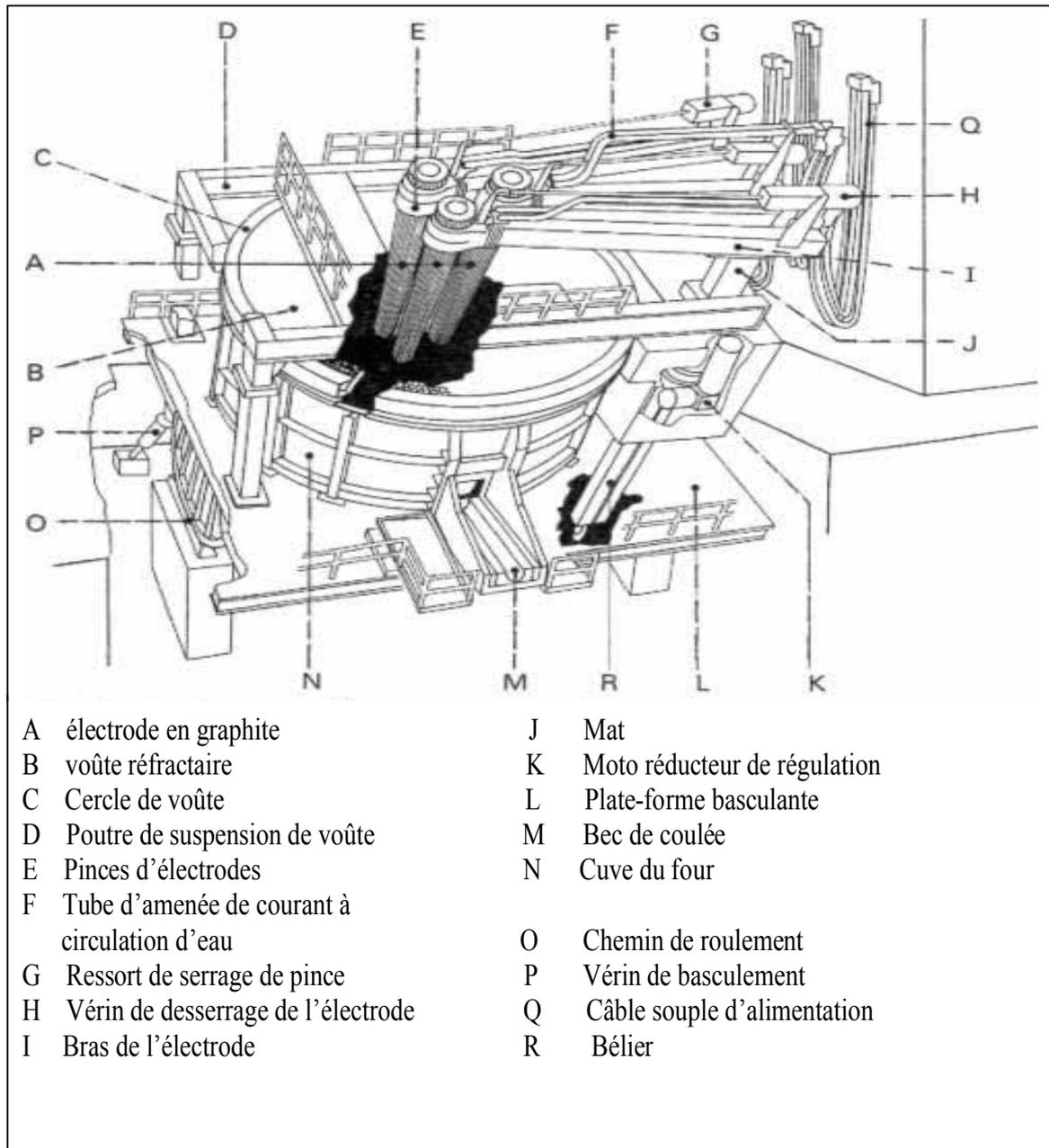


Figure I.3 : Four électrique de fusion type Héroult  
(D'après document Lectromelt) [5]

### III.2. Point de vue électrique

Au point de vue électrique, une marche du four dans les meilleures conditions, nous les rappellerons brièvement [10,11].

L'exploitant doit conduire les opérations de façon à obtenir un produit convenable dans le minimum de temps sans provoquer une usure excessive des réfractaires ou des électrodes. Il faut pour cela pouvoir régler le débit de chaleur dans une zone étendue, en général ce débit devra décroître pendant tout le cycle d'une opération.

Du fait de l'impédance des circuits et pour une tension secondaire «  $U_s$  » constante, le déplacement de l'électrode permet bien de régler l'intensité du courant, et par suite, la puissance mais dans des limites peu étendues et insuffisantes. D'où nécessité de changer la tension en cours d'opération.

A une tension donnée et à une valeur de self donnée correspond une puissance maximum qu'il est possible de dissiper dans l'arc qui augmente avec la tension et en raison inverse de la valeur de la self. Lorsque la puissance optimale est atteinte pour une tension donnée ( $\cos \varphi = 0,8$  environ) le seul moyen d'augmenter le débit de chaleur c'est de faire croître la tension secondaire.

En principe, on devra toujours chercher, au point de vue électrique, à marcher au maximum de tension possible et avec le minimum de self. Il y aura intérêt également à diminuer l'intensité maximale avec la tension.

On a intérêt à ne recourir à la bobine de self que momentanément pour réduire la valeur des appels de courant lorsque ces derniers sont plus particulièrement à craindre au début de la fusion par exemple, où des chutes de blocs de ferrailles sur les électrodes risquent de provoquer des déclenchements par court-circuit, à coups de courant que la rapidité des réglages automatiques ne peuvent que difficilement éviter.

Pour obtenir un bon rendement électrique le constructeur a diminué au maximum la résistance ohmique et la réactance de l'ensemble de l'installation. L'exploitant a dans le même but, intérêt à utiliser des tensions élevées, par contre l'utilisation des tensions élevées rend souvent nécessaire l'utilisation d'une self pour avoir une bonne stabilisation de l'arc et limiter l'importance des pointes de courant.

Si l'exploitant, en résumé a théoriquement toujours intérêt à utiliser à chaque instant l'arc le plus long possible, par contre ainsi que nous le verrons plus loin, la nécessité de protéger la voûte et le revêtement réfractaire le conduit en fin de fusion à diminuer la tension pendant l'affinage, et également pour avoir des arcs courts permettant de travailler le laitier.

### III.3. Point de vue thermique

Le but recherché est d'obtenir, en partant d'une charge donnée un métal de composition déterminée. Il faut donc commencer par fondre la charge, puis par l'affinage, en modifier la composition par l'élimination de différents éléments et addition d'autres éléments.

Il y a donc dans une opération deux phases principales bien distinctes c'est la fusion et l'affinage. Pour que l'opération soit complète il convient d'y ajouter la période de chargement, nécessaire pour introduire les ferrailles dans le four au début de l'opération, la coulée du métal en poche et, éventuellement, la réparation du revêtement réfractaire avant le chargement pour l'opération suivante.

#### III.3.1. Chargement

Le chargement doit être réalisé le plus rapidement possible pour limiter le refroidissement du creuset par le rayonnement des parois.

Nous verrons un peu plus loin que les pertes par chargement en cas de chargement automatique sont loin d'être négligeables.

La tendance actuelle est d'utiliser des fours à chargement rapide, la durée du chargement ne demandant que quelques minutes est indépendante de la capacité du four. A titre indicatif et de comparaison, la durée du chargement à la main dans des fours de différentes capacités varie de 35 mn pour une tonne à 105 mn pour un four de 25 tonnes, le temps nécessaire aux réparations n'étant pas compris [11].

#### III.3.2. Fusion

Le four étant chargé, le transformateur est mis sous tension et les trois électrodes sont descendues sur la ferraille. Les arcs s'allument entre l'extrémité des électrodes en graphite et la charge. Le métal fond rapidement sous l'action de la chaleur dégagée par l'arc et les électrodes descendent lentement jusqu'au moment où sous les arcs s'est formé un bain de métal fondu.

A partir de cet instant les arcs travaillent à l'intérieur du puits creusé à travers la charge, leur rayonnement fait ruisseler le métal et la charge s'affaisse peu à peu sur le sole. La quantité de bain augmente et noie à peu près complètement à un moment donné, les ferrailles non fondues. Les électrodes remontent au fur et à mesure que le volume du bain augmente. Alors commence la dernière période de la fusion, le rayonnement des arcs n'est plus limité par la charge, la surface du bain sous les électrodes est relativement grande,

toute la scorie qui s'est formée au fur et à mesure de la fusion du bain empêche cependant un rayonnement trop intensif vers la voûte. La fusion proprement dite peut donc se diviser en trois périodes bien caractérisées nécessitant les conditions d'exploitation bien distinctes [12] :

❖ **1<sup>er</sup> Période : Amorçage et début de la fusion**

Les arcs creusent des puits dans la charge froide. Les électrodes descendent lentement au fond de ces puits, puis commencent à remonter.

La ferraille en s'écroulant dans ces puits provoque des à coups de courant assez importants. C'est dans cette période que les déclenchements par court-circuit sont de ce fait, le plus à craindre.

❖ **2<sup>em</sup> Période : Fusion rapide**

Les arcs fondent le métal sous la protection de la charge elle-même, les éléments de ferraille en s'échauffant se soudent les uns aux autres et forment, au dessus du bain en formation, une voûte, jusqu'à son effondrement plus ou moins brutal.

Les risques de déclenchement par court-circuit sont limités en général au moment de l'effondrement de la charge que l'on a intérêt à provoquer lors d'un changement de tension.

Il est à noter que du fait de la réactance de l'ensemble de l'installation le courant de court-circuit est limité à quatre à cinq fois le courant normal et moins si la bobine de self est insérée en totalité.

❖ **3<sup>eme</sup> Période : Achèvement de la fusion**

Les arcs ne sont plus protégés et peuvent rayonner librement. On a intérêt à utiliser des arcs plus courts pour diminuer leur rayonnement sur la voûte.

La fusion est une opération physique qui peut être écourtée en augmentant la puissance absorbée par le four. On a intérêt évidemment à la conduire aussi vite que possible. Mais l'économie réalisée par l'augmentation de production qui en résulte est souvent contrebalancée en partie par une consommation plus grande de réfractaire. La tendance actuelle est cependant de fondre aussi vite que possible.

### **III.3.3. Affinage**

En période d'affinage le métal est complètement fondu, le métallurgiste conduit la scorie en faisant des additions plus ou moins grandes de chaux et spath dans le procédé basique, de sable et d'un peu de chaux dans le procédé acide, suivant l'allure des réactions.

En fin d'opération, lorsque le métal est chimiquement au point, il est en général

nécessaire de modifier sa composition par des additions de « *Fe-Mn* », « *Fe-Si* » ou autres éléments.

L'affinage est donc une opération où l'arc travaille continuellement sur une scorie et peut rayonner librement. La puissance doit être réglée suivant les réactions ou suivant le refroidissement du bain par les additions. La tension doit être assez faible pour avoir des arcs courts et protéger la voûte, la demande d'énergie est beaucoup moins importante que pendant la fusion.

Pendant toute la période d'affinage, la surface du bain peut être considérée comme sensiblement plane. Avec une régulation en ordre de marche, il n'y a aucune chance de mise en contact du bain avec les électrodes, donc peu de pointes de courant importantes à craindre.

Lorsque l'opérateur veut travailler le laitier il utilisera des tensions plus élevées pour avoir des arcs d'une certaine longueur que lorsqu'il voudra travailler le bain où il utilisera des tensions faibles pour avoir des arcs courts.

La température des parois verticales et du fond du creuset reste sensiblement constante pendant toute l'opération.

La température de la voûte varie suivant le stade de l'opération, ceci est dû au fait que la voûte présente une inertie calorifique plus faible (volume relativement faible et calorifugeage médiocre). Le revêtement cède de la chaleur pendant la fusion, il en absorbe pendant l'affinage. La quantité de chaleur emmagasinée est maximale généralement au milieu de l'affinage.

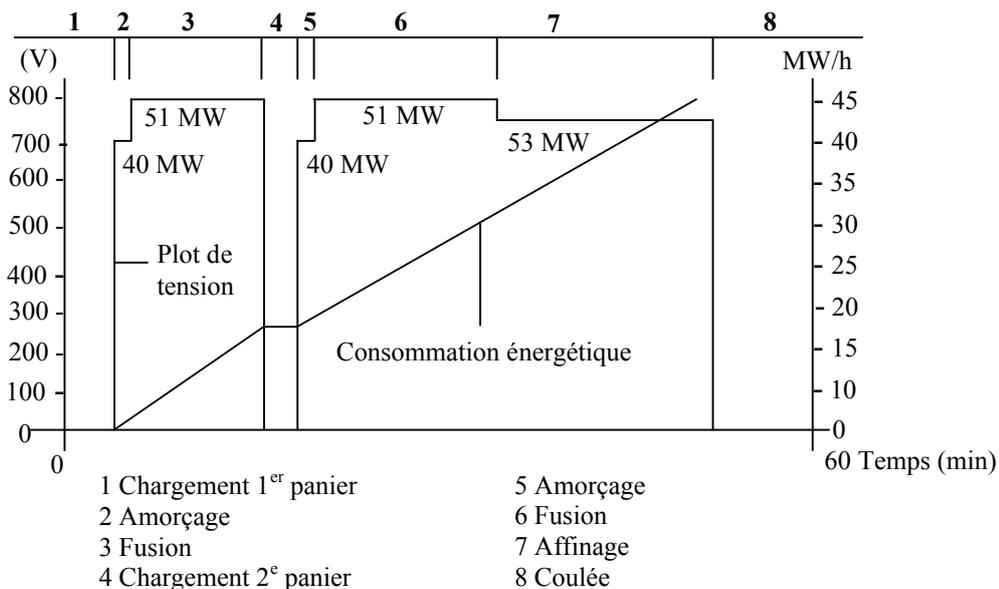


Figure I.4 : Diagramme de fusion d'un four à arc : Exemple [9]

## **IV. Classification des fours à arc**

### **IV.1. Four à arc d'après leur nature d'arc**

#### **IV.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.

#### **IV.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.

#### **IV.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.

#### **➤ Applications**

Les fours à arc libre, dont la capacité s'échelonne entre 100 KVA et 500 KVA environ, sont surtout utilisés pour l'élaboration de métaux (fonte alliage, bronze, etc.,...) qui ne peuvent être obtenus dans des conditions économiquement satisfaisantes avec les autres types de fours. Jusqu'à une époque récente, les fours à arc sur charge étaient utilisés pour l'élaboration d'aciers spéciaux, mais depuis 1950, des travaux menés par sidérurgies et des électriciens ont permis des accroissements considérables des puissances. Ces fours, dites à ultra haute puissance ou productivité « **U.H.P** » peuvent fournir des dizaines de mégawatts ; ils sont alimentés à partir du réseau haute tension et permettent la production économique d'acier ordinaire à une cadence rapide [13,14].

### **IV.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation**

#### **IV.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.

Contrairement ce qui se passe pour une résistance linéaire solide ou liquide, la tension d'arc diminue quand le courant augmente ; un arc pur aurait une caractéristique hyperbolique. En fait, le système possède toujours une impédance linéaire dont la caractéristique est représentée par la droite **III**.

La caractéristique pratique aura donc l'allure de la courbe **VI** et le fonctionnement sera instable sur la partie gauche de la courbe et stable sur la partie droite.

Du point de vue électrique, ce four peut être représenté par le schéma de la figure I.6

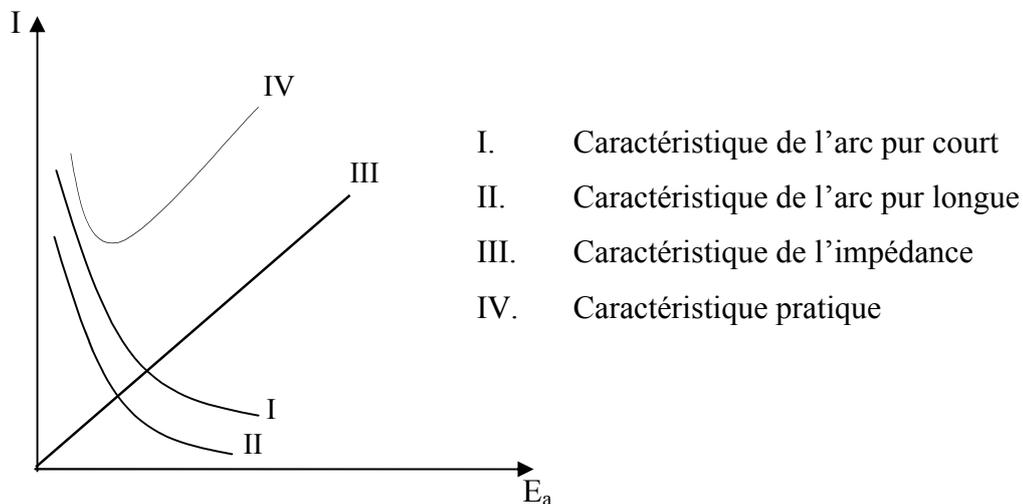


Figure I.5 : Courbe caractéristique d'arc [5]

#### IV.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 :

- La cuve
- Le berceau de basculement
- La voûte

**▪ La cuve du four à arc**

La cuve en tôle d'acier renforcée par des nervures est revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire. Cette cuve est composée de deux parties ; le fond ou « solide » et la virole, sur nombreux fours, cette virole est amovible et il existe une virole de recharge, on gagne un temps précieux, le four pouvant continuer à être utilisé pendant la réfection du garnissage réfractaire. La technique de garnissage a connu une évolution importante vers les années 1975 par l'apparition des viroles composées de panneaux refroidis par circulation d'eau (water-jackets) en lieu et place de la tôle revêtue de réfractaire. Deux ouvertures sont prévues dans la cuve pour la porte de dégraissage et le bec de coulée.

**▪ Le berceau de basculement**

Le four à arc possède deux positions de basculement :

- En avant, pour la coulée, avec un angle suffisant pour que le four se vide bien.
- En arrière, pour le décrassage.

Le basculement est assuré par des vérins hydrauliques, dont la course limite celui ci. D'autre part, la disposition du centre de gravité et du centre du basculement est telle que le four a toujours tendance à revenir dans sa position normale de travail, de manière à limiter le risque d'accident en cas de défaillance du système de commande.

**▪ La voûte**

La voûte ou couvercle du four, est réalisée en briques réfractaires maintenues par un anneau de voûte. Elle est percée de trois trous destinés au passage des électrodes ; un quatrième trou sert à l'aspiration des fumées qui sont filtrées avant d'être rejetées dans l'atmosphère. Comme pour la virole, la voûte peut aussi être fermée d'éléments à circulation d'eau. Dans ce cas, seul la partie centrale autour des électrodes reste constituée de réfractaires.

**➤ Autres dispositifs**

Un certain 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.
- ◆ Pincettes d'électrodes servant en même temps d'amenées en courant.
- ◆ Câbles souples d'alimentation généralement à refroidissement à circulation d'eau.

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 [9].

#### IV.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.

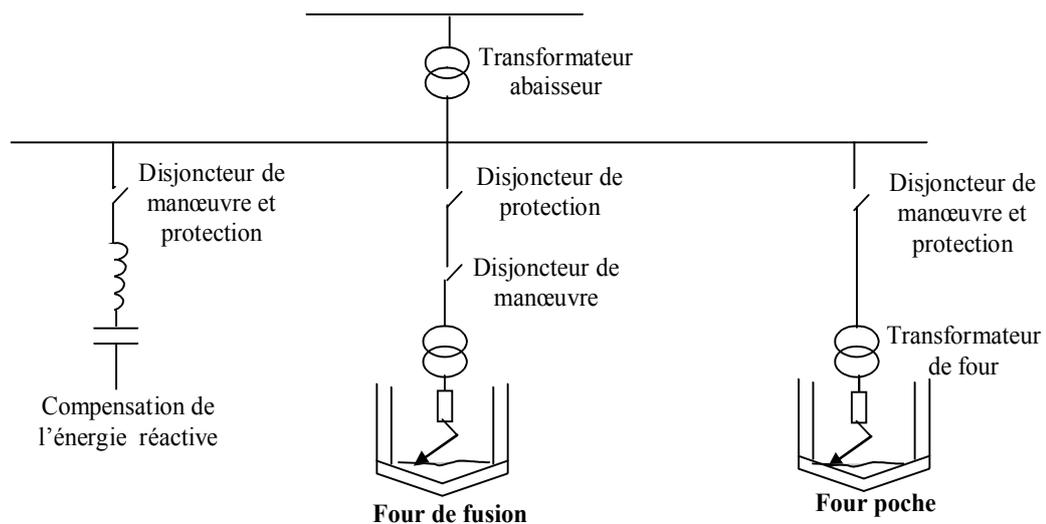


Figure I.6 : Schémas électrique d'un four à arc à courant alternatif

### **IV.2.2. Four alimenté en courant continu**

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 alimentés 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 [15].

#### **IV.2.2.1. 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  $p=12$  [9,16].

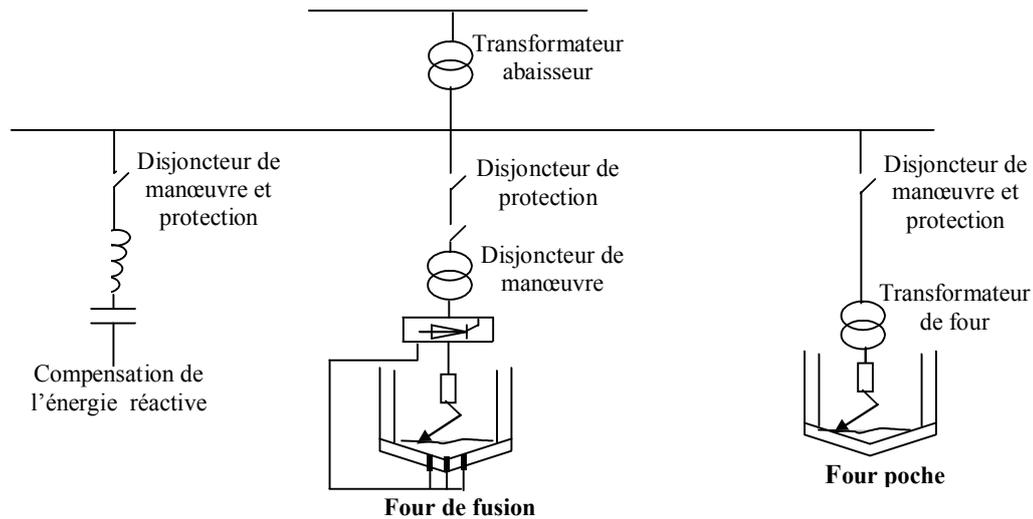


Figure I.7 : Schémas électrique d'un four à arc à courant continu

### V. 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. Ce la 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 tension secondaires. Quand 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 suivant [17] :

$$U_{eff} - A.I_{eff} = 0 \quad (I.2)$$

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 satisfaisante, 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.

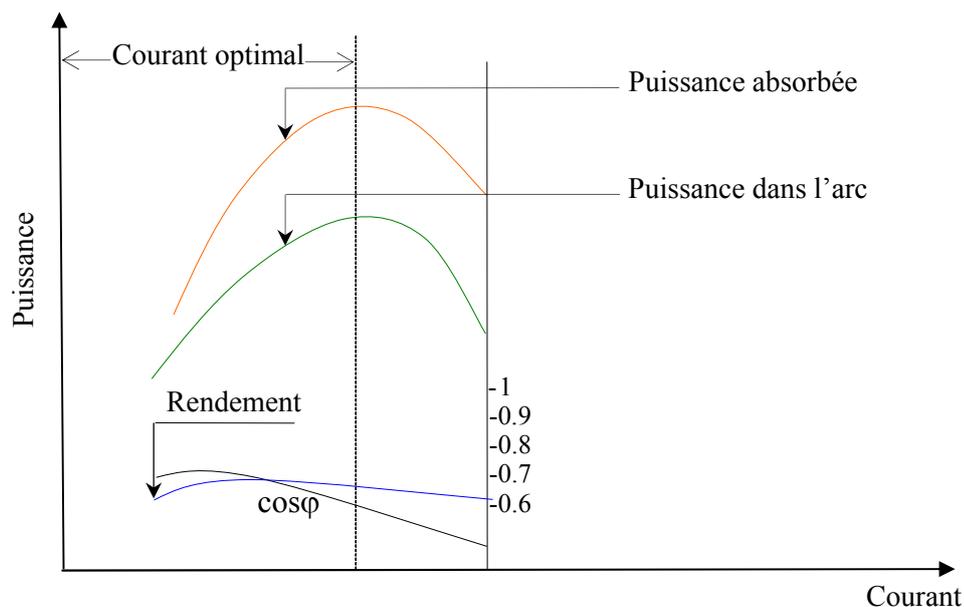


Figure I.8 : Puissance absorbée par le four

### ❖ Conduite du four

La conduite du four est conditionner par, en plus de la qualité et la quantité de la charge enfourné, l'usure et l'échauffement du matériel. La charge peut être de la ferraille des produits produits ou, un mélange des deux. Et l'arc peut être amorcée avec ou sans charge de métal liquide.

Pour réaliser une fusion dans un temps minimal, on place dans la charge la puissance optimale faisant un compromis entre les critères de limitation suivant :

- Usure du garnissage par le rayonnement des arcs.
- Surcharge du transformateur du four.
- Echauffement des connections et en particulier des électrodes.
- Surveillance de l'énergie consommée en fonction de l'énergie allouée par le distributeur [18].

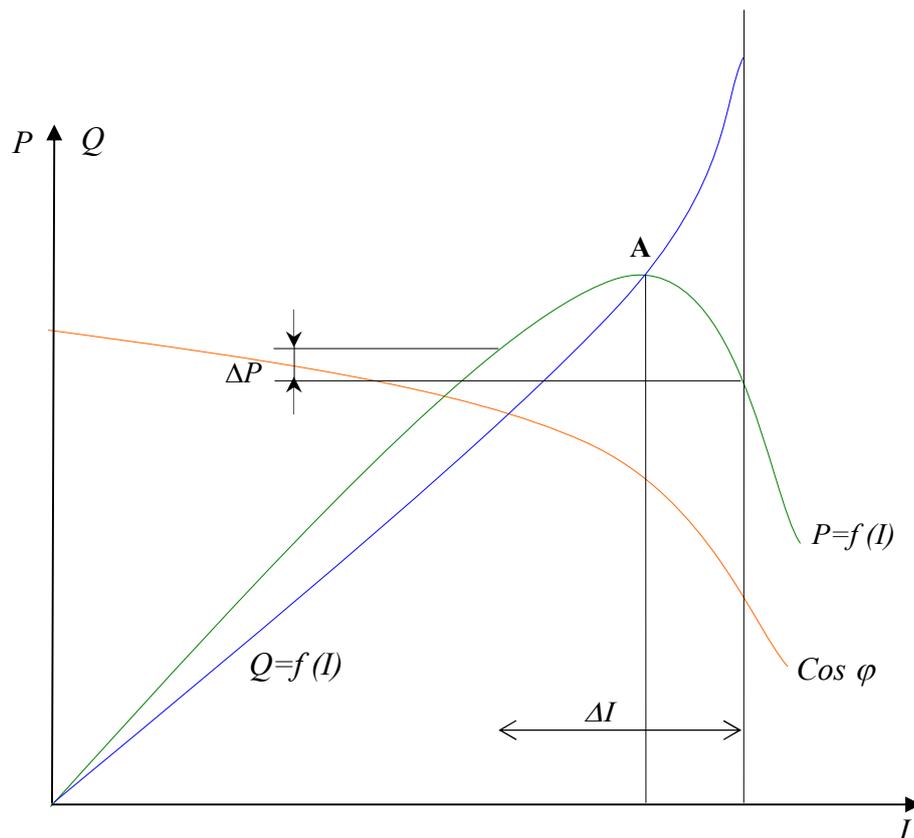


Figure I.9 : Courbes de charge théoriques d'un four à arc

## VI. Raccordement et marche du four

Dans la marche des grands fours à arcs modernes, la recherche systématique d'une faible longueur des arcs caractérisée par une puissance active maximale, donc un facteur de puissance de 0,707, la consommation en énergie réactive équivaut à celle en énergie active, ce qui du point de vue contrat d'énergie, pénaliserait son utilisateur. Il faudra donc redresser le facteur de puissance c'est à dire produire l'énergie réactive nécessaire à proximité de l'installation industrielle, et éviter ainsi le transport de cette énergie par le réseau.

En régime UHP le four absorbe les puissances :  $P = \frac{S}{\sqrt{2}}$  et  $Q = \frac{S}{\sqrt{2}}$  ce régime est illustré par le diagramme suivant [19] :

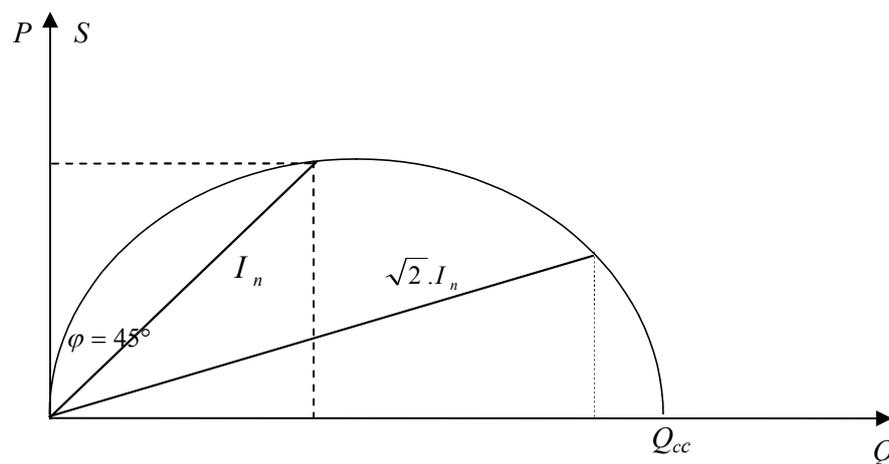


Figure I.10 : Marche UHP d'un four à arc

En court-circuit la puissance active devient négligeable et la puissance réactive double, puisque le courant de court-circuit atteint la valeur  $\sqrt{2}.I_n$ .

$I_n$  : Etant le courant de fonctionnement du four.

Donc la puissance réactive varie de zéro « four à arrêt » à  $\frac{S}{\sqrt{2}}$  « four en marche normale », puis à  $\frac{2.S}{\sqrt{2}}$  marche en court-circuit ; La variation totale de la tension entre le

four à l'arrêt et le four en court-circuit est donc égal à  $\frac{2.S}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{P_{cc}}$  : Et son amplitude moyenne correspond à  $\Delta U\%$  telle que :  $\Delta U\% = \frac{S}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{P_{cc}}$  Quand au four de moyenne puissance dont le fonctionnement est caractérisé par un facteur de puissance voisin de 0,9, des études ont montrés que le courant de court-circuit est approximativement égal à  $2,5.I_n$ . Ceci emmènera des variations de puissance réactive allant de zéro « four à l'arrêt » à  $0,445.S$  « four en marche normale » puis à  $2,5.S$  « four en court-circuit ».

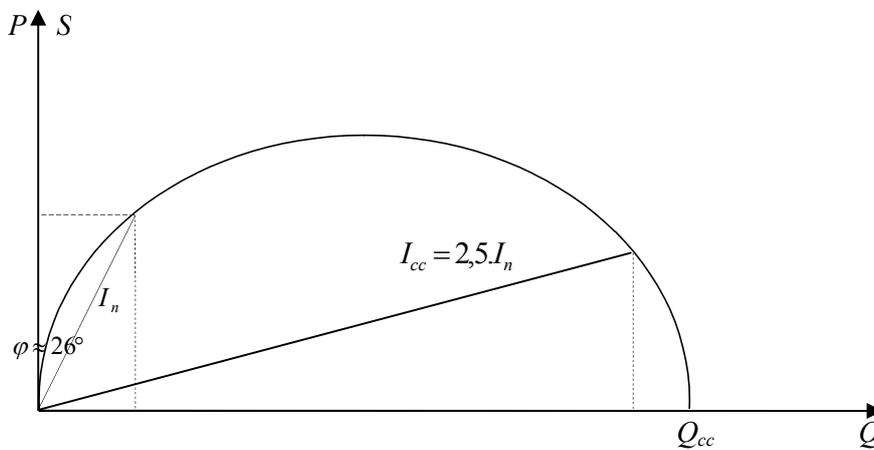


Figure I.11 : Marche normale d'un four à arc

## VII. Avantages et inconvénients du four à arc

### VII.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 luxe, 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 [19].

## **VII.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).

## **VIII. Evolution des données économiques**

L'amélioration progressive des coûts spécifiques d'investissement et d'exploitation s'est accélérée du fait de :

- L'amélioration du rendement thermique et de la productivité résultat de l'adoption de hautes puissances spécifiques (500 à 1000 kW/t).
- La réduction des frais de main d'œuvre, par suite de l'automatisation et de la taille grandissante des fours.
- La grande commodité d'installation et l'économie d'espace.
- La baisse relative du coût du kWh.

Les très fortes intensités utilisées à présent (70 à 80 KA) ont permis de faire passer le rendement de transmission thermique de 0,5 pour un four classique à 0,8 pour un four UHP. La marche très rapide du four permet en outre de réduire notablement les charges fixes (faible investissement) par unité produite. C'est ici qu'apparaît un avantage

fondamental de l'aciérie électrique ; pour un même coût d'investissement à la tonne, le four **UHP** « Ultra Haute Puissance » autorise des dimensions très diverses : La possibilité de créer de petites unités permet la réalisation d'usines dont la capacité peut être de 100 mille à 500 mille tonne /an pour des usines essentiellement orientées vers les produits longs légers (fer à béton, fil machine, petit profilées dites fers marchands).

L'aciérie électrique permet donc aussi maintenant la production d'aciérie ordinaires très variable ; on constate qu'en raison même de son indépendance vis à vis des fournitures de métal liquide, ce procédé se prête bien à une expansion progressive des installations, en suivant au plus près les accroissements des besoins d'acier et en permettant d'éviter des anticipations d'équipement coûteux.

On estime en effet qu'il s'écoule de l'ordre de cinq ans entre le début de la construction et les premières productions d'une usine à l'oxygène intégrée, alors qu'en général un à dix huit mois peuvent suffire pour une aciérie électrique dont le développement peut être étalé dans le temps au fur et à mesure des disponibilités financières et des développements des besoins. [13, 14,18].

## **IX. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les fours à arcs, concernant leurs descriptions, types, rôles, avantages et inconvénients ...etc.

Après avoir rappelé les notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement des fours à arcs, nous avons vu que l'aciérie électrique avec le four à arc est également économique et suivais d'une énorme évolution surtout coté capacité et taux de production.

## I. Introduction

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquences du continu jusqu'à quelques centaines de hertz. Il en résulte un bruit spectral, dont les composantes modulant la tension d'alimentation du réseau d'alimentation provoquent le phénomène de papillotement. Le four à arc produit du papillotement aléatoire qui ne peut pas être évalué par simple calcul. L'utilisation d'un flickermètre est alors requise [21].

L'arc électrique n'est stable que si la puissance dissipée est suffisante pour l'entretenir, c'est à dire pour assurer l'ionisation du gaz qui permettra le passage du courant. Cela nécessite une tension et un courant élevé. Par nature, dans un four à courant alternatif, à chaque alternance, le phénomène d'extinction et d'allumage de l'arc se produit. Les fluctuations de tension produites par le four à arc sont élevées dans les phases de fusion (début de cycle ou immédiatement après l'enfournement du deuxième ou du troisième panier). Cette phase perturbée dure à chaque fois 2 à 3 min. La phase d'affinage correspond à des arcs plus stables, donc à des fluctuations de tension moins importantes. Durant cette phase, la température élevée des gaz et la vaporisation du métal augmentent la conductivité du milieu. De plus, la non linéarité d'un arc produit des harmoniques (qui fluctuent aléatoirement au cours de la coulée) ainsi que des phénomènes rayonnés (bruit, champs électromagnétiques) [8,21].

## 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 ( $\geq 9$  kHz).
- Décharges électrostatiques.

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 [22,23].

- 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.

### III. Fréquence « Déviations »

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1 %) au sein du réseau synchrone européen en régime normal de fonctionnement et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques. La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu [24].

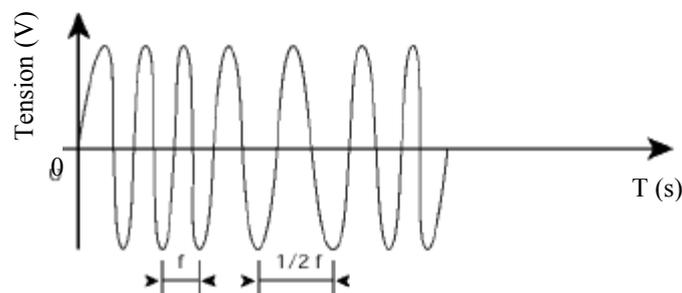


Figure II.1 : Exemple de fluctuation de la fréquence

### IV. Amplitude

#### IV.1. Creux de tension et coupures brèves

##### IV.1.1. Origine des creux de tension

Les creux de tension sont dus aux courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations clients ; événements aléatoires, dus à des phénomènes atmosphériques « foudre, givre, tempête ... », des défaillances d'appareils, d'accidents. Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées (sinon ce sont des « fluctuations de tension »). D'après la norme [EN 50160], le creux de tension est défini

comme une diminution brutale de la tension d'alimentation à une valeur située entre 90 et 10 % de la tension déclarée, suivie du rétablissement après un court laps de temps. Leur durée peut aller de 10 ms (1/2 période du 50 Hz) à 1 minute, par convention (fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des protections).

– Un défaut est éliminé en 0,1- 0,2 s en HT et de 0,2 s à quelques secondes en MT [10].

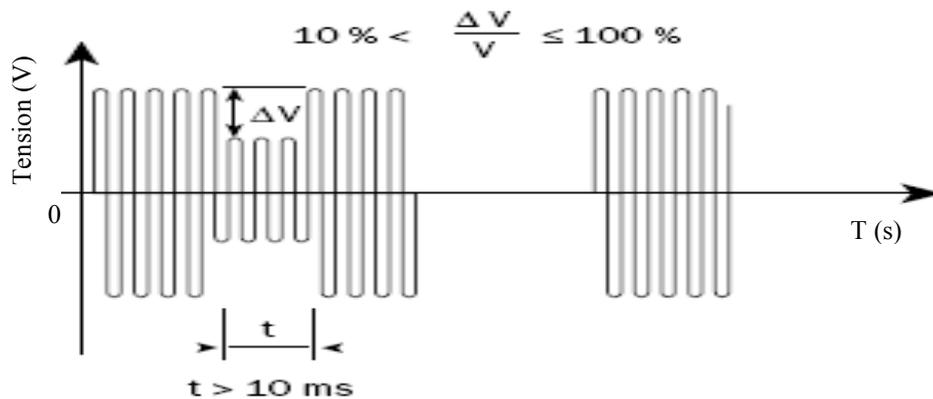


Figure II.2 : Les creux de tension

#### IV.1.2. Conséquences des creux de tension

Ils peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, si leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites [25,26].

**Interruption d'alimentation [EN 50160]** : Condition dans laquelle la tension aux points de fourniture est inférieure à 1 % de la tension déclarée. Elle peut être classée comme :

- **Prévue** : Les clients sont informés par avance pour permettre l'exécution de travaux programmés sur le réseau de distribution.
- **Accidentelle** : Lorsqu'elle est provoquée par des défauts permanents ou fugitifs, la plupart du temps liés à des événements extérieurs, à des avaries ou causes externes. Elle peut être classée comme :
  - **Coupe longue** (dépassant 3 minutes) provoquée par un défaut permanent.
  - **Coupe brève** (jusqu'à 3 minutes) provoquée par un défaut fugitif.

### IV.2. Flicker ou papillotement de l'éclairage

#### IV.2.1. Origine du flicker

Dans les installations où il y a des variations rapides de puissance absorbée ou produite ou des démarrages fréquents (soudeuses, éoliennes, fours à arc, compresseurs, générateurs d'air conditionné, ...), on observe des variations rapides de tension, répétitives

ou aléatoires. Selon la norme [EN 50160] le flicker est l'impression d'instabilité de la sensation visuelle due à un stimulus lumineux dont la luminosité ou la répartition spectrale fluctue dans le temps. Le flicker est le gêne pour les usagers provoquée par un papillotement de la lumière émise par les lampes. Il s'agit d'un phénomène complexe, car il fait intervenir les caractéristiques [9] :

- De l'ampoule (Source de lumière).
- De l'oeil (Capteur).
- Du cerveau (Interprète).

En outre, la sensibilité au taux de **flicker** dépend de l'observateur. Donc le papillotement est du à des variations rapides de tension, à une fréquence comprise entre 1 et 25 Hz environ. Elles sont généralement provoquées par l'exploitation des fours ou soudeuse à arc.

- Le flicker se transmet sur les réseaux de tension supérieure en s'atténuant dans le rapport inverse des puissances de court-circuit.
- Le flicker se transmet sur les réseaux de tension inférieure avec une amplitude pratiquement équivalente.

A titre indicatif, les coefficients de propagation sont d'environ :

- $K_{THT/HTB} = 0,8$  pour un poste THT/HTB.
- $K_{HTB/HTA} = 0,9$  pour un poste HTB/HTA.
- $K_{HTA/BT} = 1$  pour un poste HTA/BT.

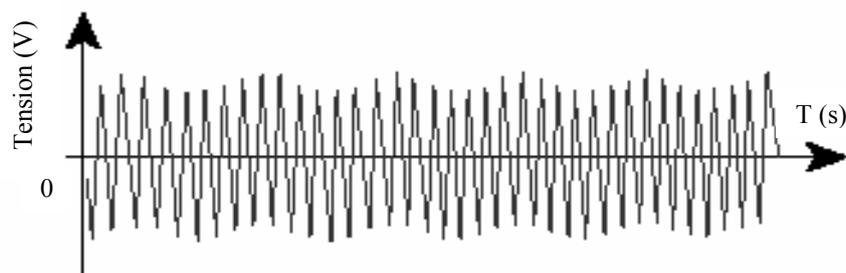


Figure II.3 : Variations rapide de la tension

- Le niveau du flicker le plus élevé est produit par les fours à courant alternatif (avec ou sans réactance série) ; ce niveau dépasse très largement le niveau préconisé actuellement. Ces mesures confortent celles faites par ailleurs par d'autres organismes, et montrent bien que le niveau du flicker dépend non seulement du type de four utilisé mais aussi de la puissance de court-circuit du réseau sur lequel le four est raccordé.

**La prédétermination du niveau de flicker d'un four à arc** est toujours délicate. En effet, elle dépend non seulement des caractéristiques électriques de l'alimentation, mais aussi de la nature des ferrailles, de leur préchauffage éventuel, de la conduite et de la régulation du four, de la conception mécanique du four etc. Aussi, il n'existe pas actuellement de règle précise et fiable de prédétermination du flicker pour les fours à arc. Le raccordement d'un four à arc demande donc une étude dans chaque cas particulier. Toutefois, sur la base d'un certain nombre d'expérimentations menées sur des fours en service, il a été établi une relation qui détermine le niveau de flicker au point commun de couplage ( $P_{cc}$ ) en fonction des puissances de courts-circuits du réseau et du four et d'un coefficient caractéristique du four étudié [8]. Cette relation est la suivante:

$$P_{ST99\%} = K_{ST} \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- $S_{ccf}$  : Puissance de court-circuit du four à arc vue du  $P_{cc}$ .
- $S_{ccn}$  : Puissance de court-circuit du réseau vue du  $P_{cc}$ .
- $K_{ST}$  : Coefficient caractéristique variable entre 48 et 85.

Le problème de la relation (II.1) réside dans la détermination du coefficient  $K_{ST}$ . En effet, ce coefficient est variable d'un four à l'autre, notamment en fonction des ferrailles utilisées, du préchauffage, de la conduite et de la régulation du four, enfin de tout un ensemble de caractéristiques non électriques du four.

Par conséquent, lorsque l'on souhaite estimer le niveau de flicker dans le cadre d'un projet de nouveau four à arc par exemple, on peut choisir, comme paramètre  $K_{ST}$  le même que celui d'un four similaire actuellement en service. Ce coefficient est alors obtenu par les mesures de flicker et par la connaissance des puissances de courts-circuits du réseau et du four.

#### **IV.2.2. Conséquence du flicker**

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 [24].

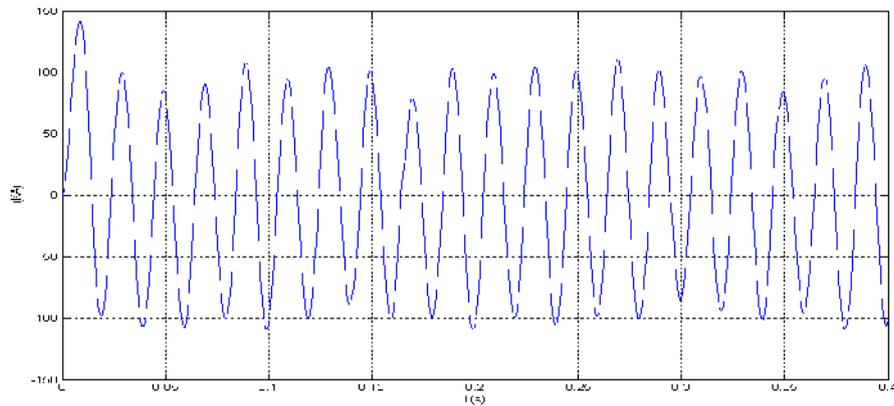


Figure II.4 : Allure temporelle du courant absorbé par un four à arc

## V. Forme d'onde

### V.1. Transitoires

Les surtensions de durée inférieure à  $10\text{ ms}$  sont appelées surtensions transitoires (figure II.5). Ces surtensions sont provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre) ou, plus fréquemment, par le fonctionnement d'équipements électriques (commutations de charges plus ou moins inductives produisant des surtensions transitoires à haute fréquence).

Ces phénomènes transitoires peuvent également survenir lors de la commutation de deux thyristors, provoquant entre les deux phases un court-circuit de très courte durée. Le temps de montée peut varier de moins de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes. Ces surtensions en BT sont généralement inférieures à  $800\text{ V}$ , mais elles peuvent dépasser  $1000\text{ V}$  suite à la fusion d'un fusible [27].

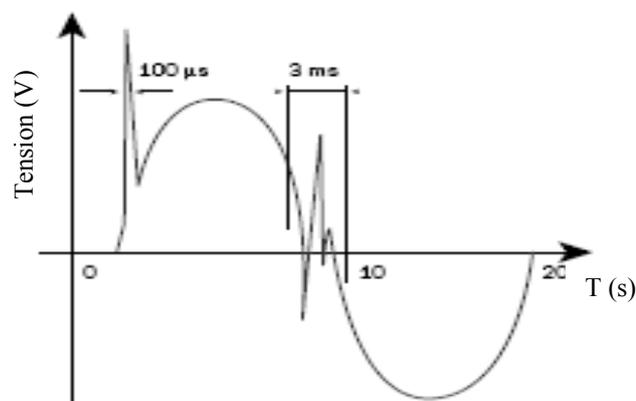


Figure II.5 : Les surtensions transitoires [33]

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

## **V.2. Phénomènes transitoires internes aux alimentations des fours à arc**

### **V.2.1. Surtensions**

Les alimentations électriques des fours à arcs sont le siège de surtensions plus ou moins importantes qui peuvent causer des dommages importants à l'installation électrique et doivent, par conséquent, faire l'objet d'une attention particulière. De plus, dans certaines configurations particulièrement défavorables, ces surtensions peuvent se propager au sein du réseau de l'usine et causer des dommages aux installations annexes. Sur ces installations, on distingue les surtensions d'origine interne et les surtensions d'origine externe. Les surtensions **d'origine interne** dépendent du réseau d'usine et des composants qui le constituent. On peut citer en particulier :

- Les surtensions de manœuvre des organes de coupure.
- Les surtensions liées à des phénomènes de ferrorésonance provoqués par la présence des circuits magnétiques saturables.
- Les surtensions consécutives à des phénomènes de résonance dus aux inductances et aux capacités du réseau d'alimentation.
- Les surtensions liées à des amorçages sur les circuits basses tensions (accumulation de poussières, présence d'eau...).

Les surtensions **d'origine externe** comprennent essentiellement les surtensions atmosphériques liées aux chocs de foudre sur les lignes. Dans une alimentation de four à arc, le composant le plus critique est le transformateur de four. En effet, la moindre avarie sur le transformateur de four se solde par un arrêt plus ou moins long de l'aciérie électrique, ce qui conduit à des pertes d'exploitation qui peuvent être très importantes selon la durée de l'arrêt de production. Par conséquent, lors de la conception du réseau d'usine, le transformateur de four doit faire l'objet d'une protection bien étudiée de manière à être la plus efficace.

Parmi les différentes solutions techniques susceptibles d'être mises en place pour faire face à ces phénomènes de surtensions, celles que l'on rencontre le plus souvent sur les

installations de fours à arc sont : Les parafoudres à oxyde de zinc, le rôle de ces parafoudres est d'écarter les surtensions en écoulant l'énergie correspondante, ces éléments doivent être placés au plus près de l'élément à protéger et munis de compteurs de décharge.

Les circuits « RC » qui permettent de limiter les phénomènes transitoires et d'amortir les résonances créées par des surtensions à front raide lors de la manoeuvre des disjoncteurs.

D'une manière générale, lors de la conception d'une installation de four à arc, il est recommandé d'évaluer les tensions maximales permanentes et les surtensions susceptibles d'apparaître dans le réseau d'alimentation. Cette évaluation peut être menée par exemple dans le cadre d'une étude de coordination de l'isolement.

L'étude de coordination l'isolement permet alors de :

- Prévoir le niveau maximal des surtensions.
- Définir la tenue diélectrique des matériels.
- Dimensionner et choisir l'emplacement optimal du dispositif de protection de manière à écouler la surtension à la terre sans dommage et ne pas la transmettre avec des niveaux dangereux à d'autres composants du réseau [8,28].

➤ **Exemples de fours à arc récents avec systèmes de limitation des perturbations :**

Selon le niveau des perturbations à compenser, une ou plusieurs des solutions techniques exposées ci avant peuvent être mises en œuvre dans les alimentations des fours à arc. En fait, comme chaque four à arc présente des particularités (puissance et type de four, nature des ferrailles, caractéristiques du réseau HT, etc.), les alimentations et les systèmes de limitation des perturbations sont étudiés au cas par cas, ce qui conduit bien souvent à des architectures de réseaux d'alimentation très différentes d'un four à l'autre.

### **V.3. Harmoniques**

#### **V.3.1. Origine des harmoniques**

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites « non linéaires ». Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension. Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental.

Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une composante à la fréquence de 250 Hz, soit 5x50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental.

Un physicien nommé **Joseph FOURIER** a démontré que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé fondamental, et les autres à des fréquences multiples du fondamental appelé harmonique [32].

A ces termes purement sinusoïdaux peut se rajouter une éventuelle composante continue.

$$v(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (\text{II .2})$$

n : Nombre entier.

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  : Fréquence fondamentale.

T : La période.

Les coefficients  $A_0$ ,  $A_n$  et  $B_n$  sont indépendants du temps et sont donnés par les intégrales suivantes

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t).dt \quad (\text{II .3})$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t). \cos(n\omega t).dt \quad (\text{II .4})$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t). \sin(n\omega t).dt \quad (\text{II .5})$$

Ou :

$A_0$  : est la valeur moyenne de la fonction  $v(t)$ .

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique (THD : Total Harmonic Distorsion) en tension ou en courant :

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}{C_1^2}} \quad (\text{II .6})$$

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

La borne supérieure est fixée par la norme EN50160 au 40<sup>em</sup> rang, c'est à dire à 3 kHz pour la fréquence industrielle [29,30].

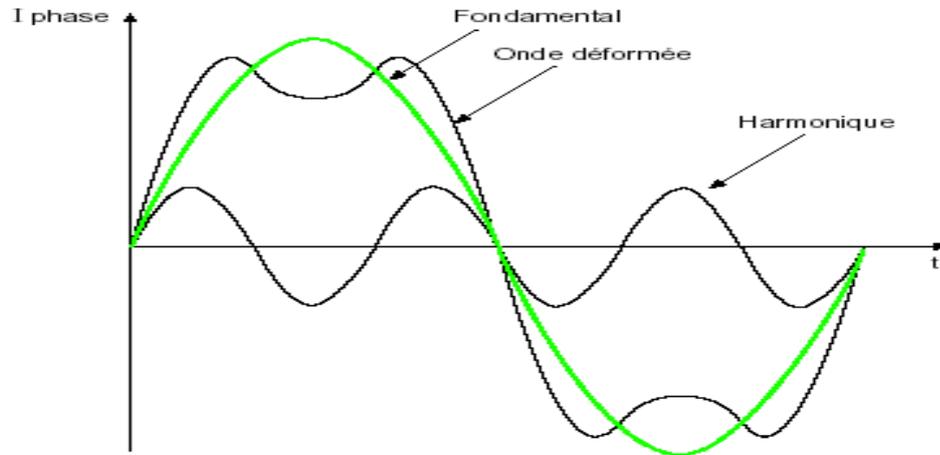


Figure II .6 : Représentation d'une onde déformée

Les principales sources d'harmoniques sont :

- **Les charges industrielles** qui se composent des équipements d'électronique de puissance (variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage) et les charges utilisant l'arc électrique (fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents)). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).

A noter que du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement énergétique, performances élevées...) l'utilisation d'équipements à base d'électronique de puissance se généralise.

- **Les charges domestiques** munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage, téléviseurs, fours à micro-ondes, plaque à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes. De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes. A noter que l'utilisation de ce type d'appareils croît en nombre et parfois en puissance unitaire.

### V.3.2. Conséquences des harmoniques

Leurs conséquences sont liées à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire) et au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants. De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance.

Leurs effets ont toujours un impact économique du fait du surcoût lié à :

- Une dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie).
  - Un surdimensionnement des équipements.
  - Une perte de productivité (vieillesse accélérée des équipements, déclenchements intempestifs).
  - L'influence sur les transformateurs du réseau (augmentation des pertes à vide à cause de l'effet particulier des courants harmoniques).
  - L'influence sur les câbles de HT (diminuent la durée de vie du câble, dégradation du matériel isolant).
  - Pertes supplémentaires dans les condensateurs, et les transformateurs.
  - Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils.
  - L'influence sur le fonctionnement des redresseurs.
  - L'influence sur la télécommande dans les réseaux.
  - L'influence sur les condensateurs des réseaux.
- ***Effets instantanés ou à court terme***
    - Déclenchements intempestifs des protections.
    - Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur...).
    - Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs).
    - Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
    - Perte de précision des appareils de mesure.
  - ***Effets à long terme***
    - Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.
    - Echauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes joule, des pertes fer.....).

- Fatigue mécanique (couples pulsatoires dans les machines asynchrones.....).
- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes joule et diélectriques.
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...).
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire.....) [8, 31, 32].

On résume dans le tableau ci-dessous les principaux des harmoniques

**Tab II.1 : Les principaux effets des harmoniques**

Nature du matériel électrique	Effet de la pollution harmonique
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	-Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans : -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 pairs
Câbles	-Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3 - Pertes diélectriques supplémentaires
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc.	Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation)
Condensateurs de puissance	-Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant un vieillissement prématuré des condensateurs
Ordinateur	-Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Dispositifs de protection (Fusibles, Disjoncteurs magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2

Par conséquent, lorsque, à certaines fréquences harmoniques, l'impédance du réseau est élevée et que des injections des courants harmoniques surviennent aux fréquences correspondantes, il en résulte, en appliquant la loi d'Ohm, des tensions harmoniques importantes.

### ❖ Les conséquences sont alors multiples

On peut estimer qu'il y a risque de surcharger les condensateurs en raison des surintensités les traversant et, en particulier, aux hautes fréquences. Une tension harmonique élevée aux bornes d'une installation peut faire apparaître des dysfonctionnements d'appareils possédant une électronique sensible, ainsi que des échauffements dans les enroulements des moteurs et des transformateurs.

L'apparition de tensions harmoniques aura d'autre part pour effet de générer des courants harmoniques sur les réseaux et dans les installations des autres clients.

La grandeur reconnue comme principale caractéristique de l'effet nocif des distorsions harmoniques est la valeur des tensions harmoniques superposées à la tension normale des réseaux auxquelles les équipements se trouvent soumis.

Bien que des études soient toujours en cours, on préconise actuellement les valeurs limites suivantes pour les perturbations harmoniques de courant engendrées par chaque utilisateur pris isolément, en son point de raccordement au réseau [33] :

$$I(h) \leq \frac{K_n P_s}{U_c \sqrt{3}} \quad (\text{II .7})$$

Où :

$h$  : est le rang harmonique,

$U_c$  : est la valeur de tension contractuelle,

$P_s$  : est la puissance souscrite.

## VI. Application sur le four « Expérimentation »

Pour notre étude nous avons fait une application sur le four à arc du complexe EL-Hadjar, et pour la mesure des harmoniques nous avons utilisé un équipement de SONELGAZ appelé de « **MAP MILL** ». Cet équipement est destiné pour l'analyse des réseaux électriques triphasés, et aussi il fait la mesure des harmoniques jusqu' à la quinzième (c'est à dire de 2 à 15), mais malheureusement pas de signalisation des inter-harmoniques.

Les résultats de mesure représentés dans les figures ci-dessous :

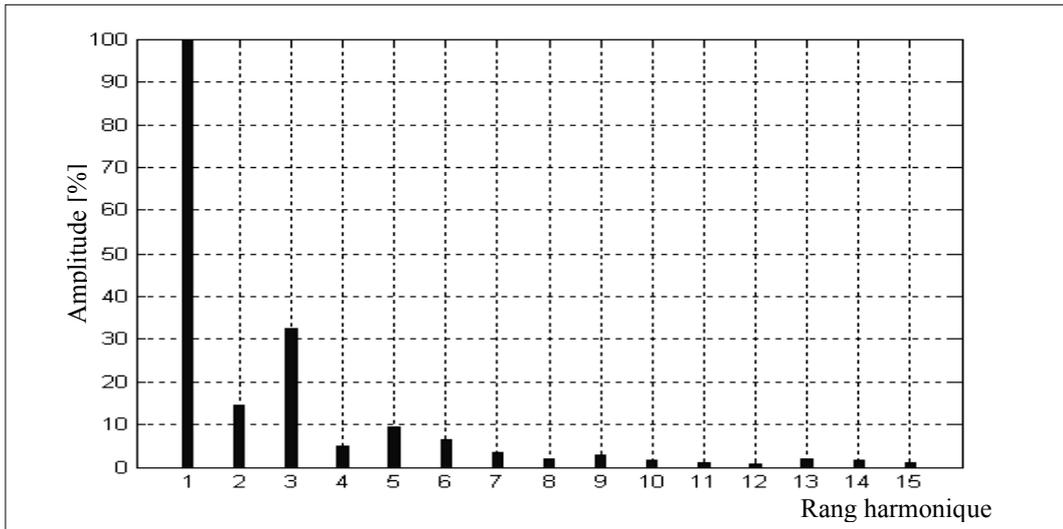


Figure II.7 : Spectre d'harmonique du four à arc

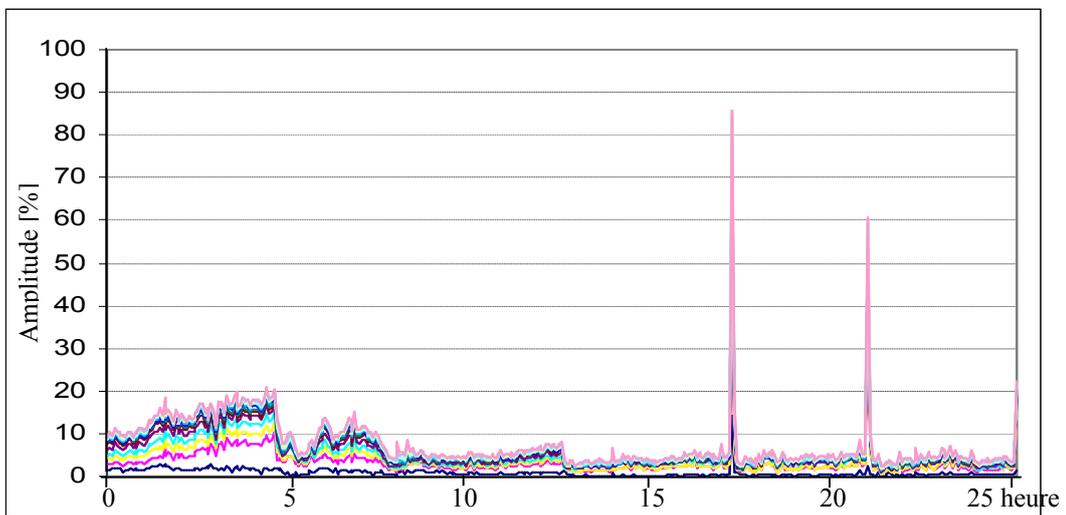


Figure II.8 : Harmoniques du courant générées par le four

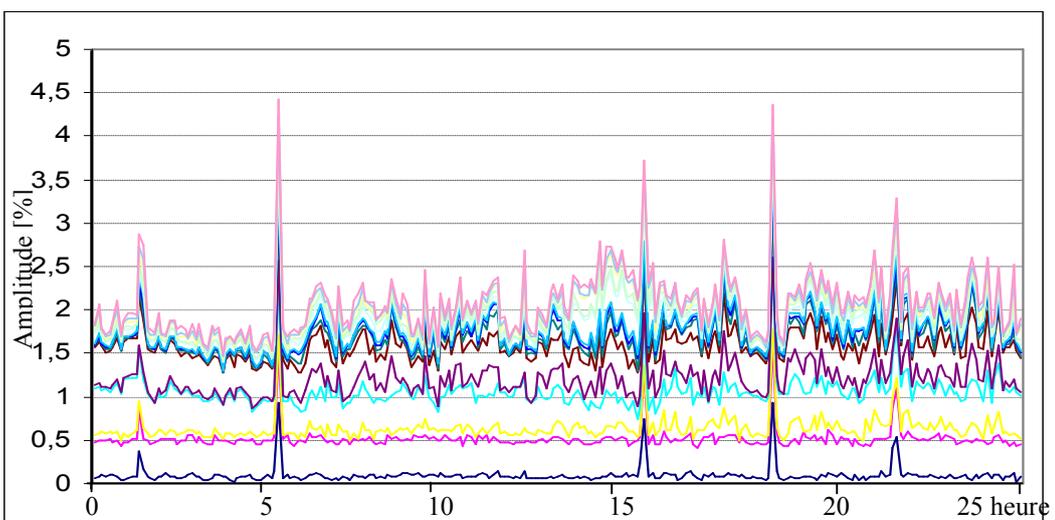


Figure II.9 : Harmoniques de tension générées par le four

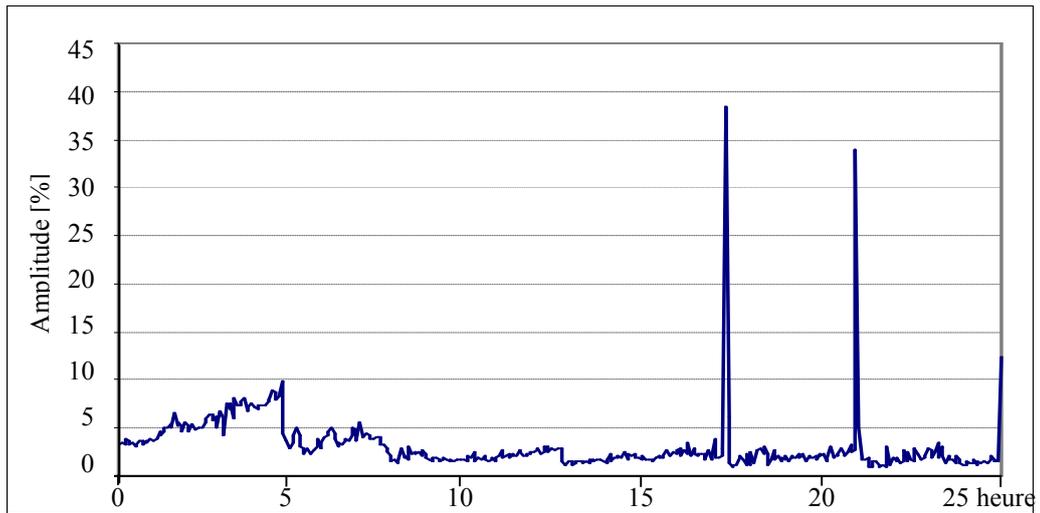


Figure II.10 : Variation du THD

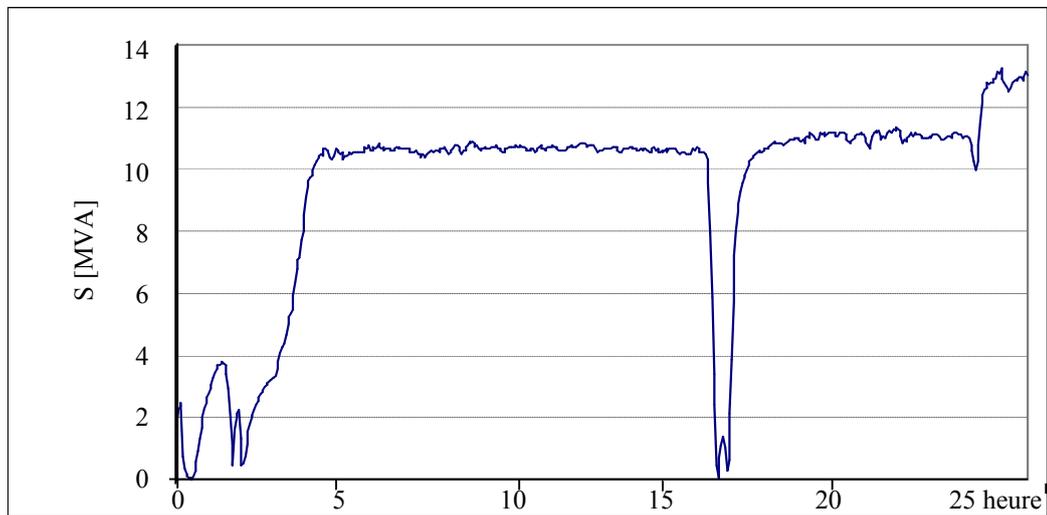
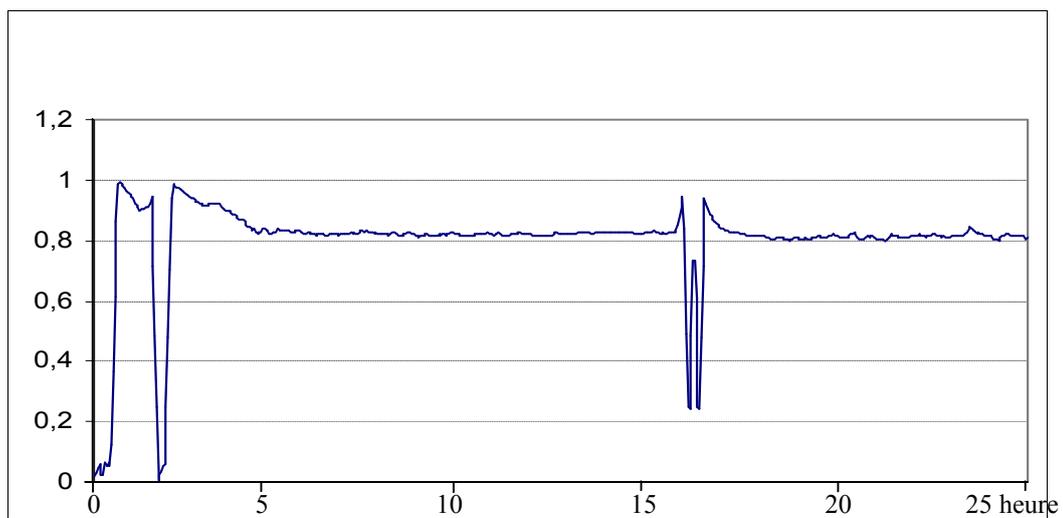


Figure II.11 : Variation de la puissance apparente du four

Figure II.12 : Variation du  $\cos \varphi$

➤ **Commentaire**

Le THD atteint la valeur maximale d'environ **34,8%**, et on sait que les harmoniques les plus fréquemment rencontrés dans le cas des réseaux triphasés sont les harmoniques de rangs impairs. Les distributeurs d'énergie surveillent les harmoniques de rangs 3, 5, 7, 11 et 13 qui sont supérieurs à toutes les normes des harmoniques qui existent (la norme CEI 61000-3-6).

Pratiquement, la compensation des harmoniques des rangs les plus bas (jusqu'au rang 13) est généralement suffisante.

✓ **Normes utilisées**

- CEI 61000-2-2: Niveaux de compatibilité (sources BT).
- CEI 61000.3.6: Niveaux de planification (sources MT et HT).
- EN 50160 : Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution (07-1994).

**Tab II.2. Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables**

Harmoniques impairs non multiples de 3				Harmoniques impairs multiples de 3				Harmoniques pairs			
Rang	BT	MT	HT	Rang	BT	MT	HT	Rang	BT	MT	HT
<b>5</b>	6	5	2	<b>3</b>	5	4	2	<b>2</b>	2	1,6	1,5
<b>7</b>	5	4	2	<b>9</b>	1,5	1,2	1	<b>4</b>	1	1	1
<b>11</b>	3,5	3	1,5	<b>15</b>	0,3	0,3	0,3	<b>6</b>	0,5	0,5	0,5
<b>13</b>	3	2,5	1,5	<b>21</b>	0,2	0,2	0,2	<b>8</b>	0,5	0,4	0,4
<b>17</b>	2	1,6	1	<b>&gt;21</b>	0,2	0,2	0,2	<b>10</b>	0,5	0,4	0,4
<b>19</b>	1,5	1,2	1					<b>12</b>	0,2	0,2	0,2
<b>23</b>	1,5	1,2	0,7					<b>&gt;12</b>	0,2	0,2	0,2
<b>25</b>	1,5	1,2	0,7								
<b>&gt;25</b>	0,2+1,3 x(25/h)	0,2+0,5 x(25/h)	0,2+0,5 x(25/h)								

Pendant les périodes de consommation constante (Fig.II.11 et 12) bien que les puissances actives et réactives du four sont quasi-constantes, le THD varie (Fig. II .10) ce qui est la conséquence du **caractère stochastique** de certains harmoniques de tension et de courant (Fig. II.8 et 9), vu que la non linéarité est différente pour chaque électrode.

## VII. Déséquilibre « Non Symétrie »

### VII.1. Origine du 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 II.13).

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 et 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 [23,34].

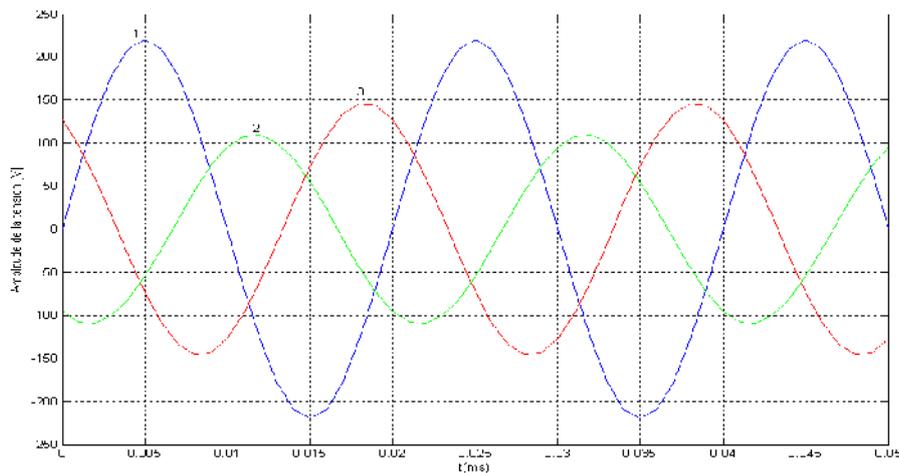


Figure II.13 : Déséquilibre de tension

### VII.2 .Conséquence du non symétrie

Il est plus intéressant d'aborder le problème du non symétrie par type d'équipement. Le non symétrie (déséquilibre) d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils connectés en basse tension [34] :

Donc on peut résumer les conséquence comme suit :

- 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 du 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 antirésonance 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 [23].

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  $U_i$  et directe  $U_d$  [22, 24].

### **VIII. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vue :

Les différents types de perturbations affectant l'onde de tension tels que le flicker, les harmoniques, le non symétrie...etc. En particulier, nous avons passé en revue d'une manière un peu plus approfondie sur les perturbations induites par les fours à arcs.

Vu la nature de l'arc électrique qui est non linéaire, dissymétrie et instable, les perturbations harmoniques générées par le four à arc sont de caractère stochastique.

## I. Introduction

Les fours à arcs sont utilisés presque exclusivement pour la fabrication d'acier à partir de ferraille de récupération. Dans ce type de four, les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, ce dernier fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide [9,35].

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

Le four à arc est utilisé pour fournir des aciers de qualité d'une matière première de la chute en acier, donc il est indispensable actuellement de faire un modèle pour bien commander et optimiser leur fonctionnement et aussi augmenter la production, ce dernier est le but le plus demandé de tous les investisseurs en sidérurgie et dans la fabrication de l'acier [36,37].

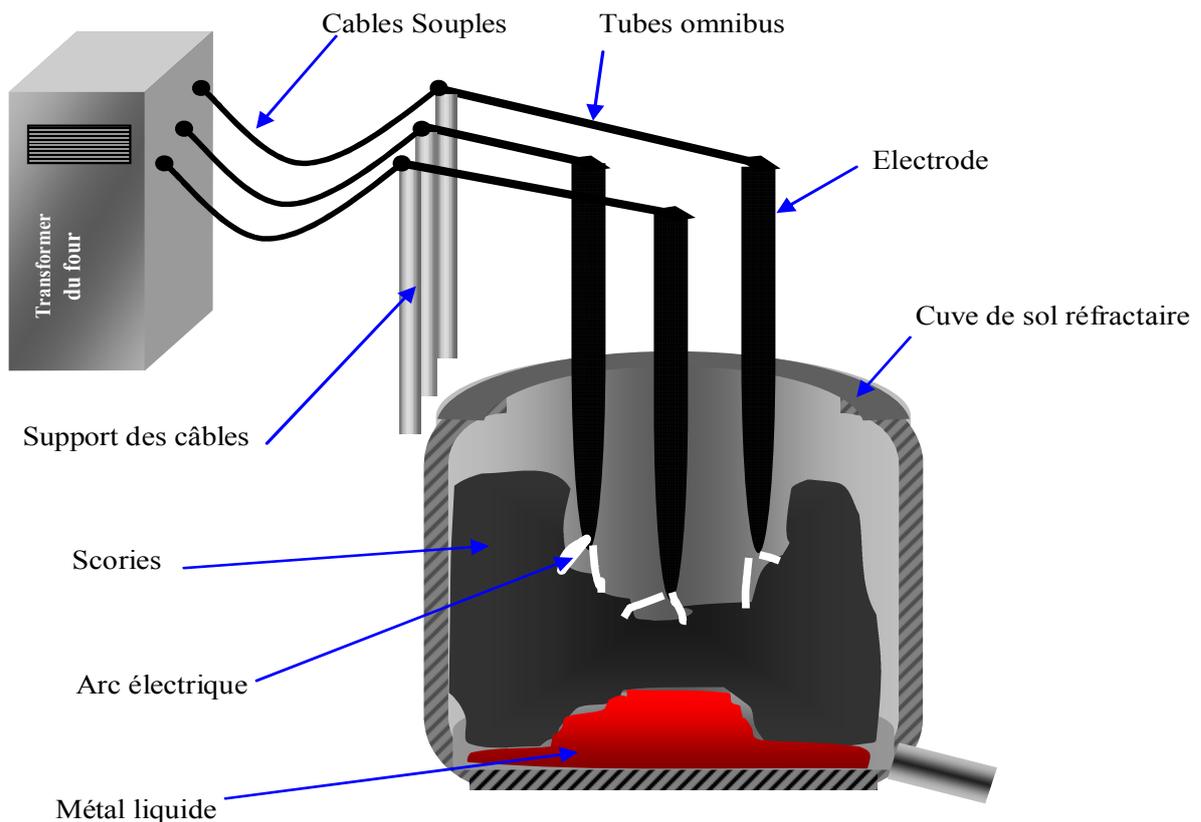


Figure III.1 : Four à arc électrique

## II. Description du model du four

Notre application à été faite sur un four à arc à courant alternatif situé au sein de l'aciérie électrique de la société « Arcelor-Mittal », ancien nom Mitall-Steel, et à l'époque SNS « Société National de Sidérurgie » qui se trouve à la zone de Sidi Ammar, complexe de El-Hadjjar –Annaba –ALGERIE.

Ancien Mittal Steel d'Annaba est une société en participation entre Mittal-steel « investisseur Indien (70 %) » et SIDER « Etat Algérienne (30%) », et maintenant Arcelor « Investisseur Français » prend 51% de 70% du Mittal et nommé Arcelor-Mittal c'est la plus grande usine sidérurgique intégrée et dans la région du Maghreb et est situé 12 kilomètres de sud de la ville d'Annaba. Il a une capacité d'aciérie de 2.0 millions de tonnes par an.

L'usine à ses propres mines de minerai de fers captifs situés dans Ouenza et Boukhadra sous le nom de Mittal Tebessa. Les équipements gauches consacrés, reliés par chemin de fer à l'usine, assurent le mouvement efficace de la matière première entrante et l'expédition des produits finis aux marchés de domestique et d'exportation.

Mittal-Steel Annaba emploie les technologies à l'oxygène et d'aciérie électriques pour la fabrication de l'acier liquide. Ceci est alors moulé dans des galettes/billettes dans les machines respectives de bâti.

- ✦ **Les galettes** sont roulées dans le laminoir bandes chaud. Une partie des enroulements laminés à chaud sont encore laminées à froid dans un laminoir à froid « Tandem » après marinage. Selon leur application finale, les enroulements laminés à froid peuvent être recuits et peut être passés, immersion chaude galvanisée ou étamer enduit.
- ✦ **Les billettes** sont introduites dans le moulin de barre et de tige. Une partie de l'acier liquide du four électrique à arc est moulée dans les lingots qui sont employés dans la fabrication des tubes sans couture.

La gamme de produit fini de Arcelor Mittal-Steel Annaba inclut les enroulements et les feuilles laminées à chaud et laminées à froid, les tubes galvanisés plongés chauds de produits, de fer blanc, de barre de fer, et sans couture. Avec une prise forte sur son marché intérieur, la compagnie exporte son rendement vers d'autres pays, Europe, le Moyen-Orient, la Chine et Sud-est Asiatique du Maghreb [38,39].

### ➤ Qualité

Avec la modernisation du laminoir bandes chaud et de la plupart d'autres projets accomplis, *Arcelor-Mittal-Annaba* est bien placé pour satisfaire ses clients en termes de qualité et livraison.

### ➤ Équipements

- Deux batteries de four à coke d'une capacité combinée de 1,2 million de tonnes par an dont on est en fonction.
- Deux usines d'agglomération d'une capacité combinée de 3,57 millions de tonnes par an dont on est en fonction.
- Deux fourneaux d'une capacité de 2,1 millions de tonne par an.
- Trois magasins en acier de fonte, deux avec le convertisseur et un avec le four électrique à arc.
- Laminoir bandes chaud semi continu d'une capacité de 1,8 million de tonnes par an.
- Laminoir à froid tandem de cinq stands d'une capacité de 1,05 million de tonnes par an et de 0,2 million de réversible de laminoir à froid de tonnes par an dont le tandem est en fonction.
- Deux lignes de galvanisation d'une capacité de 0,3 million de tonnes par an dont on est en fonction.
- Une ligne d'étamage électrolytique d'une capacité du 90.000 de tonnes par an.
- Un moulin sans couture de tube d'une capacité de 0,7 million de tonnes par an.
- Un moulin de barre et de tige d'une capacité de 0,45 million de tonnes par an.
- Un moulin de barre d'une capacité de 0,4 million de tonnes par an.

La figure suivante montre le schéma unifilaire du modèle étudié [41,42].

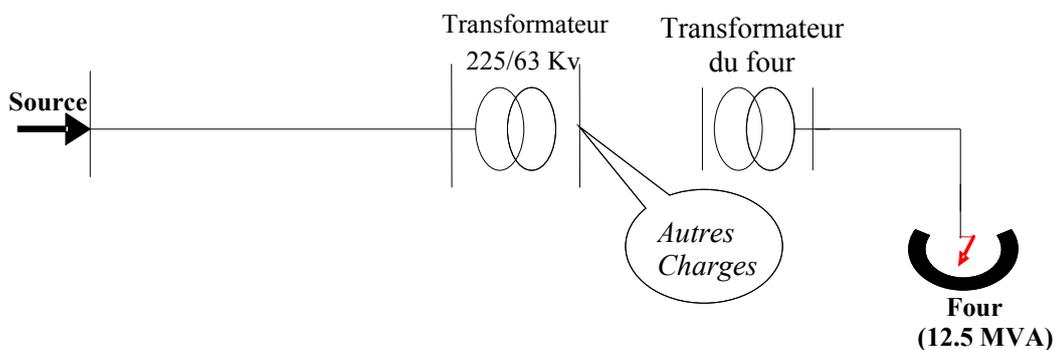


Figure III.2 : Schémas monophasé du système étudié

L'alimentation électrique d'un four à arc est formée des éléments suivants :

- Une arrivée moyenne ou haute tension.
- Le disjoncteur du four qui doit assurer un très grand nombre de coupures (60 à 80 par jour) et qui doit donc présenter une très grande fiabilité.
- Le transformateur de four HT/BT ou MT/BT, suivant le type d'arrivée. Ce transformateur est en général refroidi par eau. Il est équipé d'un commutateur de prises à vide ou en charge, entraîné par une commande électrique. Ce transformateur est de construction spéciale car l'intensité secondaire peut atteindre 150000 A.
- La basse tension reliant le transformateur aux pinces d'électrodes est constituée par un ensemble de tubes et de câbles souples à circulation d'eau, cette basse tension doit être particulièrement [21,40].

Des études techniques complexes sont indispensables pour maîtriser les phénomènes électriques (chute de tension, puissance réactive, harmonique, etc.). Elle contribue à la sécurité du fonctionnement et à la continuité de service de l'installation [9,21].

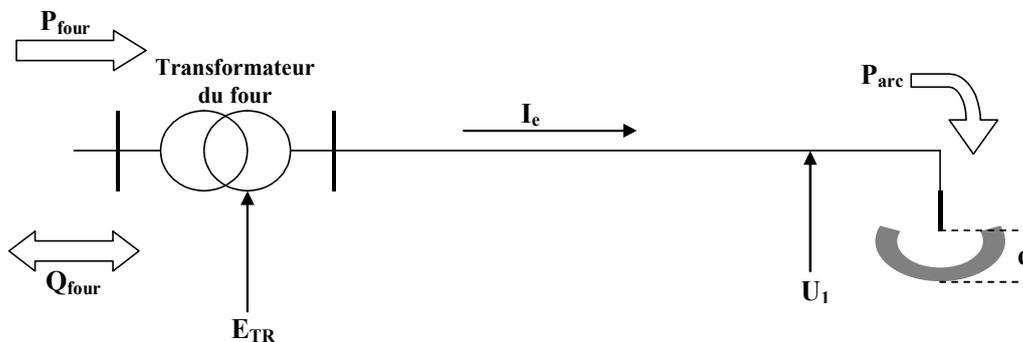


Figure III.3: Alimentation du four à arc [41,42].

## II.1. Traitement des données

Selon le modèle du four représenté sur la figure (III.2), et les équations célèbres du transformateur et du four donc on peut écrire [43, 44,45] :

$$E_{tr} = \sqrt{3}Z_1 I_e + U_1 \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Puis on peut tirer : } Z_1 = \frac{[E_{tr} - U_1]}{\sqrt{3}I_e} = \frac{\Delta U_1}{\sqrt{3}I_e} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Et on sait que : } Z_1 = \sqrt{R_1^2(I_e, T) + X_1^2(T)} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Donc : } R_1 = \frac{P_{\text{four}} - P_{\text{arc}}}{3I_e^2} \quad (\text{III.4})$$

Et d'après les équations (III.2, III.3 et III.4), on peut écrire :

$$X_1 = \frac{1}{\sqrt{3}I_e} \sqrt{\Delta U_1^2 - \frac{[P_{EAF} - P_{\text{arc}}]^2}{3I_e^2}} \quad (\text{III.5})$$

Ou :

$P_{\text{four}}$  : La puissance active consommée par le four.

$Q_{\text{four}}$  : La puissance réactive consommée par le four.

$P_{\text{arc}}$  : La puissance active de l'arc électrique.

$I_e$  : Courant du four.

$E_{TR}$  : Tension primaire du transformateur.

$U_1$  : Tension secondaire du transformateur.

$Z_1$  : L'impédance du four et les câble souples.

$R_1$  : La résistance du four et les câble souples.

$X_1$  : La réactance du four et les câble souples.

$d$  : Distance entre l'électrode et la matière à fusionnée.

## II.2. Courbes caractéristiques du four « Etude énergétique »

D'après les équations qu'on a, et les relations classiques de l'électricité, on peut tracer tous les paramètres du four à arc en fonction de la distance d'électrodes « d », les figures [II.4 jusqu'à II.19] présentent une étude expérimentale du notre four.

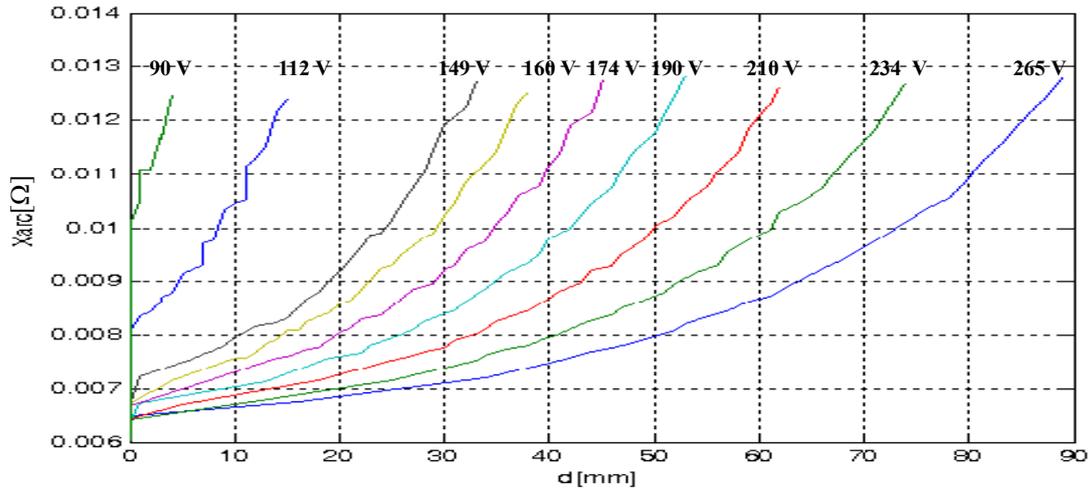


Figure III.4 : Variation de la réactance d'arc

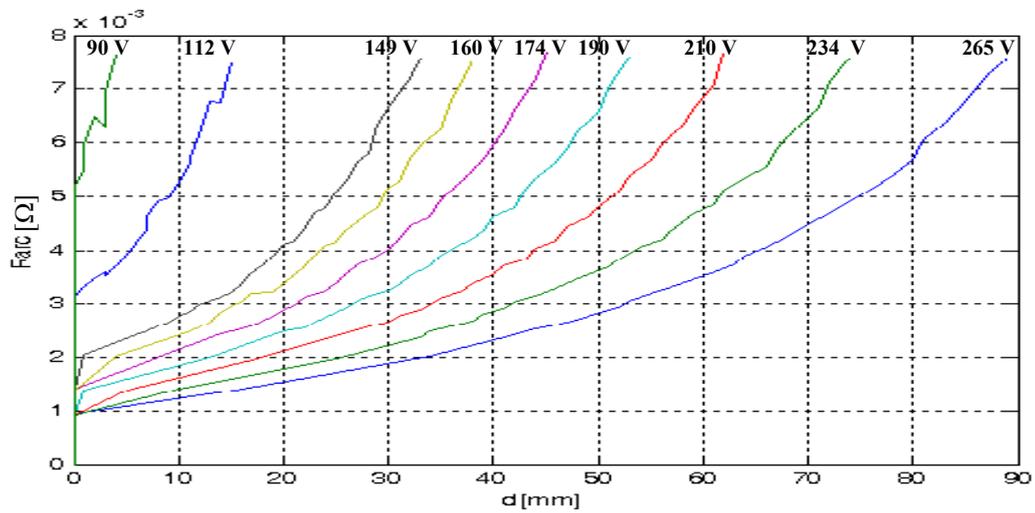


Figure III.5 : Variation de la résistance d'arc

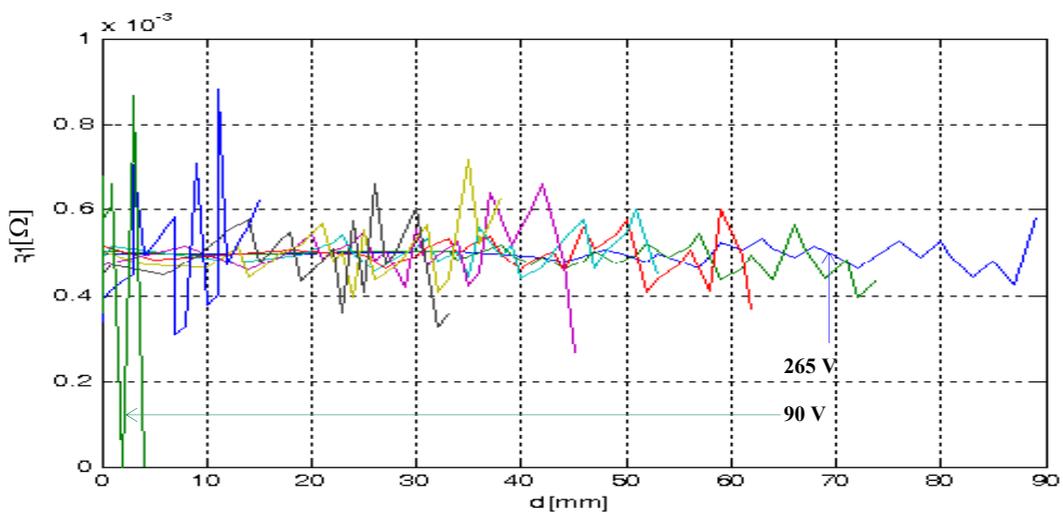


Figure III.6 : Variation de la résistance du (four + câbles)

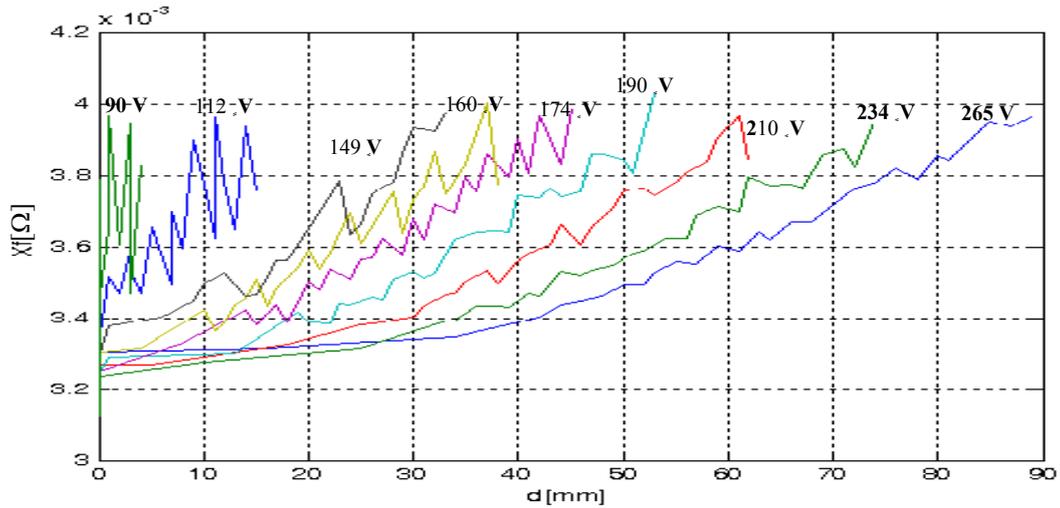


Figure III.7 : Variation de la réactance du four

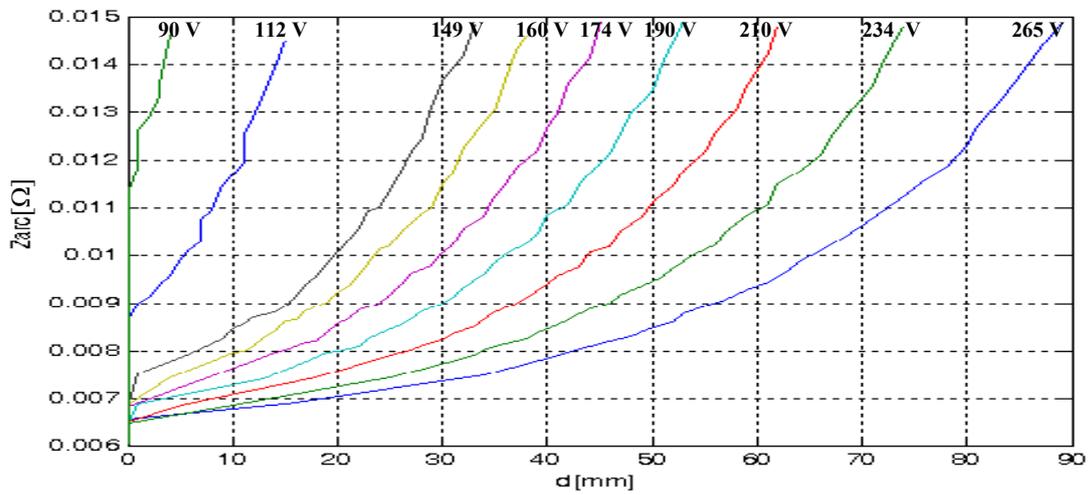


Figure III.8 : Variation de l'impédance d'arc

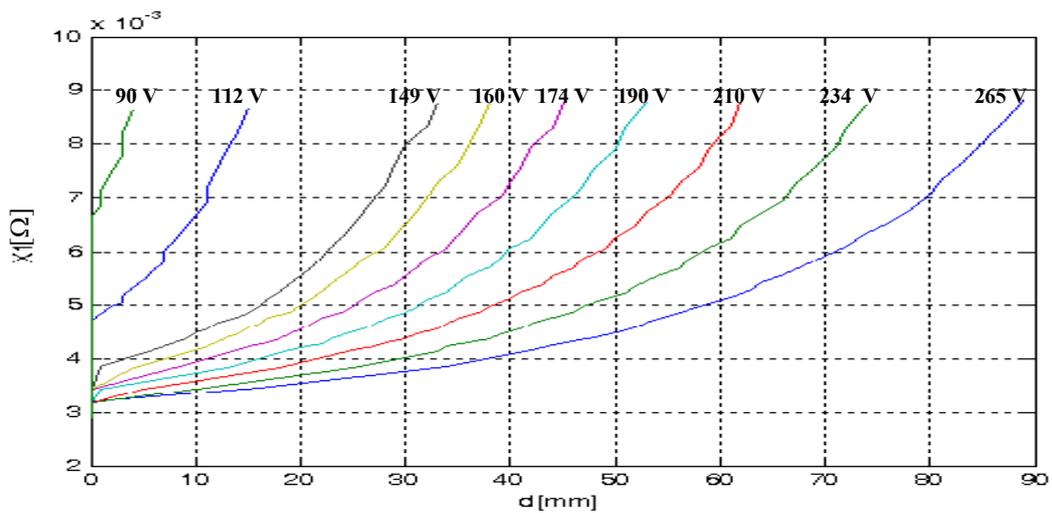


Figure III.9 : Variation de la réactance (four+câbles)

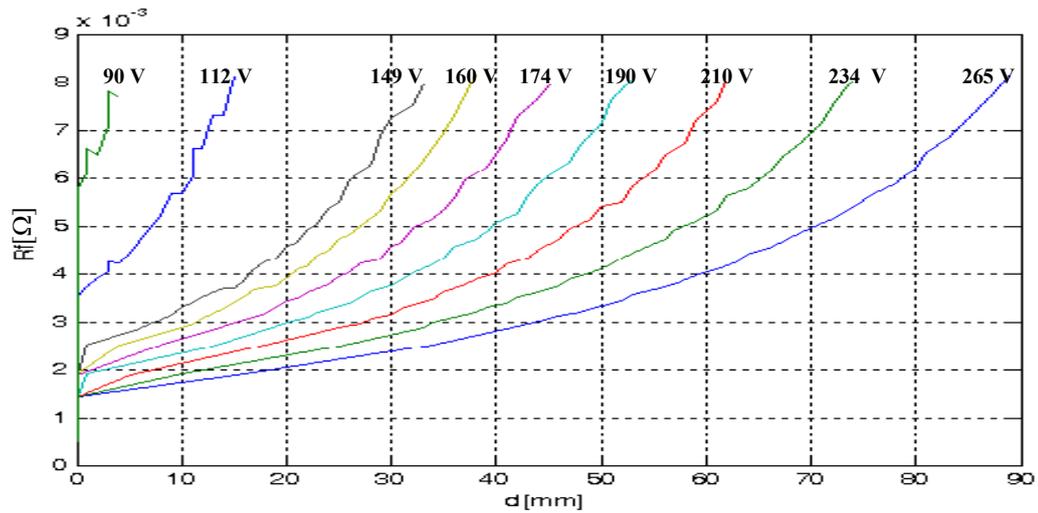


Figure III.10 : Variation de la résistance du four

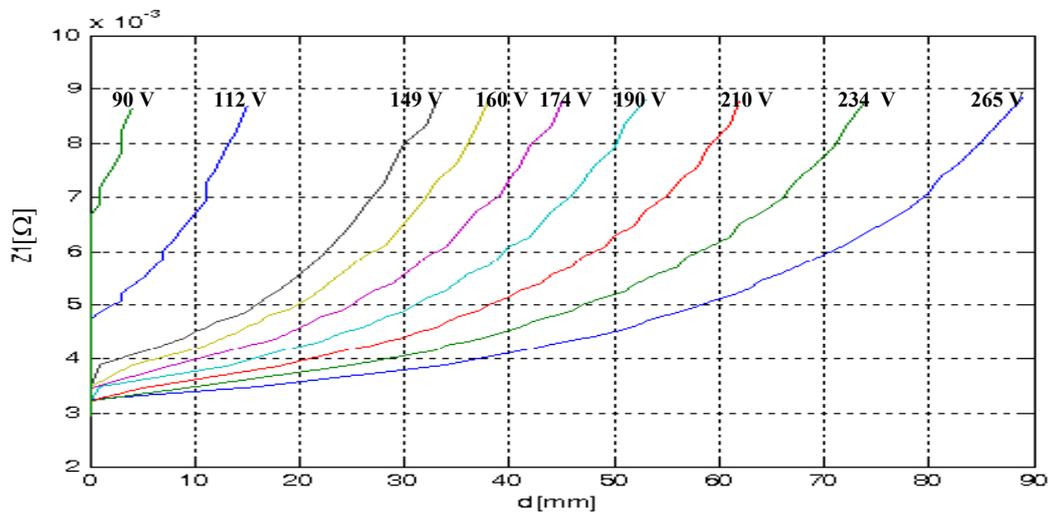


Figure III.11 : Variation de l'impédance (four + câbles)

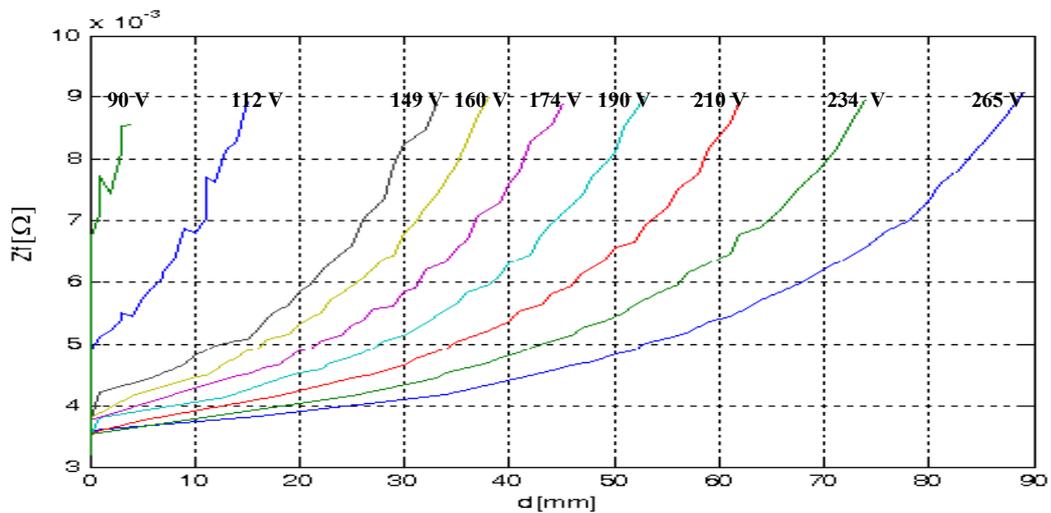


Figure III.12 : Variation de l'impédance du four

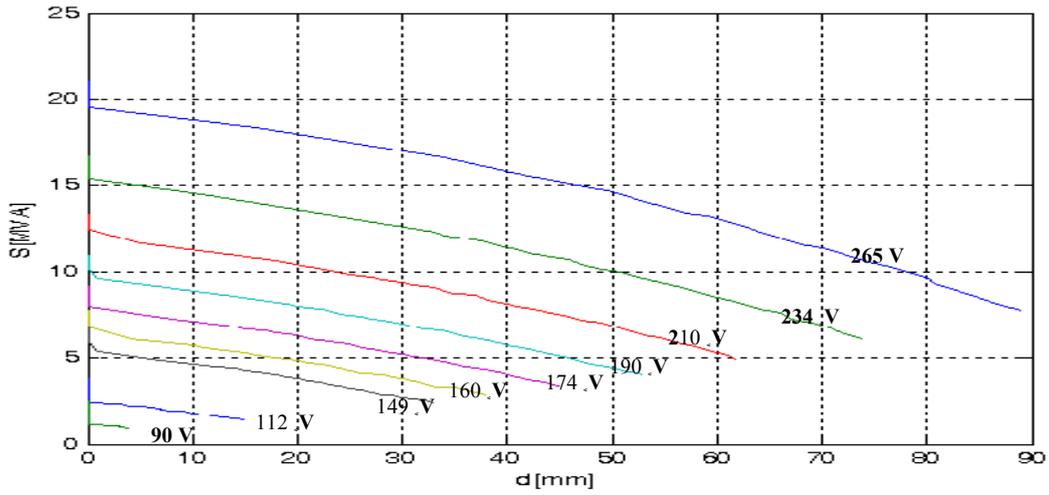


Figure III.13: Variation de la puissance apparente

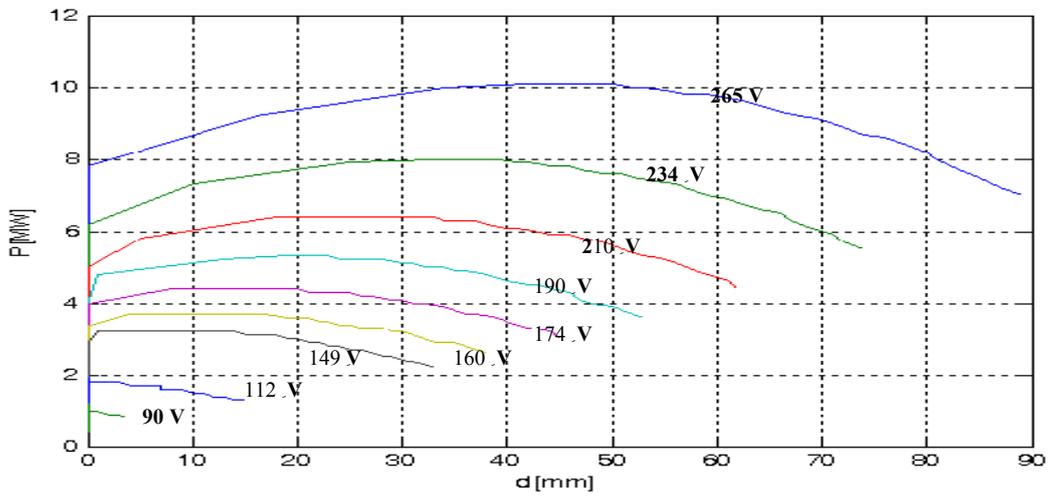


Figure III.14 : Variation de la puissance active

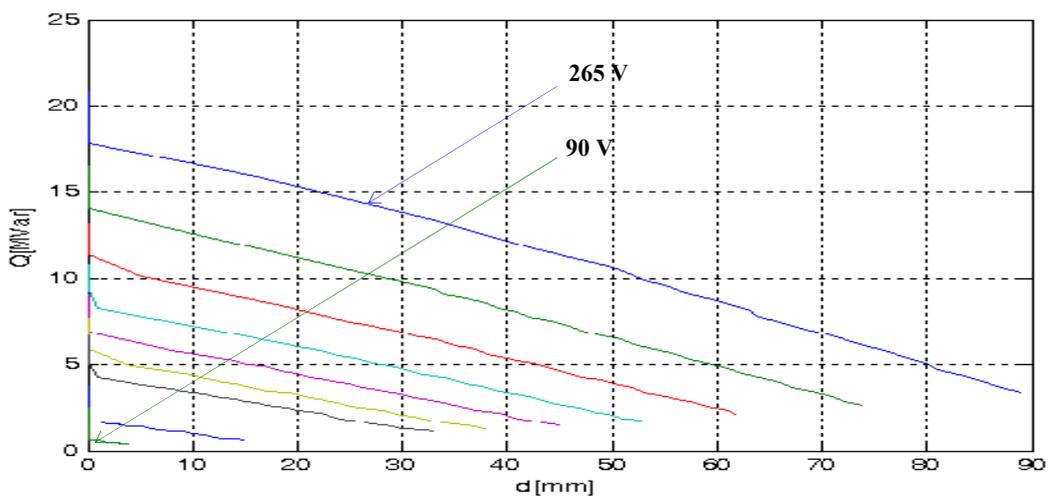


Figure III.15 : Variation de la puissance réactive

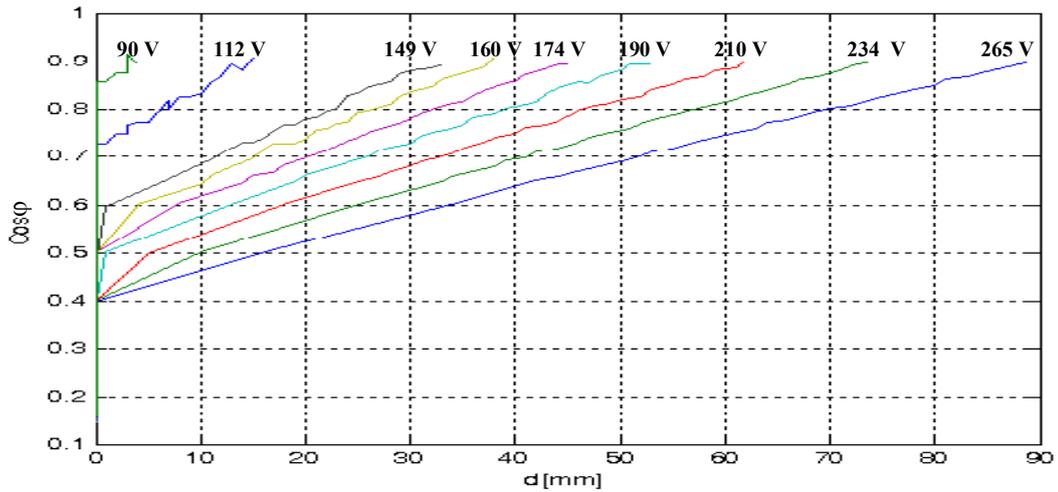


Figure III.16. Variation du facteur de puissance

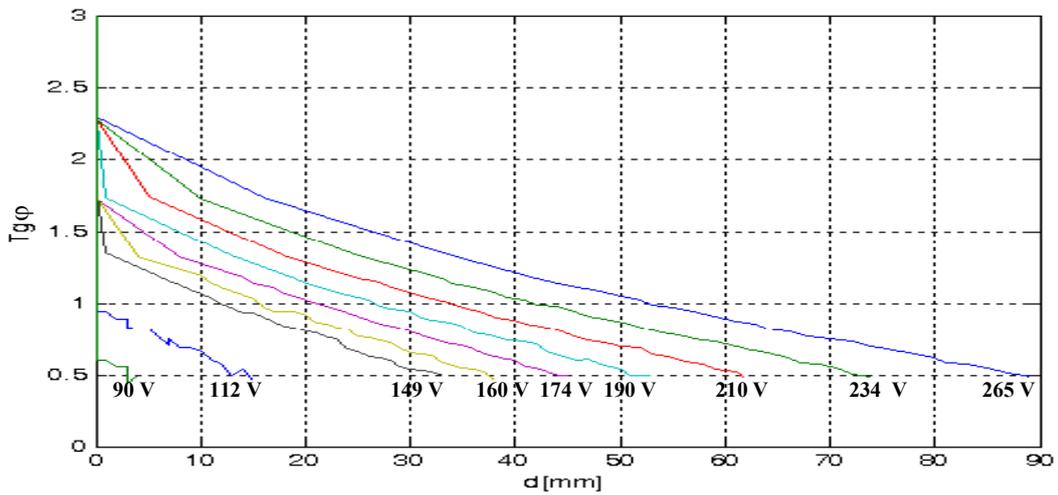


Figure III.17 : Variation de la tangente  $\phi$

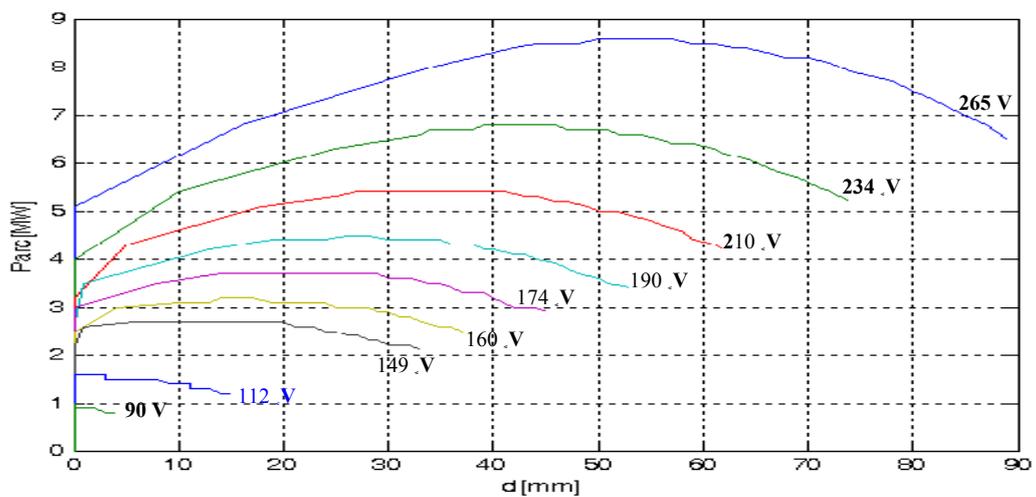


Figure III.18 : Variation de la puissance d'arc

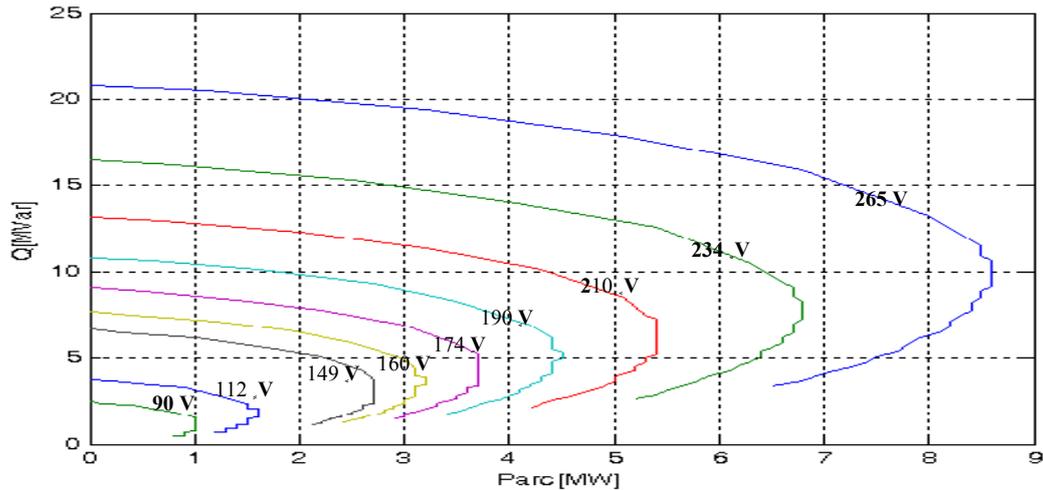


Figure III.19 : Variation de la puissance réactive en fonction de la puissance d'arc

### II.3. Ajustement des paramètres caractéristiques du four

Tous processus du four peuvent être récapitulés sur la figure III.20 [41,46].

Nous avons 32 mesures de chaque paramètre mesuré pour les 9 prises de tensions secondaires du transformateur du four, l'opération que normale doit faire le compromis entre les limitations selon la puissance maximale et le courant acceptable respectivement  $[A_{n,1}, A_{n,2}]$  et  $[B_{n,1}, B_{n,2}]$

Où  $n$  : est l'indice des prises de tensions.

Alors confiant soi-même à cette contrainte la loi d'ajustement de la position d'électrodes sera faite selon  $S_{max}$  [47].

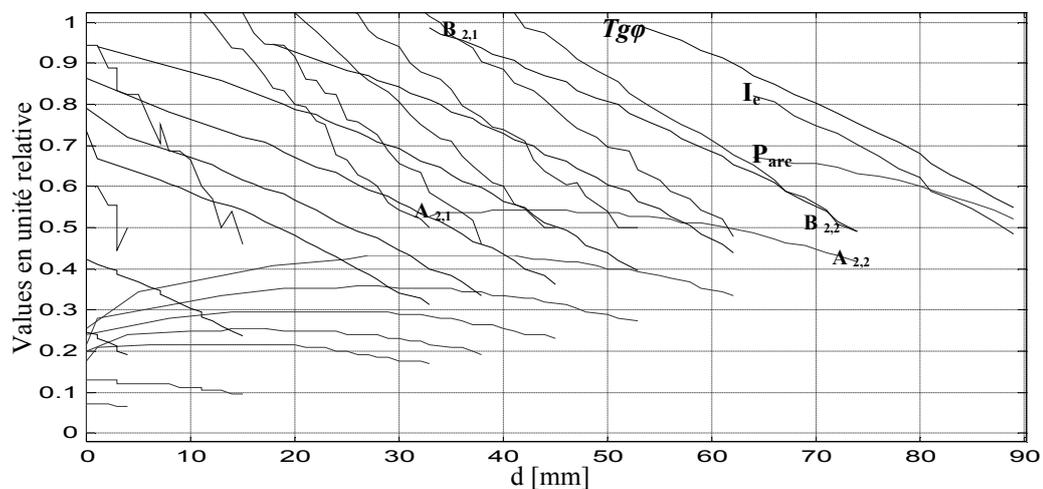


Figure III.20 : Processus Electro-énergétique du four

## II.4. Distribution de l'impédance

Pour mieux voir la forme de variation de l'impédance pour les 32 x 9 mesure on tire les valeurs de  $R_1$  et  $X_1$  qui représentent respectivement la résistance et la réactance du transformateur avec les câbles souples, puis on trace ces variations en fonction du courant.

La forme de distribution est représentée comme suit [41,42] :

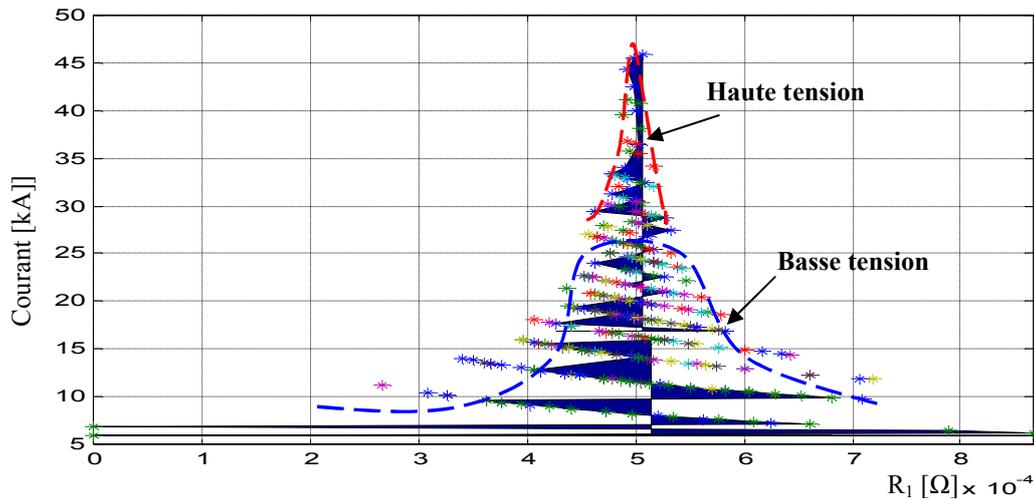


Figure III.21 : Distribution de la résistance  $R_1$

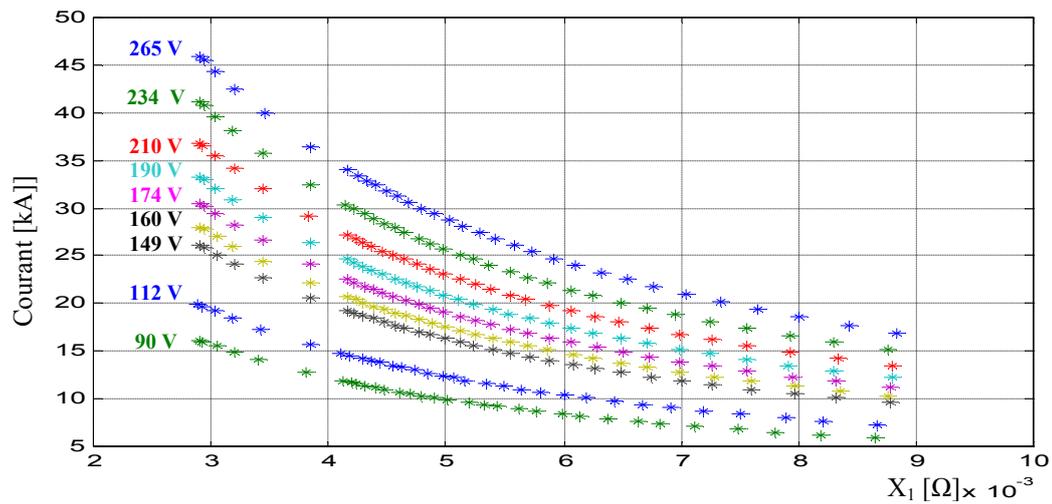


Figure III.22 : Distribution de la réactance  $X_1$

Avec :  $R_1 = R_{tr} + R_{\text{câbles souples}}$ , et  $X_1 = X_{tr} + X_{\text{câbles souples}}$

## II.5. Commentaires

En effet pour les différents essais effectués :

- $R_1$  a une répartition Gaussienne, ceci est dû à l'effet combiné du courant et du temps de son application, ainsi la dispersion est plus importante en basse tension « figure.III.21 », car le métal prend plus de temps à fondre ; d'où le sur-échauffement du transformateur et les câbles souples.
- Etant donné qu'une inductance  $X_1$  n'est la conséquence du champ électromagnétique qui s'affaiblit avec l'augmentation de la température, lui donne une variation exponentielle amortie.

Afin de réduire cette dispersion paramétrique nous proposons un renforcement dans le refroidissement par ventilation forcée du transformateur et par augmentation du débit d'eau qui traverse les câbles souples.

## III. Approximation & Modélisation

$$\text{On a } R_{arc} = \frac{P_{arc}}{3I_e^2} \quad (\text{III.6})$$

$$Q_{four} = Q_{arc} + \Delta Q \quad (\text{III.7})$$

$$Q_{arc} = Q_{four} - 3I_e^2 X_1 \quad (\text{III.8})$$

Ou :  $Q_{four}$  : C'est la puissance réactive totale du four à arc.

$Q_{arc}$  : C'est la puissance réactive totale de l'arc.

$$X_{arc} = \frac{Q_{arc}}{3I_e^2} \quad (\text{III.9})$$

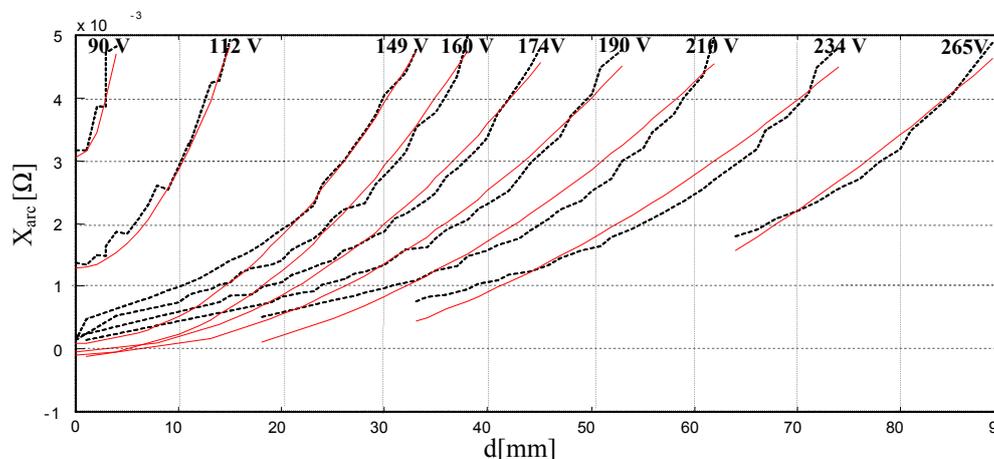
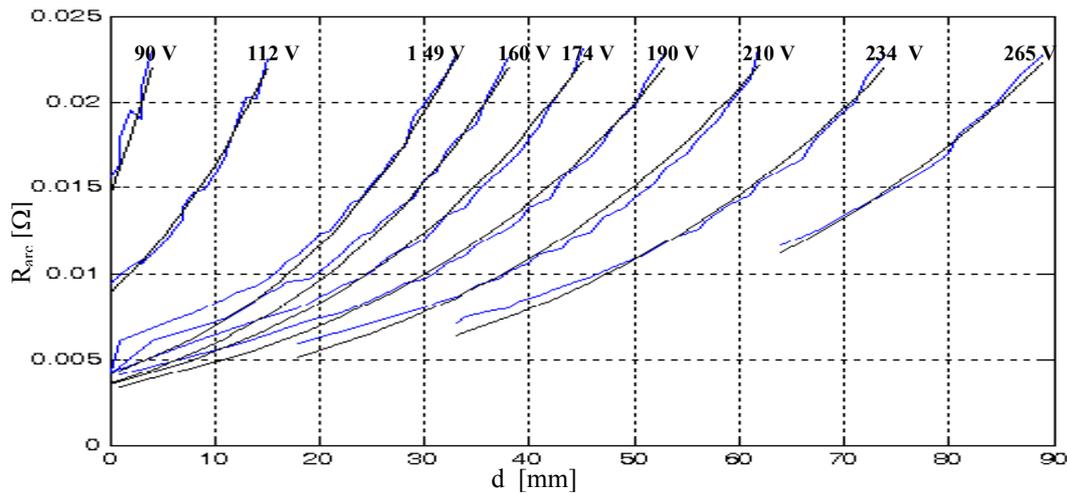


Figure III.23 : Variation du  $X_{arc}$  avec l'ajustement

Figure III.24 : Variation du  $R_{arc}$  avec l'ajustement

On propose suivant ce traitement notre propre modèle empirique du four à arc étudié modélisé d'après leur résistance et réactance d'arc [41, 42,48]:

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

$$A_R = \frac{[0,7 \cdot (U - 210)^2 + 1,7]}{50^2} \cdot 10^{-3} \quad (III.10)$$

$$\alpha = 0,097e^{0,011(90-U)} - \frac{1,7}{(U - 112)^2 + 80} + \frac{100}{(U - 360)^2 + 50} \quad (III.11)$$

$$X_{arc} = A_X(u)d^2 + B_X(u)$$

$$A_X = 1,05 \cdot 10^{-3} e^{0,075(90-U)} \quad (III.12)$$

$$B_X = \frac{3,14 \cdot U}{153} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot e^{0,075(90-U)} \quad (III.13)$$

### III.1. Analyse et commentaires des résultats

Dans la zone de fonctionnement l'impédance de l'arc diminue avec l'augmentation de la tension et augmente avec l'éloignement des électrodes du métal « figures III.23 ,24 ».

L'analyse des résultats montre aussi que pour des fortes tensions et courtes distances de l'arc le champ électrostatique créé entre l'électrode et le métal est plus important que le champ électromagnétique, donne ainsi à l'arc un **caractère capacitif** peut être observée sur la figure III.23 par l'apparition des valeurs négatives de  $X_{arc}$ .

A cet effet nous proposons le modèle de l'arc électrique montré sur la figure III .25.

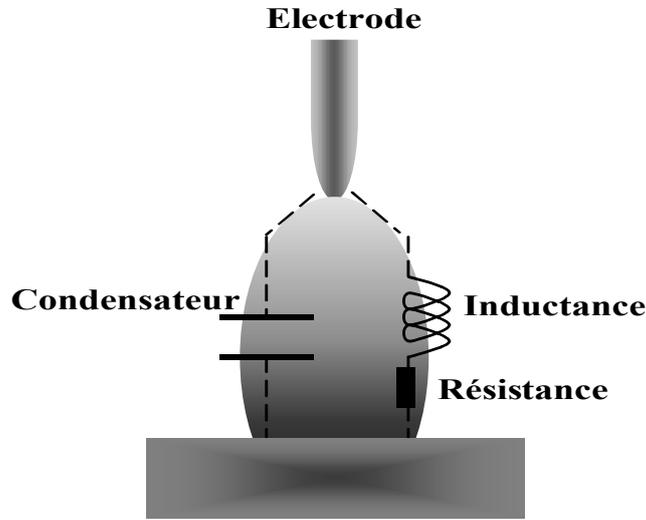


Figure III.25 : Modèle du four à arc

$$Q_{arc} = Q_{arc}^L + Q_{arc}^C \quad (III.14)$$

$$Q_{arc}^L = K_L d \quad (III.15)$$

$$Q_{arc}^C = -K_C / d \quad (III.16)$$

$Q_{arc}^L$  : C'est la puissance réactive inductive de l'arc.

$Q_{arc}^C$  : C'est la puissance réactive capacitive de l'arc.

D'après les équations (III .14, III.15, III.16) on peut écrire :

$$Q_{arc} = \frac{[K_L d^2 - K_C]}{d} \quad (III.17)$$

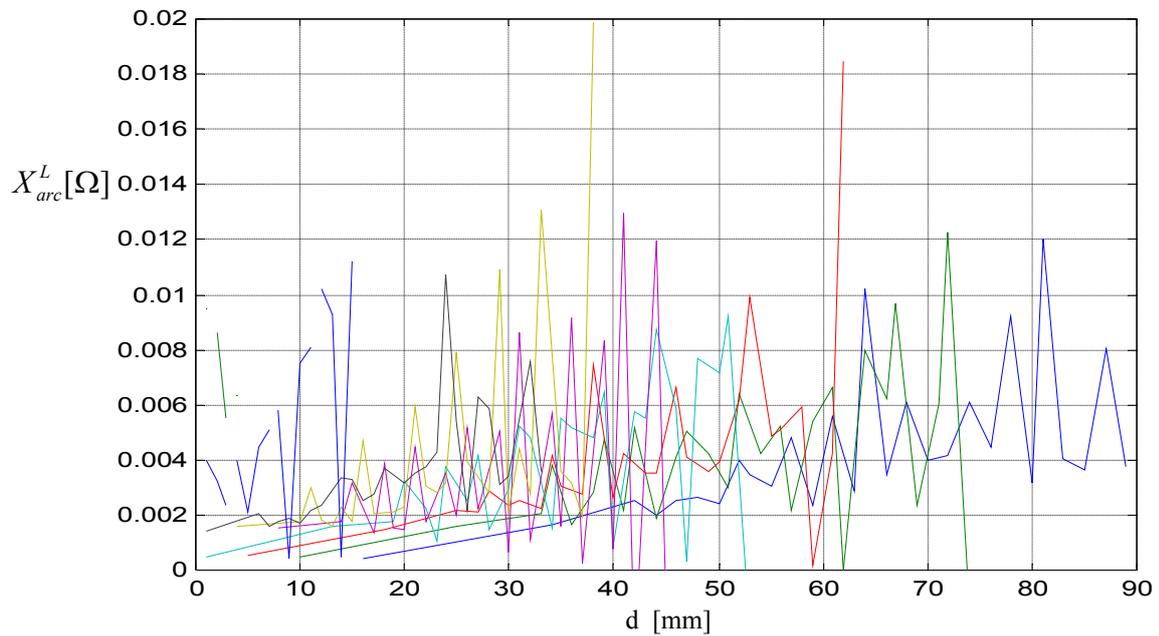
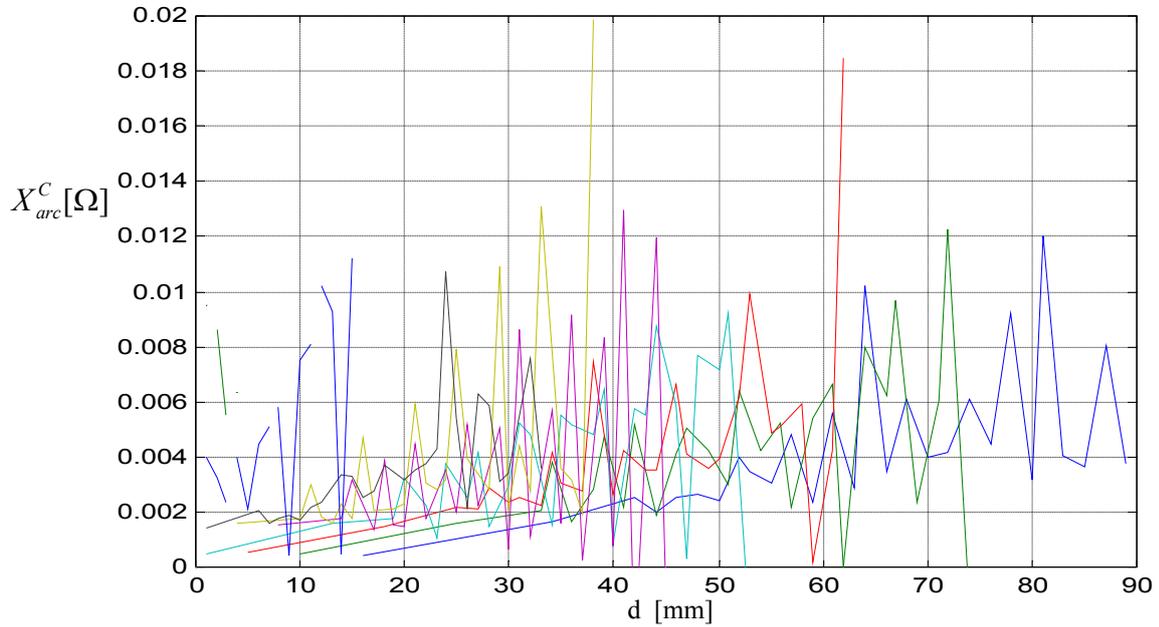
$$K_L(n) = \frac{Q_{arc}(n+1)d(n+1) - Q_{arc}(n)d(n)}{d^2(n+1) - d^2(n)} \quad (III.18)$$

n : C'est le nombre de mesure.

$$K_C(n) = K_L(n)d^2(n+1) - Q_{arc}(n+1)d(n+1) \quad (III.19)$$

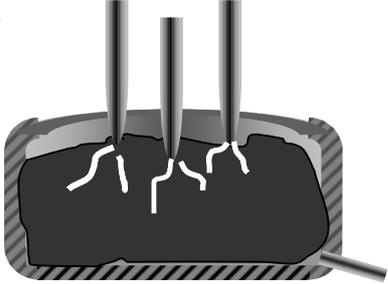
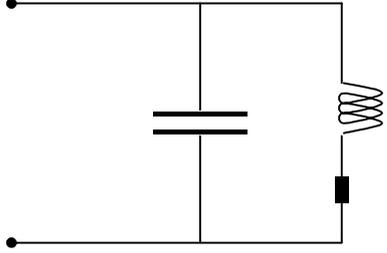
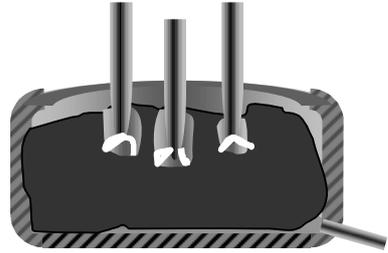
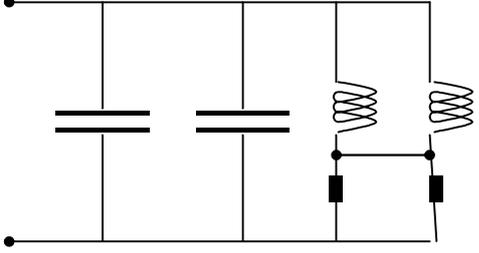
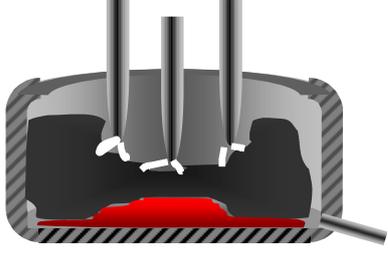
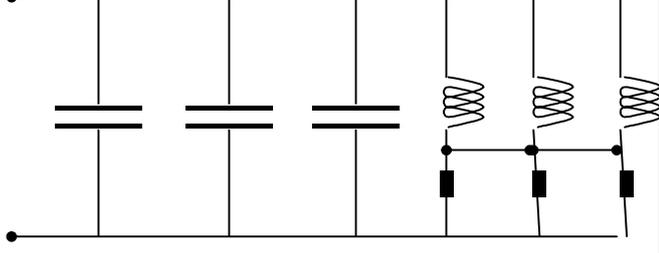
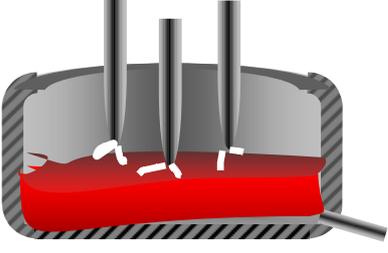
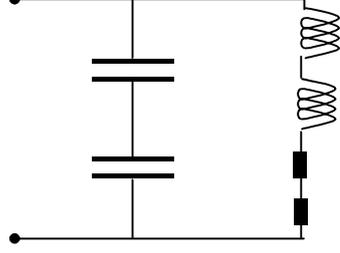
$$Q_{arc}^L = K_L d = 3X_{arc}^L I_e^2 \Rightarrow X_{arc}^L = K_L d / 3I_e^2 \quad (III.20)$$

$$Q_{arc}^C = -K_C / d = -U_1^2 / X_{arc}^C \Rightarrow X_{arc}^C = U_1^2 d / K_C \quad (III.21)$$

Figure III.26. Dispersion du  $X_{arc}^L$ Figure III.27. Dispersion du  $X_{arc}^C$ 

Après le traitement numérique des paramètres mesurés nous proposons un modèle pour chaque étape de fonctionnement du four à arc [41,42].

**Tab. III.1 : Modèle proposé pour chaque étape de fonctionnement du four à arc**

Etape	Modèle
<p>1</p> 	<p>Haute tension long arc</p> 
<p>2</p> 	<p>Haute tension court arc</p> 
<p>3</p> 	<p>Moyenne tension court arc</p> 
<p>4</p> 	<p>Basse tension court courant</p> 

La plus part des problèmes de la qualité d'énergie se produisent dans les étapes 1 & 2, en raison du mouvement et de l'arrangement physiques des chutes d'aciers (sorcière).

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 III.28 », donc la tension et le courant devient considérablement de forme sinusoïdale symétrique [49,50].

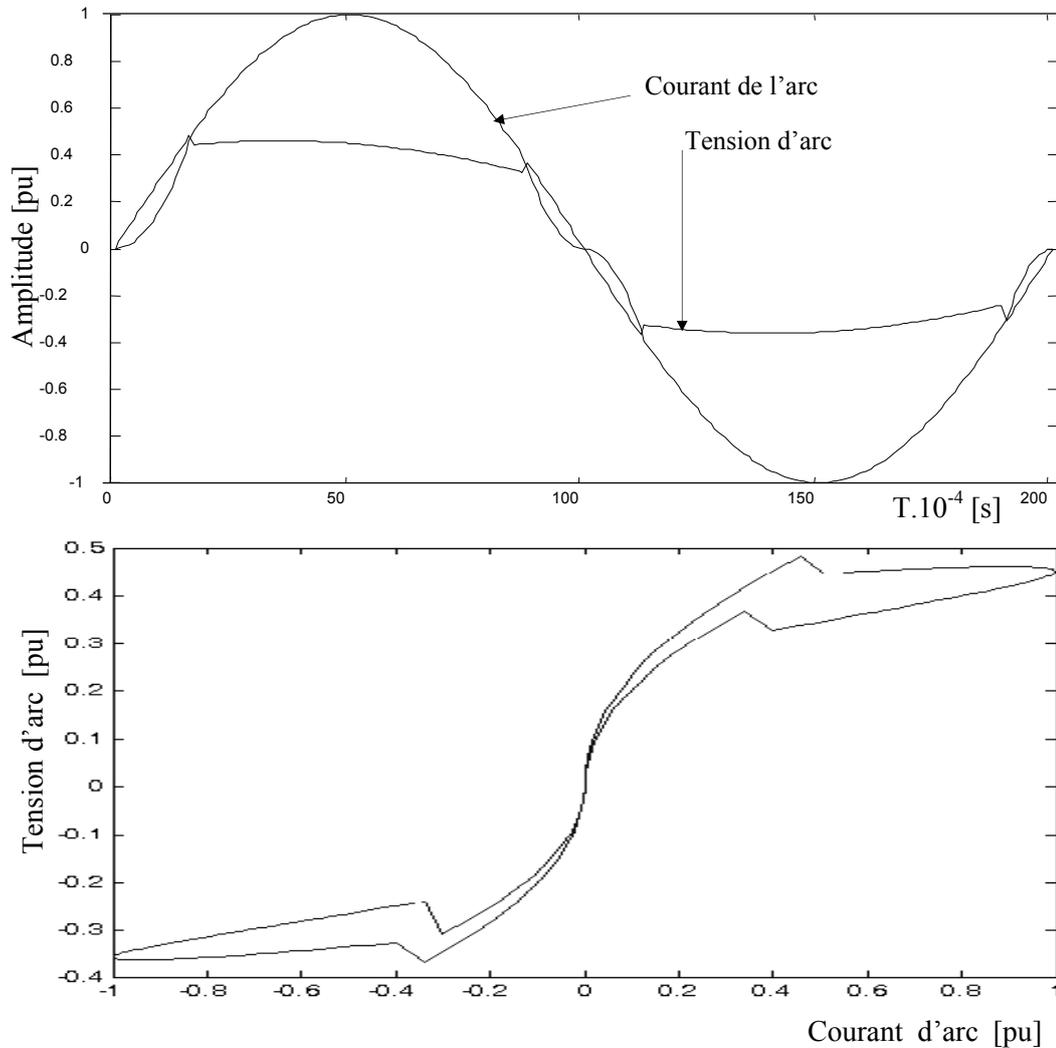


Figure III.28 : Caractéristique Tension - Courant [I-V] du four à arc

Donc nous proposons de substituer l'énergie électrique par l'énergie chimique, comme le gaz naturel, et le four à arc sera fourni électriquement seulement dans les étapes 3 et 4.

## IV. Contribution du modèle proposé dans l'amélioration de la qualité d'énergie électrique

### IV.1 Erreur dans le modèle de simulation

Les équations différentielles dans la simulation, sont résolues par la méthode *Ode23TB* avec tolérance relatif d'erreur égale  $10^{-3}$ , et une erreur absolue de tolérance égale  $10^{-6}$  pour tous les composants.

La comparaison entre le modèle réel et le modèle proposé montre une très grande similitude, mais pour les basses tensions, la différence n'est pas négligeable (figure.III.29).

Ce mode est utilisé pour initier l'arc électrique pendant deux minutes au plus tard. Dans le fonctionnement normale les tensions les plus utilisées sont 234 et 210 V, dont les erreurs maximales sont respectivement de :

- Résistance est 0,0107 % et 0,0096 %.
- Inductance est 0,0235 % et 0,0275 %.

Donc, l'erreur globale (voir les figures.III.29, 30) montre que le modèle général proposé peut être mise en œuvre dans la boucle de la régulation du four à arc afin que d'améliorer leur fonctionnement [51].

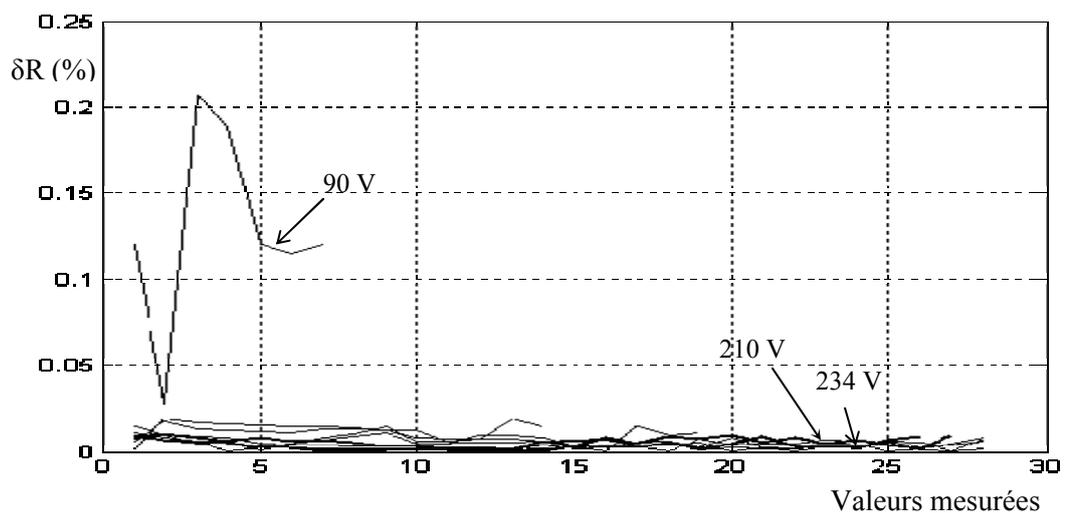


Figure III.29 : Erreur sur la mesure de la résistance

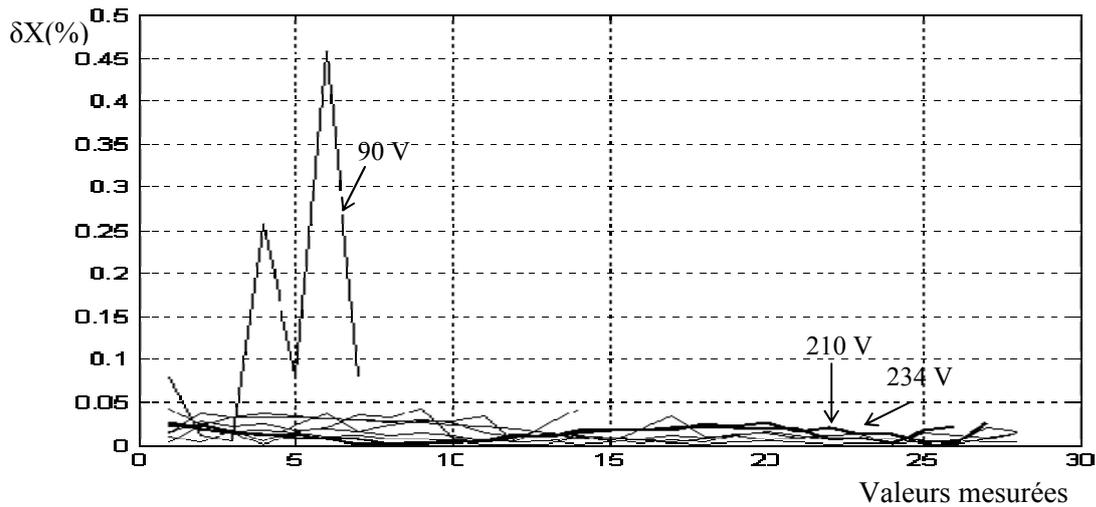


Figure III.30 : Erreur sur la mesure de la réactance

#### IV.2. Régulation sans le modèle proposé « modèle réel »

La figure III.31 montre que la puissance apparente acceptable est largement dépassée, et ça peut provoquer un vieillissement prématuré des équipements (transformateurs, disjoncteurs, contacteurs, relais, etc. ....).

La figure.III.32 montre des valeurs très grandes du courant d'électrode par rapport à sa valeur nominale, ce qui révèle d'autres arcs électriques qui attaquent la paroi interne du four « réfractaires doublés », en plus de l'usure des électrodes de tête. L'autre conséquence est la chute de tension dans les principales barres omnibus du four et aussi la fluctuation de la tension.

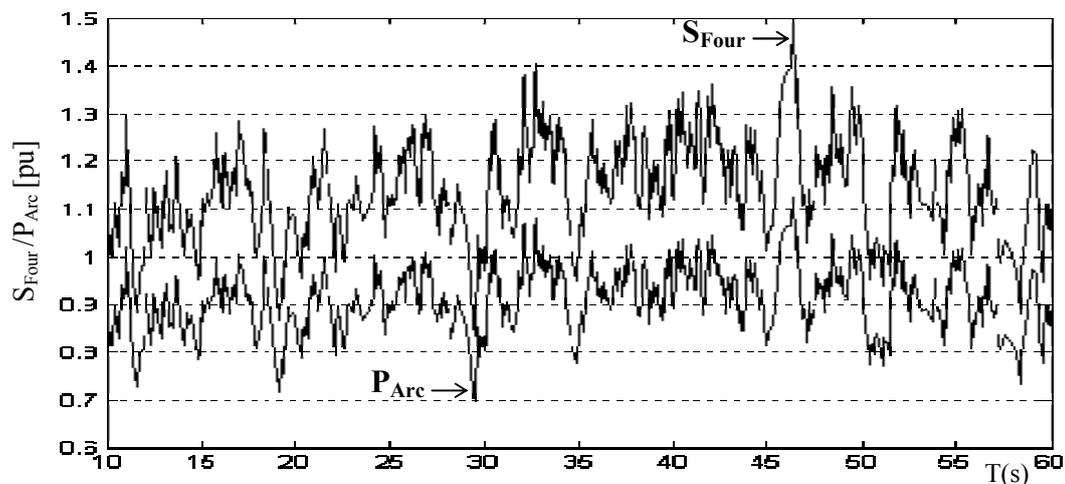


Figure III.31 : Variation de la puissance du four et la puissance d'arc (modèle réel)

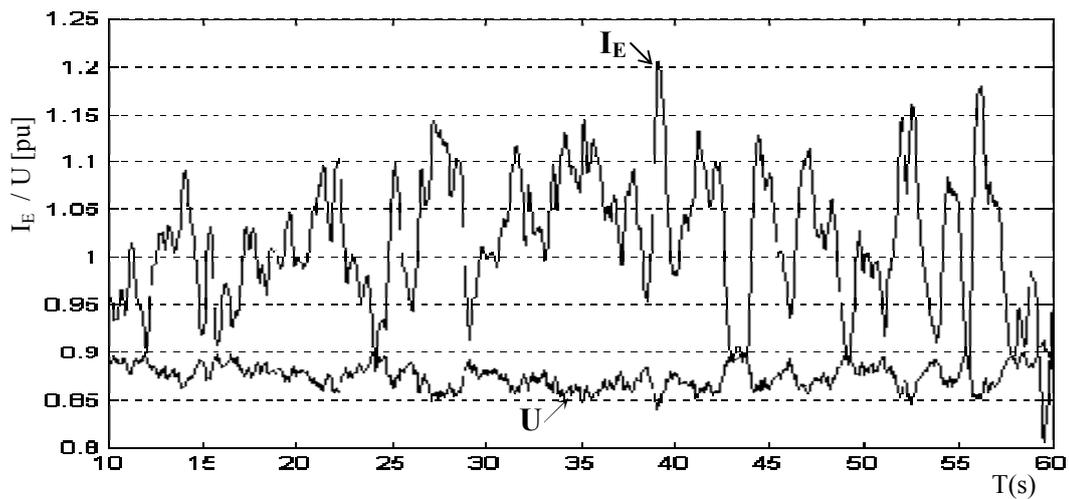


Figure III.32 : Variation du courant d'électrode et la tension (modèle réel)

### IV.3. Régulation avec le modèle proposé

La figure III.33 montre une bonne exploitation, et un faible dépassement de la puissance du four, en raison de l'inertie du système qui commande les électrodes du four, et l'autre avantage est la stabilité de la puissance d'arc. Aussi l'efficacité de l'intégration du modèle dans la boucle de régulation par la réduction du flicker avec un courant modéré « voir la figure III.34 ».

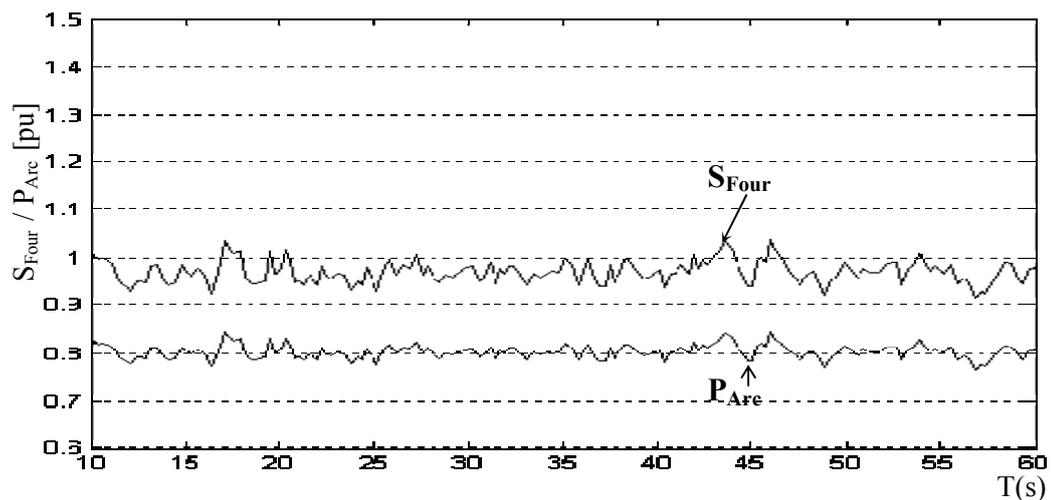


Figure III.33 : Variation de la puissance du four et la puissance d'arc (modèle proposé)

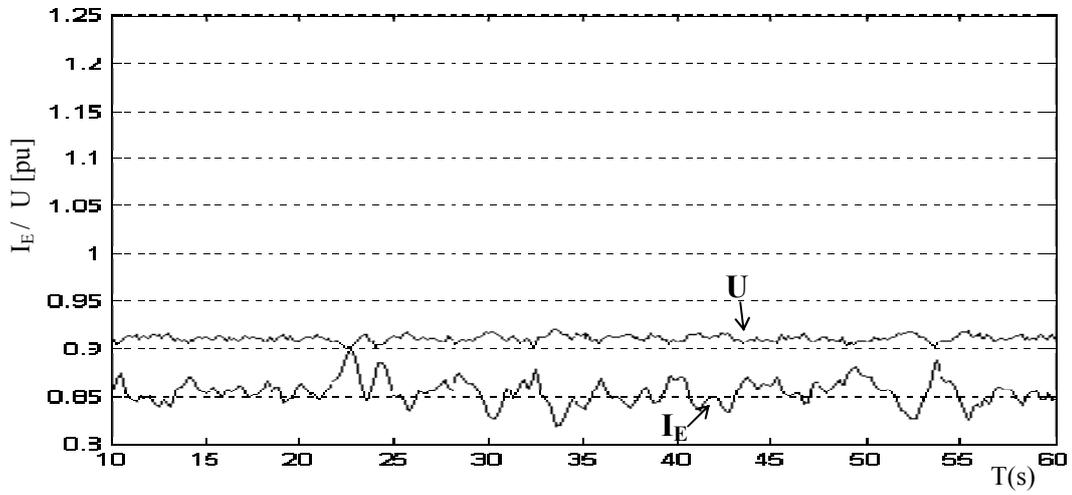


Figure III.34 : Variation du courant d'électrode et la tension (modèle proposé)

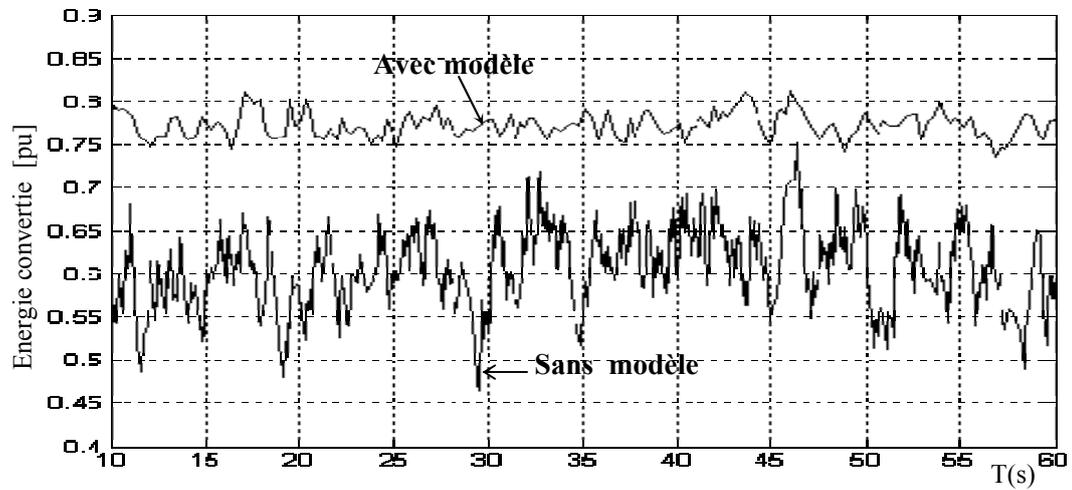


Figure III.35 : Coefficient de conversion d'énergie

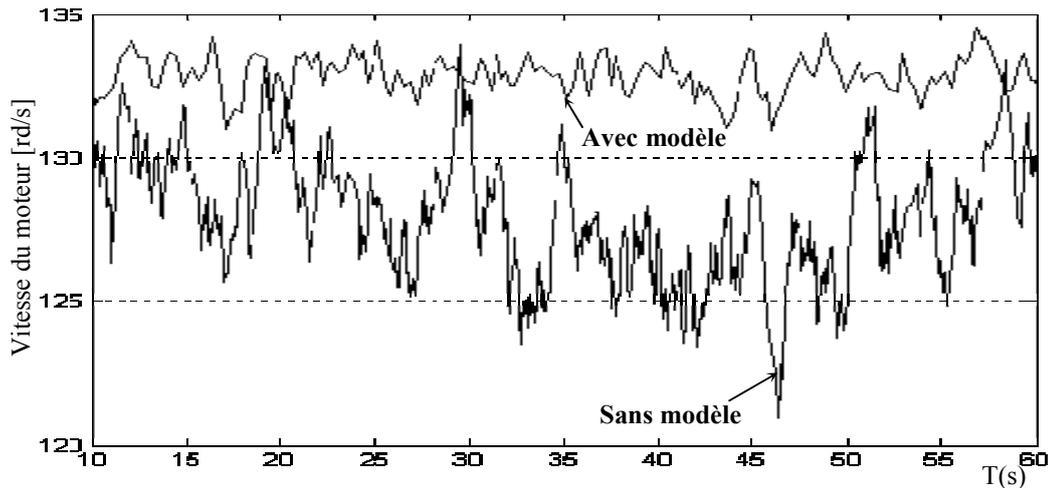


Figure III.36 : Influence des perturbations électriques sur vitesse du moteur qui fait la régulation des électrodes

#### ➤ Commentaires

- Le premier bénéfice de notre modèle proposé représenté sur l'aspect économique c'est clairement montré qu'avec ce modèle on a une augmentation sur la longévité des équipements électriques et mécaniques.
- L'autre avantage est indiqué dans « la figure III.35 » laquelle nous faisons la comparaison entre les deux essais sur l'alimentation électrique de conversion de chaleur, ce qui donne une possibilité d'augmenter la production. Étant donné que le four est relié à l'environnement, à travers un réseau électrique, sans parler sur l'aspect de la pollution chimique.
- Au cours de l'exploitation, il provoque plusieurs gênes, comme la propagation des harmoniques, flicker, chute de tension, etc. ...., ces perturbations affectent également le bon fonctionnement du four, nous montrons ça dans « la figure.III.36 » que l'effet de scintillement sur le moteur des électrodes.
- En sachant que ce moteur se trouve au voisinage du four, donc pour le cas sans intégration du modèle dans la boucle de régulation, le rotor inflige une très forte oscillations, d'autre part, il est plus stable dans le cas de l'intégration du modèle.

## V. Discussion

- On présente ici un nouveau modèle du four à arc, ce modèle dépend essentiellement des différents paramètres du four, et aussi une étude énergétique du four à arc avec le nouveau modèle approximatif.
- Le modèle que nous proposons fait apparaître un nouveau paramètre qui est le « **condensateur** », puisque les électrodes changent continuellement de position.
- L'intégration de ce modèle dans la boucle de régulation, réduit l'intervention des opérateurs, donc la réduction des erreurs humaines qui dues à l'estimation visuelle, par conséquent cette automatisation nous permet de faire un meilleur management de l'énergie et réduction de la consommation du KWh /ton.
- Les relations empiriques du condensateur et de l'inductance du four, nous permettent d'éviter quelques oscillations très dangereuses du courant et de la tension qui perturbent les charges voisines.

## VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau modèle paramétrique mathématique et approximatif du notre four étudié, et nous avons fait aussi une étude expérimentale énergétique.

Dans la seconde partie, nous avons présenté l'importance et l'avantage de notre modèle proposé par rapport au réel surtout coté qualité d'énergie électrique.

## **I. Introduction**

Les progrès technologiques, suscités par les besoins en aciers spéciaux pendant la Seconde Guerre mondiale, permirent une augmentation sensible des capacités et des puissances, si bien que vers 1950 le four à arcs de 150 à 170 t (7,20m de diamètre de cuve) et d'une puissance de 36 à 40 MVA, dans certaines conditions, entre en compétition avec le four Martin pour la fabrication d'aciers au carbone [35].

La part du four électrique dans la production mondiale d'acier a donc continué à progresser régulièrement. En 1993, et pour une production mondiale d'acier de 725,3 Million tonne, la part du four électrique a été de 31 %, avec des différences considérables entre les pays de quelques pour-cent (Pays Bas, Chili...) à plus de 50 % dans un certain nombre de pays industrialisés (Italie, Turquie ...), et même 100 % au Venezuela et en Arabie Saoudite.

Il semble donc que dans un avenir proche un pourcentage de 40 à 50 % corresponde, sur le plan mondial, à un équilibre entre acier produit par voie électrique et produit directement à partir de la filière haut fourneau et convertisseur à oxygène. Et donc, les utilisateurs professionnels de l'électricité expriment le besoin d'optimiser le fonctionnement de leurs installations électriques [35,38].

## **II. Solutions pour améliorer la qualité d'énergie électrique**

### **II.1. Techniques de compensation du flicker**

Pour atténuer les perturbations de type flicker, il est en général très difficile d'agir sur le spectre de fréquences des variations de tension produites. Mais, par contre, on peut réduire leur amplitude par des procédés permettant soit d'augmenter la puissance de court-circuit du réseau, soit de diminuer les appels de puissance réactive absorbée par la charge, soit de stabiliser les arcs électriques du four.

Deux principes peuvent alors être appliqués :

- Compenser les perturbations produites par le four.
- Réduire les perturbations par une amélioration du comportement dynamique du four.

Lorsque l'on place, par exemple, un compensateur statique en parallèle avec le four, on agit sur la perturbation après qu'elle a été créée. Ce système appartient à la première catégorie. En revanche, la seconde catégorie consiste à installer une réactance en série avec le four pour éviter l'apparition de la perturbation en agissant directement sur la stabilité des arcs.

Pour réduire les perturbations de type flicker produites par les fours à arc, différentes solutions techniques existent et peuvent être appliquées soit aux fours à courant alternatif, soit aux fours à courant continu, soit aux deux types de fours (tableau IV.1) [9].

**Tab IV.1 : Différentes techniques de compensation du flicker**

Technique de compensation du flicker	Four à courant alternatif	Four à courant continu
Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau	√	√
Réactances linéaires ou saturables	√	
Compensateur statique d'énergie réactive shunte	√	√

### II.1.1. Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau

D'après la relation (II.1) « voir chapitre II », le niveau de flicker est proportionnel au rapport  $\frac{S_{ccf}}{S_{ccn}}$  de la puissance de court-circuit du four à celle du réseau. Le moyen le plus direct de réduire les perturbations est donc, lors que cela est possible, de raccorder le four en un point du réseau présentant une puissance de court-circuit supérieure. Dans ce cas, l'amplitude des fluctuations de tension est divisée par le rapport :

$$K = \frac{S_{cc\leftarrow} \text{Après Augmentation}}{S_{cc\leftarrow} \text{Avant Augmentation}} \quad (\text{IV.1})$$

Cette opération peut être obtenue par le tirage d'une ligne complémentaire ou le raccordement sur un réseau de puissance de court-circuit supérieure :

- L'élévation de la tension, lorsque cela est possible.
- L'augmentation de la puissance de court-circuit, en installant un générateur supplémentaire ou un compensateur synchrone.

Ces solutions, obligeant à modifier de manière définitive la configuration du réseau, ne sont pas applicables instantanément. Elles sont souvent liées à des considérations ne dépendant pas de la source perturbatrice.

### II.1.2. Réactances linéaires ou saturables pour fours à courant alternatif

- **Les réactances linéaires** : Pour réduire le niveau de flicker, on peut, soit augmenter la puissance de court-circuit du réseau «  $S_{ccn}$  », soit diminuer la puissance de court-circuit du four «  $S_{ccf}$  ». Diminuer la puissance de court-circuit du four revient à augmenter la réactance du réseau d'alimentation du four. En effet, en considérant une même référence de tension, on peut aussi écrire la relation (II.1) sous la forme.

$$P_{ST99\%} = K_{ST} \frac{S_{ccn}}{S_{ccf}} \quad (IV.2)$$

Par conséquent, pour augmenter cette réactance totale, une solution consiste à insérer une réactance additionnelle en série avec l'alimentation du four. Dans ce cas, le rapport de réduction escompté peut être déduit de la relation (IV.1).

Dans **la pratique**, le niveau de réduction de flicker dû à une réactance additionnelle est de l'ordre de 10 à 20 %. Bien entendu, du point de vue théorique, en augmentant suffisamment la réactance totale de l'alimentation du four, on devrait pouvoir réduire cette perturbation de façon plus importante. Mais, il ne faut pas oublier qu'en augmentant cette réactance, on augmente aussi la chute de tension induite et, par conséquent, la puissance disponible dans le four s'en trouve réduite.

En fait, le dimensionnement de la réactance série est un compromis entre les perturbations générées et la productivité du four.

- **Les réactances saturables** : Dans le cas des réactances saturables, le niveau de réduction de flicker est variable en fonction du niveau de saturation induit par la commande en courant continu. Sur les installations en service actuellement, le niveau de réduction maximal atteint 50 %. Mais la remarque précédente pour la réactance linéaire s'applique aussi à la réactance saturable. En effet, en réduisant le niveau de flicker par limitation du courant, la tension d'arc est plus faible et les arcs plus courts. Le revers de la médaille est que, dans ce cas, la puissance transmise à la ferraille est aussi réduite et, pour une même capacité de cuve, le temps de fusion est plus long.

### II.1.3. Compensateur statique de puissance réactive

Selon certaines publications [52]. Le facteur de réduction  $R_{comp}$  d'un compensateur statique, défini par :

$$R_{comp} = \frac{P_{ST99\%} \leftarrow \text{Sans compensateur}}{P_{ST99\%} \leftarrow \text{Avec compensateur}} \quad (IV.3)$$

Peut être estimé par la formule suivante (pour la plage usuelle de  $S_{SVC} / S_f < 2$ ) :

$$R_{comp} = 1 + 0,75 \frac{S_{SVC}}{S_f} \quad (IV.4)$$

Avec :

$S_{SVC}$  : Puissance du compensateur.

$S_f$  : Puissance du four.

Cette règle de dimensionnement des compensateurs repose en fait sur un nombre limité d'expérimentations. En effet, des mesures de flicker ont été effectuées sur des fours équipés de compensateurs statiques et une droite de régression a été tracée entre les différents points de mesure. Cette méthode ne tient pas compte des particularités éventuelles des différents compensateurs (type de régulation, constructeurs etc.), ni des caractéristiques précises des différents composants de l'alimentation (longueur des lignes ou des câbles, tension de court-circuit des transformateurs, etc.). Par conséquent, il ne s'agit là que d'une estimation du dimensionnement d'un compensateur. En fait, le dimensionnement correct d'un compensateur statique est toujours très délicat. Ce dimensionnement dépend non seulement de l'architecture de l'alimentation et de son fonctionnement (puissance de court-circuit du réseau, puissance du four, présence de réactances...), mais également de la charge du four (nature et préparation des ferrailles, régulation du four, conception mécanique...).

## II.2. Techniques de réduction des harmoniques

On peut rappeler que les condensateurs et les filtres d'harmoniques sont souvent associés aux fours à arc et aux redresseurs de puissance. L'utilisation de condensateurs procure des avantages financiers pour la tarification de l'énergie réactive et l'utilisation de filtres d'harmoniques freine la croissance de la distorsion harmonique de l'onde de tension, tant dans le réseau interne de l'usine que dans le réseau du distributeur d'énergie. Toutefois, les condensateurs sont sensibles aux surcharges en tension, en courant et aux harmoniques. Leur dimensionnement, notamment en tension fondamentale, doit en tenir compte. En effet, la mise en parallèle d'une batterie de condensateurs avec un réseau industriel fait apparaître une résonance dont la fréquence est fonction à la fois de l'impédance du réseau (ou de la puissance de court-circuit) et de la puissance de la batterie de condensateurs. Des fréquences de résonance élevées sont souhaitables dans la mesure où, à ces fréquences, les courants harmoniques injectés sont d'amplitudes plus faibles. Pour parvenir à un tel résultat, la puissance des condensateurs raccordés sur un jeu de

barres où sont connectés des équipements générateurs de courants harmoniques ne doit pas être trop importante vis-à-vis de la puissance de court-circuit au point de raccordement des condensateurs. On peut rappeler que *la fréquence de résonance  $f_0$*  est calculée en fonction de la puissance de court-circuit du réseau «  $S_{cc}$  » et de la puissance réactive des condensateurs «  $Q$  » par la relation :

$$f_0 = 50 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \quad (IV.5)$$

Pour faire face aux perturbations de type harmonique produites par les fours à arc, différentes solutions techniques existent et peuvent être appliquées soit aux fours à courant alternatif, soit aux fours à courant continu, soit aux deux types de fours (tableau IV .2) [9].

**Tab IV.2 : Différentes techniques de compensation des harmoniques**

Techniques de compensation des harmoniques	Four à courant alternatif	Four à courant continue
Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau	√	√
Filtrage anti-harmonique	√	√

### II.2. 1. Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau

La relation (IV.5) montre que la fréquence de résonance «  $f_0$  » dépend directement du rapport de la puissance de court-circuit du four à la puissance de la batterie de condensateurs. En effet, en l'absence de tout phénomène particulier de résonance, il apparaît souvent que la perturbation harmonique globale croît lorsque la puissance de court-circuit diminue. Cela peut s'expliquer intuitivement: quand la puissance de court-circuit du réseau diminue, l'impédance de celui ci augmente à tous les rangs. La distorsion harmonique en fait donc de même, à courants harmoniques injectés supposés constants.

Le moyen le plus direct de déplacer cette fréquence de résonance dans une zone moins dangereuse est donc, lorsque cela est possible, de raccorder le four en un point du réseau présentant une puissance de court-circuit supérieure.

### II.2. 2. Filtrage des harmoniques

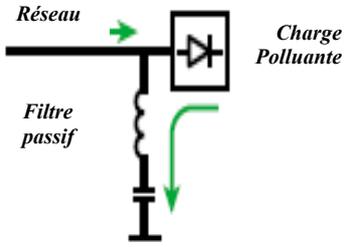
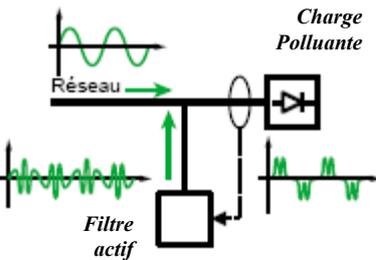
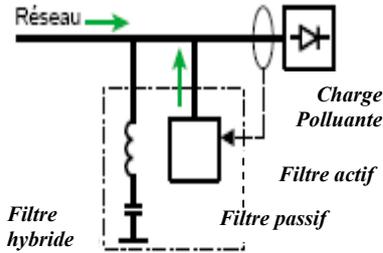
Le filtrage anti-harmonique passif s'applique aussi bien aux fours à courant alternatif qu'aux fours à courant continu et permet d'abaisser localement l'impédance du réseau, de manière à court-circuiter les courants harmoniques et à les réduire, voire les éliminer. Cette

faible impédance est obtenue en associant des éléments capacitifs «  $C$  » et inductifs «  $L$  », de manière à obtenir une résonance série accordée sur le ou les rangs harmoniques qui doivent être éliminés. Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est donc nécessaire à la réalisation d'un filtre. Une telle étude est généralement menée à l'aide de logiciels de simulation. De plus, il convient de ne pas négliger les inter-harmoniques qui peuvent parfois présenter une amplitude supérieure aux harmoniques caractéristiques. Enfin, l'électronique de puissance, de plus en plus présente dans les installations industrielles, est souvent pilotée par une boucle d'automatisme. On demande à ces régulations d'être toujours plus rapides et on augmente donc les fréquences. Des courants inter-harmoniques sont ainsi créés par les convertisseurs de fours à courant continu ou par les valves à thyristors des compensateurs statiques.

Tout le problème du filtrage réside dans le fait si le filtre présente une impédance nulle et donc court-circuite les courants harmoniques à sa fréquence d'accord, il peut entrer en résonance avec le réseau à une autre fréquence. L'impédance du circuit vue du jeu de barres auquel est relié le réseau devient alors théoriquement infinie avec les conséquences d'amplification que cela comporte. Le problème majeur résulte de **l'antirésonance**, ou **résonance parallèle**, produite par l'ensemble de la batterie et du réseau amont, ce dernier étant le plus souvent inductif. A cette fréquence d'antirésonance, inférieure à la fréquence d'accord de la batterie, il y a amplification au lieu de filtrage. L'adjonction d'une résistance «  $R$  » en série dans la batterie amortit cette résonance, mais crée des pertes. De plus, il existe autant de résonances parallèles que de branches de filtres. Tout l'art consiste à éviter ces amplifications néfastes, en particulier en les situant à des valeurs d'harmoniques non entières, en jouant sur les valeurs de «  $L$  et  $C$  », c'est-à-dire sur la puissance de compensation et sur l'accord, en sachant que l'inductance du réseau amont est imposée et variable en fonction du maillage du réseau motifs techniques et économiques. Pour chaque cas d'alimentation, il convient d'analyser correctement, en respectant les règles de l'art, les différents aspects du problème avant de choisir une solution dont la pertinence dépend de l'expérience et de la sagacité du concepteur [30,32].

Dans le tableau IV.3 on résume les différentes méthodes du filtrage et leurs principes et caractéristiques [53].

Tab IV.3 : Différents type du filtrage

<b>Filtre</b>	<b>Principe</b>	<b>Caractéristiques</b>
<b>Passif</b>	<p>Dérivation par un circuit LC accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de limites en courant harmonique.</li> <li>- Compensation d'énergie réactive assurée.</li> <li>- Elimination d'un ou plusieurs rangs harmoniques (habituellement : 5, 7, 11). Un filtre pour un ou deux rangs à compenser.</li> <li>- Risque d'amplification des harmoniques en cas de modification du réseau.</li> <li>- Risque de surcharge par pollution extérieure.</li> <li>- Etude au cas par cas</li> </ul>
<b>Actif</b>	<p>Génération d'un courant annulant tous les harmoniques créés par la charge</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solution bien adaptée au filtrage «machine». (local).</li> <li>- Filtrage sur un large bande de fréquence (élimination des harmoniques des rangs 2 à 25).</li> <li>- Auto adaptatif.</li> <li>- Modification du réseau sans influence,</li> <li>- S'adapte à toutes variations de charge et de spectre harmonique,</li> <li>- Solution évolutive et souple en fonction de chaque type de charge.</li> <li>- Etude simplifiée.</li> </ul>
<b>Hybride</b>		<p>Cumule les avantages des solutions filtrage passif et actif et couvre un large domaine de puissance et de performances :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtrage sur une large bande de fréquences (élimination des harmoniques de rangs 2 à 25).</li> <li>- Compensation d'énergie réactive.</li> <li>- Grande capacité de filtrage en courant.</li> <li>- Bonne solution technico-économique pour un filtrage «réseau».</li> </ul>

### II.3. Réduction du déséquilibre de la tension

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, les solutions sont :

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases.
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles.
- Prévoir une protection adaptée des machines.

- Augmentation de la puissance de court-circuit.
- Dispositif de rééquilibrage.
- Modification de l'architecture du réseau
- Compensation de la puissance réactive. [54, 55].

Le Tableau IV.4 présente une vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives [24].

**Tab.IV.4 : Solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations**

<b>Type de Perturbation</b>	<b>Origine</b>	<b>Conséquences</b>	<b>Solutions possibles</b>
<b><i>Coupure longue</i></b>	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	- Alimentation de secours (réseau), - Alimentation sans interruption (ASI)
<b><i>Creux de tension et coupure brève</i></b>	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	- Conditionneur de réseau, - Conception de l'équipement sensible, - Alimentation sans interruption
<b><i>Fluctuation rapide (flicker)</i></b>	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	- Compensateur synchrone, - compensateur statique de puissance réactive - Conditionneur actif - Condensateur série
<b><i>Harmonique</i></b>	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	- Filtrage actif ou passif, - Self anti-harmonique, - Déclassement d'appareil.
<b><i>Déséquilibre</i></b>	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	- Dispositif d'équilibrage, - Conditionneur de réseau
<b><i>Surtension</i></b>	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	- Séparation galvanique, - Para-surtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de pré-insertion

### III. Le four à arc à courant continu

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

- L'alimentation électrique du four à arc à courant continu comporte un système de redressement alternatif/continu, à base de circuits électroniques de puissance.
- Elle comporte une ou plusieurs électrodes de sole qui forment l'anode, la cathode étant constituée par une ou plusieurs électrodes de graphite. L'électrode de sole, implantée dans le fond de la cuve, permet de fermer le circuit électrique [21,57].

#### III.1. Description du Modèle

Notre modèle consiste à utiliser un redresseur à douze pulsations pour l'alimentation du four à arc triphasé [56,57], et notre proposition sert à utiliser les sorties des redresseurs comme des électrodes du four, comme représenté sur la figure IV.2.

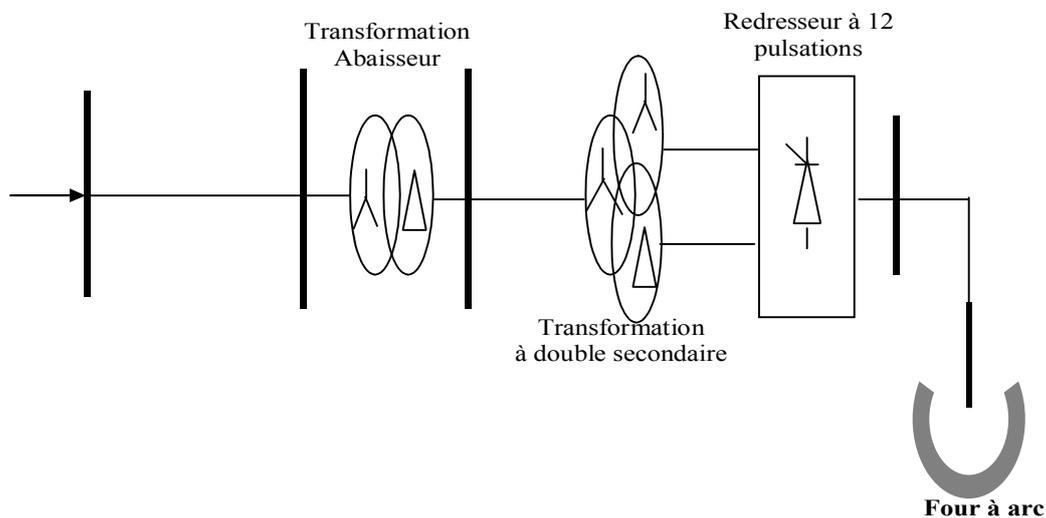


Figure IV.1 : Modèle proposé du four à arc

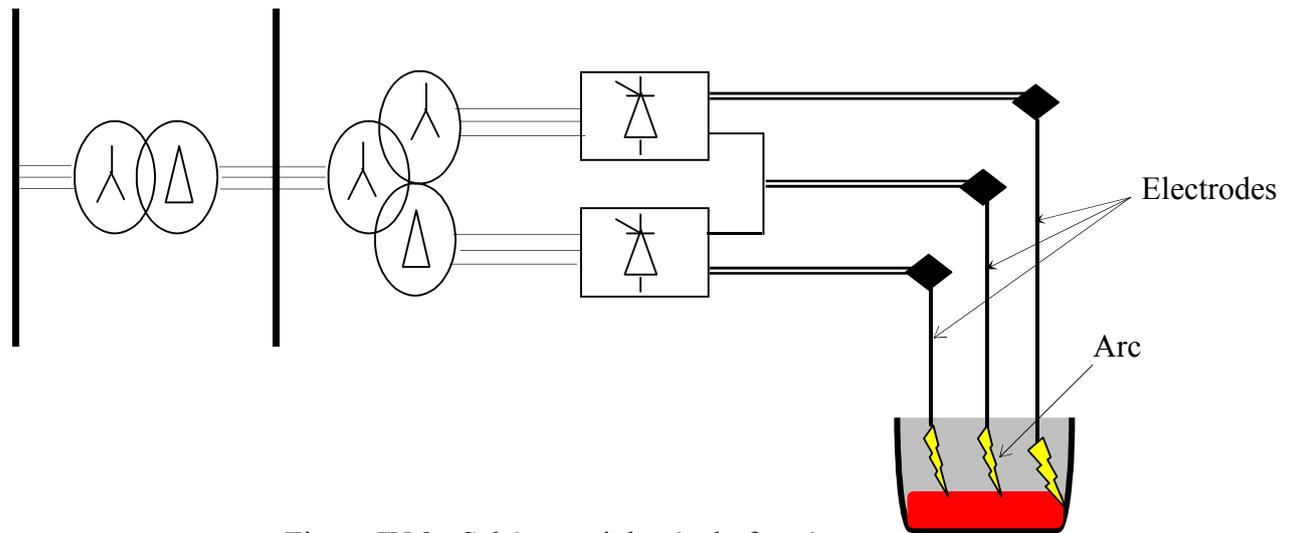


Figure IV.2 : Schémas triphasés du four à arc

### III.2. Le redresseur hémiphase

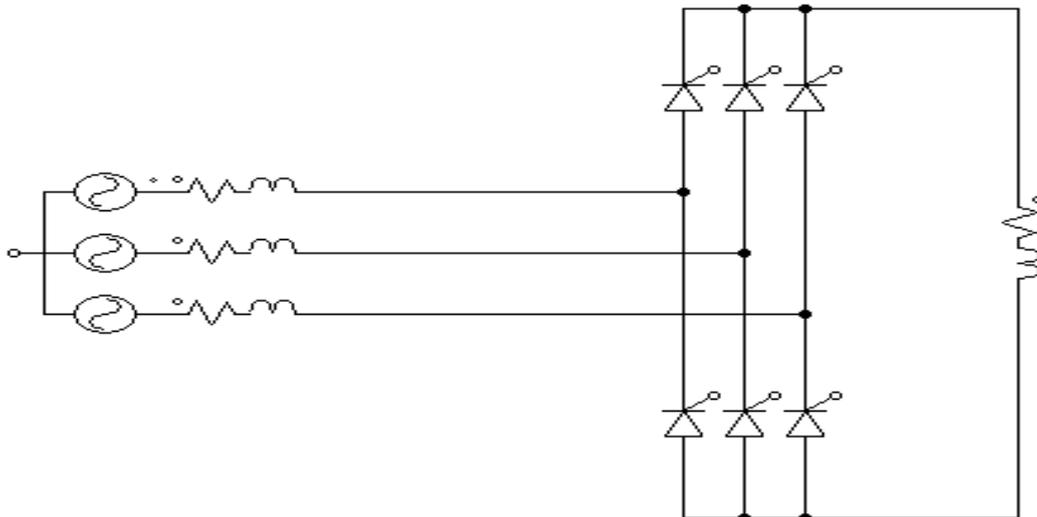


Figure IV.3 : Schémas d'un redresseur Hémiphase.

Le redresseur (fig. IV.3) est supposé être associé à une inductance de filtrage du courant continu de très grande valeur de façon à ce que le courant «  $I_d$  » soit parfaitement lissé. L'impédance de source est considérée nulle dans un premier temps.

Les courants en ligne  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$  prennent à tour de rôle la valeur (et la forme) du courant continu  $I_d$ . Chaque thyristor assure la conduction du courant pendant  $1/3$  de la période.

Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur  $I_d$  lorsqu'un thyristor devient conducteur. Leur spectre est constitué par les harmoniques de courant :  $I_n = I_1 / n$ .

Avec  $n = 6k \pm 1$  ; ou  $k$  prenant les valeurs 1, 2, 3... (Entiers naturels) et  $I_1$  étant la valeur efficace du fondamental :  $I_1 = 0,78 I_d$ .

Pour les premiers harmoniques de courant, les amplitudes sont donc en fonction de  $I_1$  :

$n=5$ ,  $I_5 = 20\%$  de  $I_1$ .

$n=7$ ,  $I_7 = 14\%$  de  $I_1$ .

$n=11$ ,  $I_{11} = 9\%$  de  $I_1$ .

$n=13$ ,  $I_{13} = 8\%$  de  $I_1$ .

Le taux global de distorsion de ce courant est de 30 %. Le taux global de distorsion de la tension est nul dans ce cas puisque la source est supposée avoir une impédance nulle (une puissance infinie) [55,56].

### ❖ Résultats de Simulation

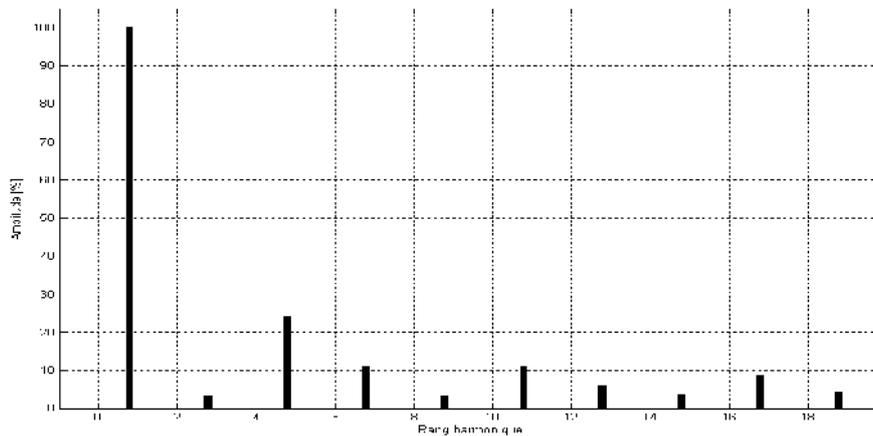


Figure IV.4 : Spectre d'harmonique du courant

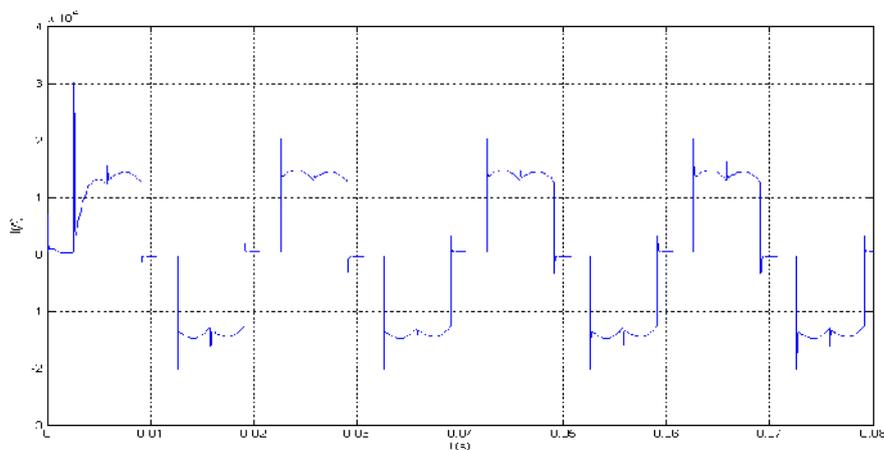


Figure IV.5 : Forme du courant

### III.3. Redresseur Dodécaphasé

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

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

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang  $6k \pm 1$  avec  $k$  impair sont éliminés [56,59].

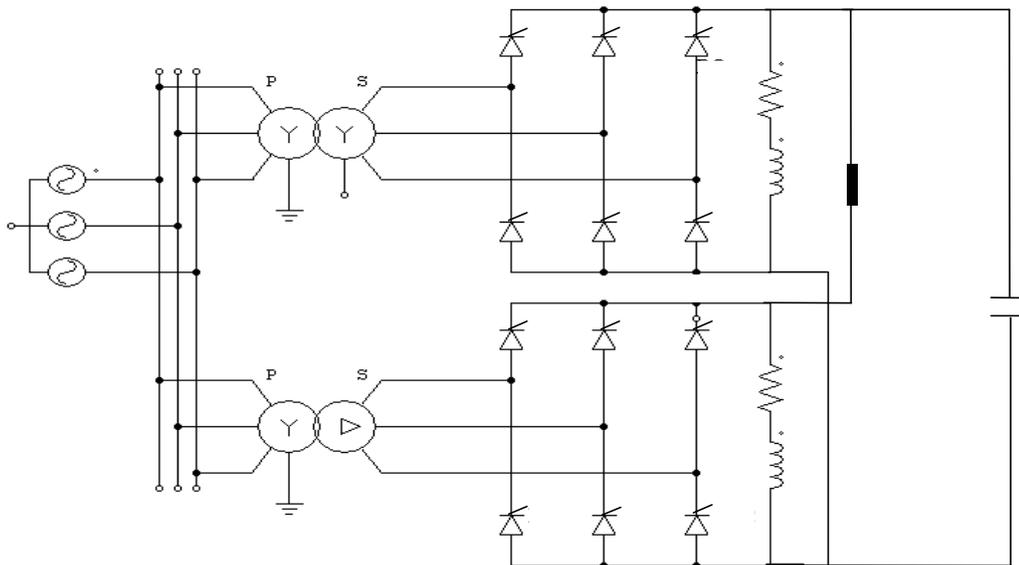


Figure IV.6 : Schémas d'un redresseur Dodécaphasé.

❖ Résultats de simulations

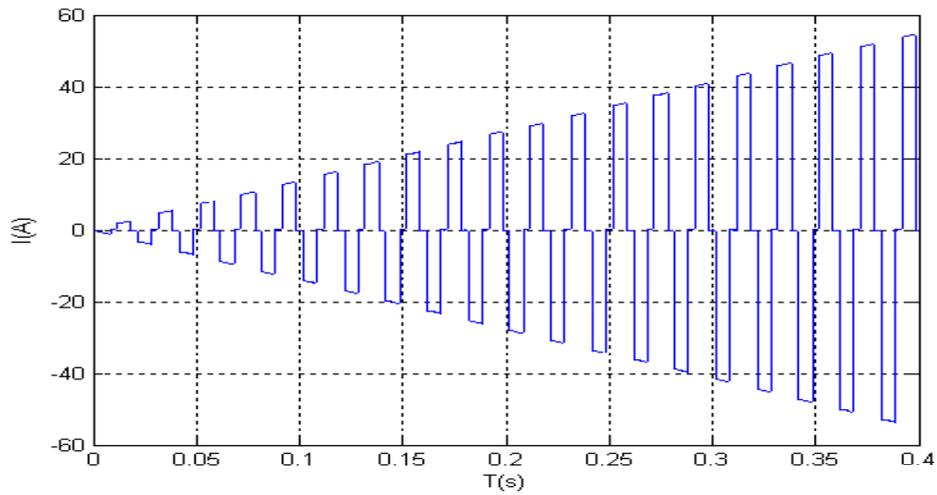


Figure IV.7 : Courant du redresseur PD3

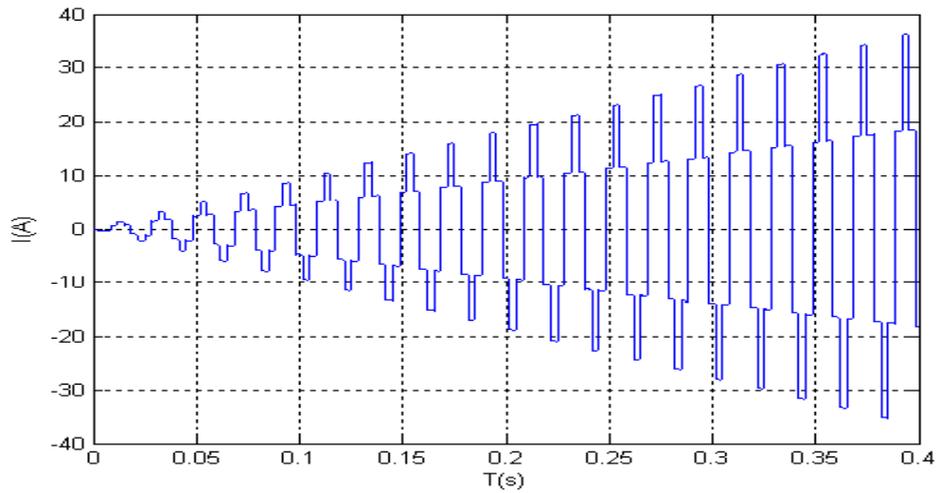


Figure IV.8 : Courant du redresseur S3

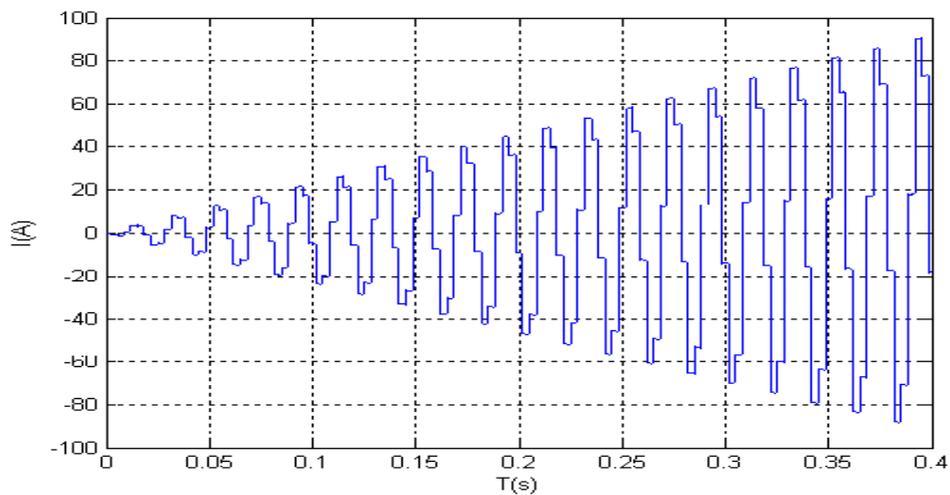


Figure IV.9 : Courant du redresseur P12

#### IV. Différentes structures du four à arc

Nous avons examiné le four triphasé mais dans l'industrie il existe tous les genres monophasé, et biphasé ...etc. Avec les sorties des deux redresseurs on peut former plusieurs configurations [48] :

On choisit quatre structures comme montées ci-dessous :

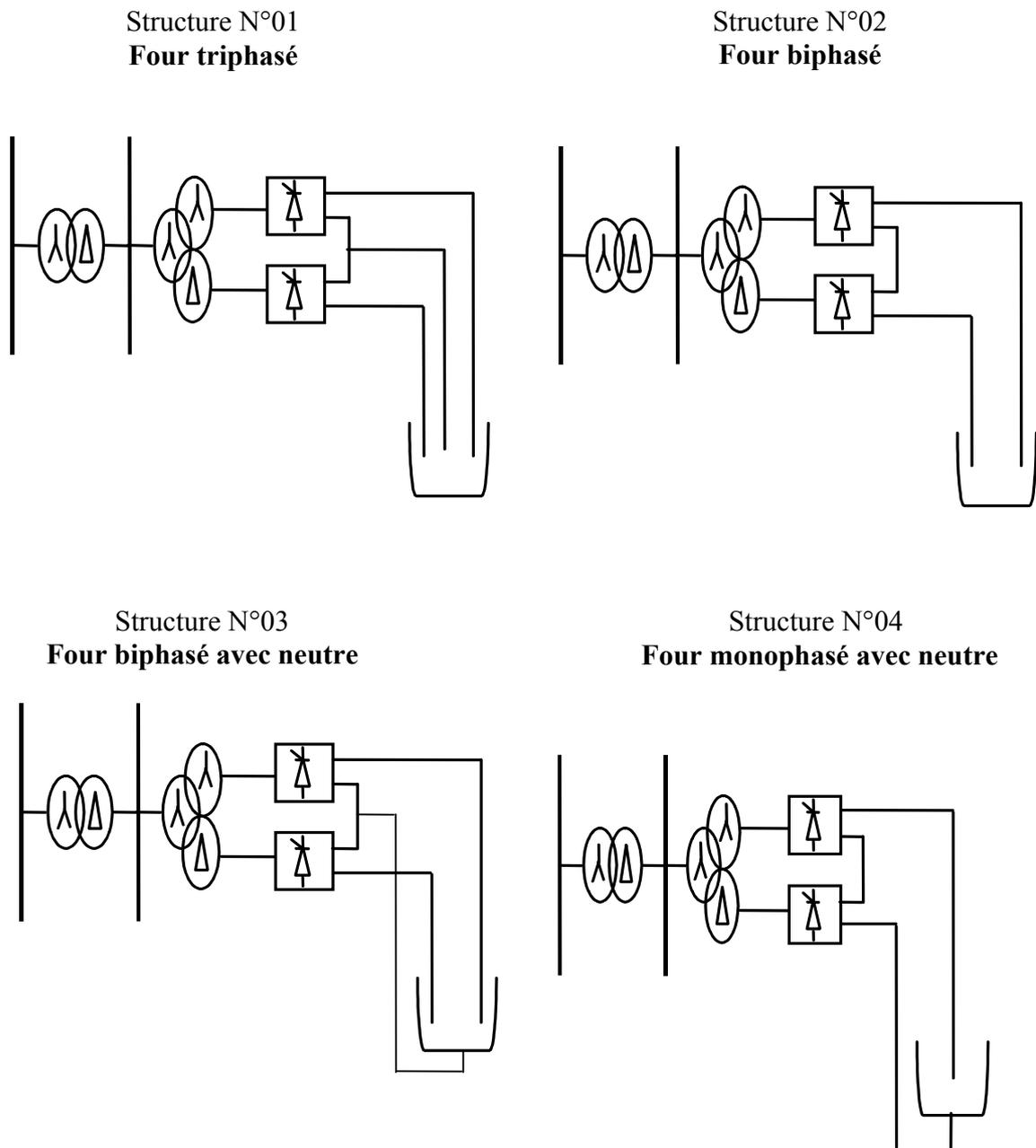
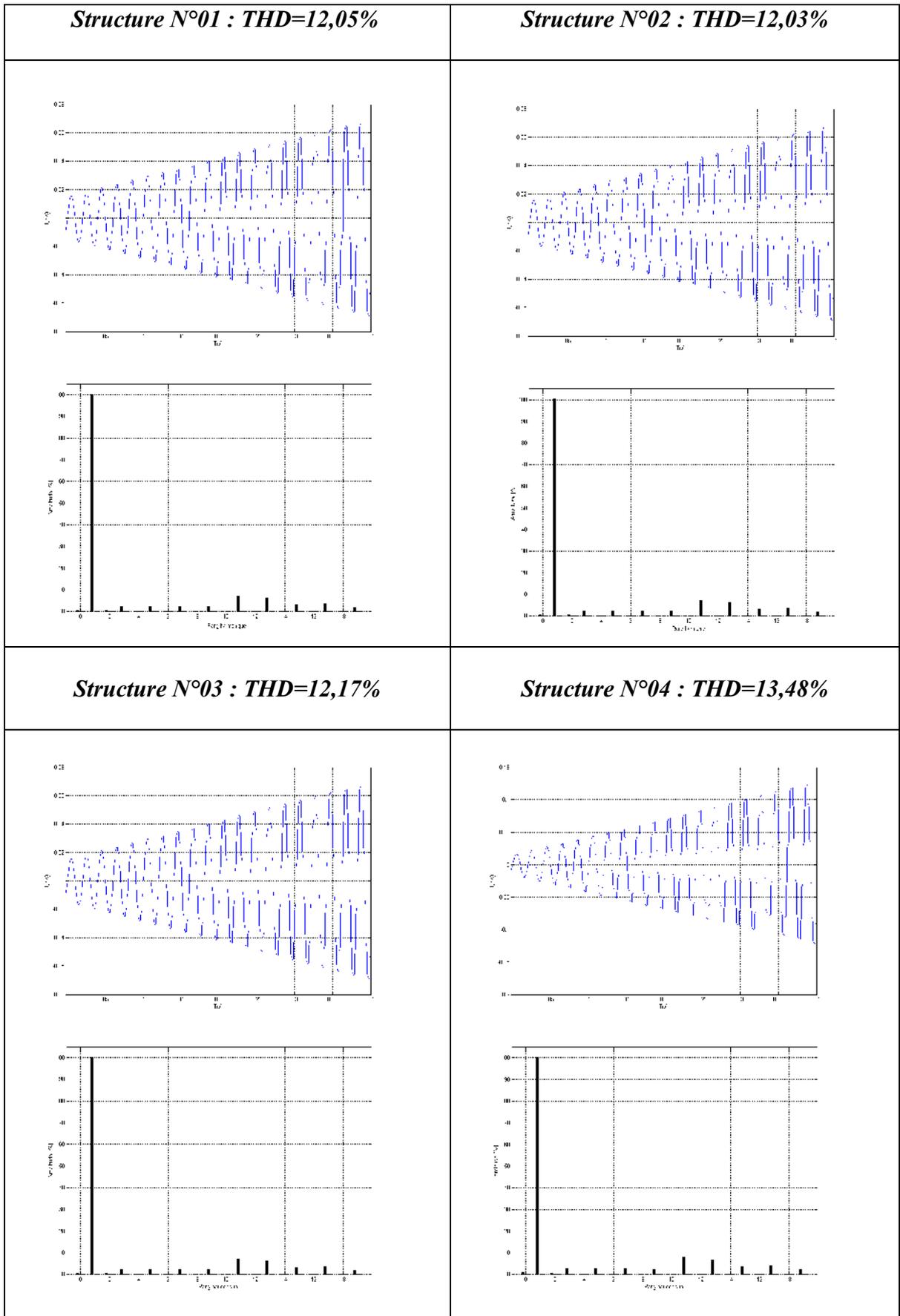


Figure IV.10 : Différentes structures du four à arc

Les résultats de simulations sont présentés dans le tableau suivant :

**Tab. IV.5 : Résultats de simulations**



### IV.1. Analyse des résultats

Le four à courant continu étant alimenté par des systèmes à base d'électronique de puissance, les perturbations sont générées en grande partie par les convertisseurs à thyristors. Par exemple, pour les redresseurs à base de thyristors, les rangs des courants harmoniques prépondérants, dits caractéristiques, s'expriment par la relation :  $n = kp+1$  ; ( $k=1\dots h$ ).

Avec :

$h$  : Rang harmonique.

$p$  : Indice de pulsation du convertisseur.

$p = 6$  : Pour un redresseur hexaphasé.

$p = 12$  : Pour un redresseur dodécaphasé.

En **pratique**, la durée non nulle des commutations n'aboutit à des formes d'ondes de type trapézoïdal et à des composantes harmoniques différentes des valeurs théoriques. De plus, les irrégularités de fonctionnement des ponts, consécutives aux imprécisions des angles de retard et aux déséquilibres de tension d'alimentation, peuvent aussi aboutir à l'apparition de courants à des fréquences non caractéristiques.

Par conséquent, lorsque, à certaines fréquences harmoniques, l'impédance du réseau est élevée et que des injections de courants harmoniques surviennent aux fréquences correspondantes, il en résulte, en appliquant la loi d'Ohm, des tensions harmoniques importantes.

Les mesures faites sur les **fours à courant continu** mettent aussi en évidence un certain nombre de phénomènes:

- Les ponts redresseurs des alimentations étant du type dodécaphasé, on retrouve les harmoniques caractéristiques des rangs **11, 13, 23** et **25** ce qui est parfaitement prévisible « comme montrées sur les résultats de simulations ».
- L'analyse des résultats met aussi en évidence un certain nombre d'harmoniques non caractéristiques, d'amplitude non négligeable, notamment dans le domaine des basses fréquences.
- Nous notons que les quatre structures donnent des valeurs du THD entre **12 et 14%** c'est à dire acceptable.
- La proposition N°02 est la meilleure entre les quarts structures proposées, puisque elle donne un minimum THD.

## V. Etude les différentes étapes du fonctionnement

Pour voir les différentes étapes du fonctionnement on traite toutes les positions des trois électrodes, on fait  $2^3$  : commutations c'est à dire huit positions qui représentent tous les cas possibles :

On donne : 1 à la position haute de l'électrode.

0 à la position basse de l'électrode.

E: Electrode

Le tableau suivant résume l'étude :

**Tab IV.6 : Différentes positions possibles des électrodes**

Etat	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

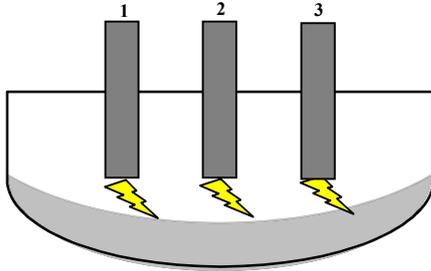
On fait une simulation pour chaque étape et en déterminant les pourcentages des harmoniques les plus prépondérantes « 5, 7, 11, et 13 », et le taux de distorsion harmonique « THD » correspond.

**Tab IV.7 : La norme IEC-CEI 61000-3-6 – 1996**

Harmoniques	Tension Nominale		
	$U_n < 30KV$	$30KV \leq U_n < 150KV$	$U_n \geq 150KV$
<b>H<sub>5</sub> (%)</b>	5,0	<b>3,5</b>	2,0
<b>H<sub>7</sub> (%)</b>	4,0	<b>3,0</b>	2,0
<b>H<sub>11</sub> (%)</b>	3,0	<b>2,2</b>	1,5
<b>H<sub>13</sub> (%)</b>	2,5	<b>2,0</b>	1,2

**Etat N°01**

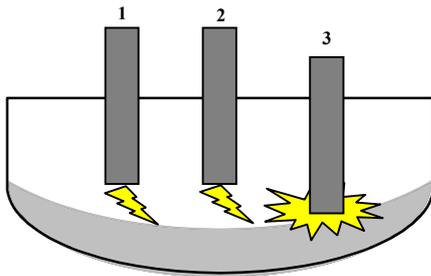
La première étape c'est l'état initial qui montre les trois électrodes en hautes positions.



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
2,54	2,97	3,40	4,21
<b>THD = 22, 27%</b>			

**Etat N°02**

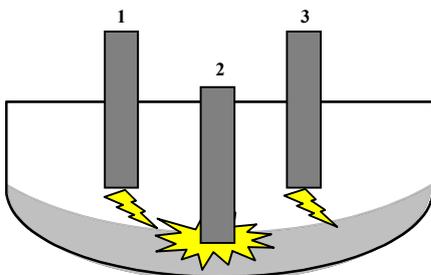
L'électrode N° 3 en position basse « submergé dans le métal » et les deux autres électrodes en position haute, cette étape montre l'amorçage monophasé.



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
9,01	6,56 %	7,78 %	5,49 %
<b>THD = 50, 35%</b>			

**Etat N°03**

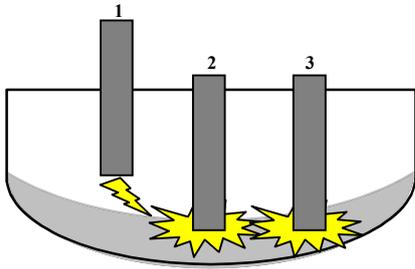
L'électrode N° 2 en position basse « submergé dans le métal » et les deux autres électrodes en position haute, cette étape montre un amorçage monophasé.



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
0,56	0,43	5,09	2,87
<b>THD = 6, 51 %</b>			

**Etat N°04**

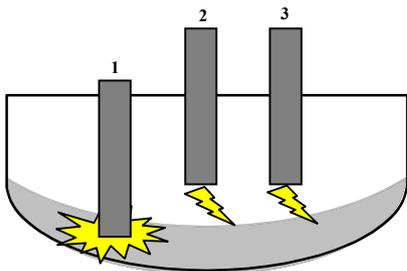
Deux électrodes « 2 et 3 » dans le métal et un seul en position haute « N°1 ».



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
4,87	2,44	8,53	7,92
<b>THD = 13, 59%</b>			

**Etat N°05**

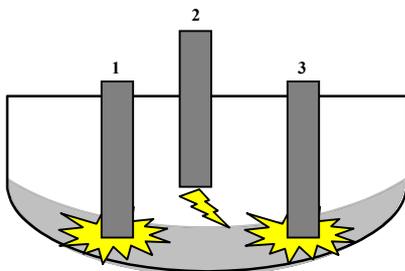
L'électrode N°1 en position basse « submergé dans le métal » et les deux autres électrodes en position haute, cette étape montre un amorçage monophasé.



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
12.84	9.82	7.55	5.30
<b>THD = 38, 49%</b>			

**Etat N°06**

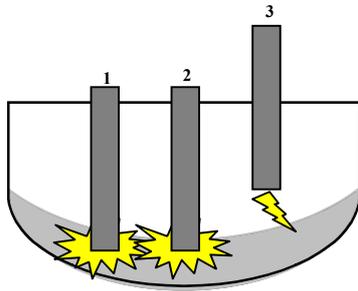
Deux électrodes « N° 1 et 3 » dans le métal et un seul en position haute « N°2 ».



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
2,35	3,53	7,06	5,88
<b>THD = 10 %</b>			

**Etat N°07**

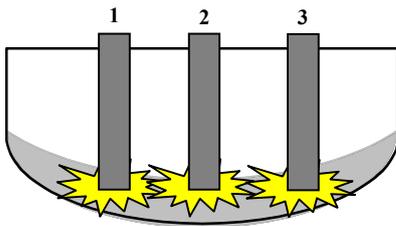
Deux électrodes « 1 et 2 » dans le métal et un seul en position haute « N°3 ».



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
6,25	1,87	7,25	6,87
<b>THD = 79,59%</b>			

**Etat N°08**

La dernière étape c'est la fin de l'opération c'est à dire les trois électrodes sont en basse position « dans le métal ».



H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
2,22	2,66	5,55	4,44
<b>THD = 10,03 %</b>			

**V.1. Commentaire & Discussion**

Par comparaison, les résultats obtenus avec la norme **ICE61000** «Tab N° IV.7 », on constate que les harmoniques 5 et 7 sont toujours dans les normes, mais les harmoniques 11 et 13 les dépassent.

D'après l'étude au paravent on peut déduire une nouvelle technique de commande du mouvement des électrodes pendant le fonctionnement du four à arc.

Cette technique sert à utiliser successivement les électrodes par ordre c'est en premier lieu tous les électrodes en position haute « Etape N°01 » puis un amorçage monophasé et on choisi l'étape qui donne un minimum du THD donc « Etape N°03 », puis l'amorçage sera biphasé, et d'après la même procédure on choisi « Etape N°06 », en fin en descend tous les électrodes c'est à dire la dernière étape « Etape N°08 ».

Notre technique de commande proposée est parfaitement déduite coté qualité d'énergie « Power Quality » et ne tient pas compte des autres contraintes mécaniques, chimique et métallurgique.

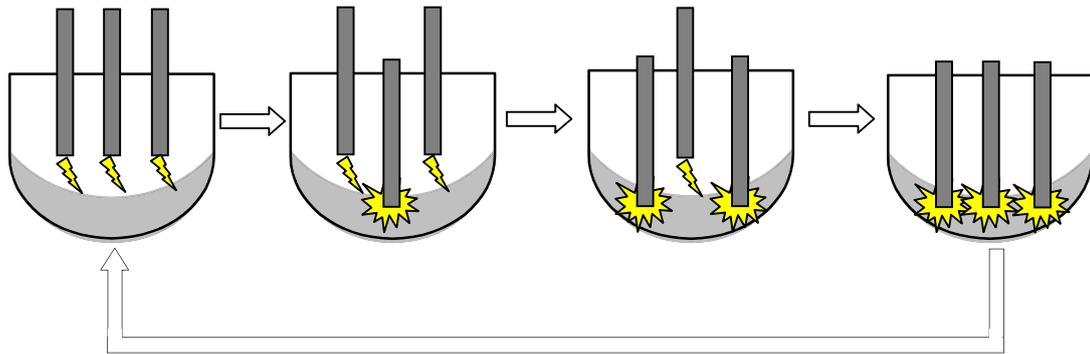


Figure IV.11. Cycle du bon fonctionnement.

**Tab IV.8 : Valeurs des harmoniques dans la nouvelle technique.**

Etape	H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
1	2,54	2,97	3,40	4,21
3	0,56	0,43	5,09	2,87
6	2,35	3,53	7,06	5,88
8	2,22	2,66	5,55	4,44

## VI. Comparaison entre le four à courant continu et à courant alternatif

Les avantages du four à courant continu résident principalement dans l'amélioration de la stabilité de l'arc :

- Une réduction de la consommation d'électrode de graphite.
- Une réduction de la consommation énergétique.
- Une réduction des nuisances : bruit, papillotement [21,60].

Les figures IV.11 et IV.12 présentent le spectre harmonique pour les deux types du four

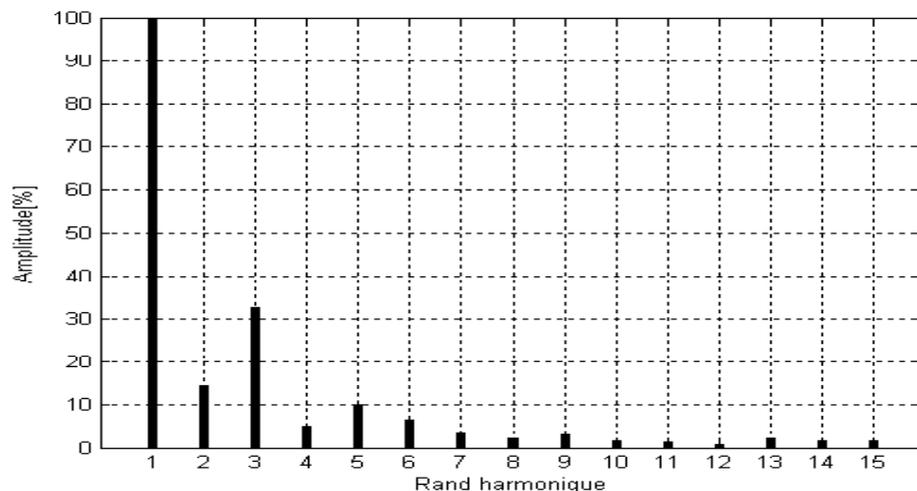


Figure IV.12 : Spectre d'harmonique « four à courant alternatif »

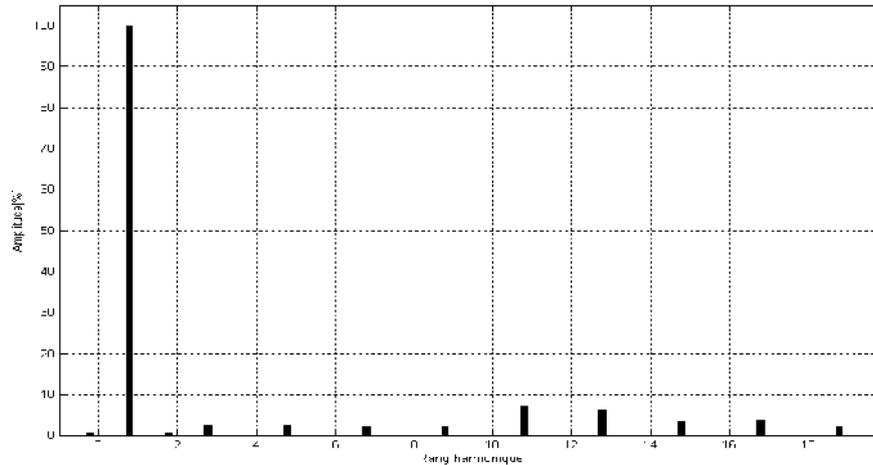


Figure IV.13 : Spectre d'harmonique « four à courant continu »

**Tab IV.9 : Comparaison des harmoniques avec la norme.**

Harmoniques	H <sub>5</sub> (%)	H <sub>7</sub> (%)	H <sub>11</sub> (%)	H <sub>13</sub> (%)
Four à courant alternatif	10,04	3,59	1,34	2,28
Four à courant continue	1,92	2,66	5,55	4,44
IEC-CEI 61000-3-6 - 1996	<b>3,5</b>	<b>3</b>	<b>2,2</b>	<b>1,2</b>

Pour le four à courant alternatif, on constate que tous les harmoniques cités sont supérieurs de la norme, par contre pour le four à courant continue les harmoniques 11 et 13 dépassent les normes. Donc on peut proposer de mettre un ou deux filtres passifs résonnants, pour atténuer les harmoniques les plus grandes « 3 et 5 », et on même temps compenser l'énergie réactive absorbée par le four. D'après certaines étude l'utilisation de la compensation est suffisante, ou en utilisant les deux « compensations et filtrage sur les harmoniques les plus prépondérantes ».

## VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux méthodes utilisées pour remédier les différentes perturbations électriques induites par le four à arc, spécialement nous avons fait une application sur la nouvelle structure d'alimentation qui montre l'élimination des harmoniques 5 et 7.

Une nouvelle technique de commande des électrodes du four à été présentée dans ce chapitre, cette technique aide à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique puisque elle donne à chaque étape un niveau bas d'émission d'harmonique

## Conclusion générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol sur la problématique liée à perturbation induites par les charges non linéaires dans l'industrie spécialement les **fours à arcs**.

Le four à arc est la charge non linéaire la plus sophistiquée, car l'arc électrique est non linéaire, instable et dissymétrique, donc il est très difficile de le modéliser et jusqu'à maintenant ce problème se pose toujours.

Dans le cadre de ce projet, nous avons fait un nouveau modèle mathématique paramétrique du four à arc c'est à dire qui dépend des paramètres électriques du four. Ce modèle que nous proposons fait apparaître un nouveau paramètre du four qui est le « **condensateur** », puisque les électrodes changent continuellement de position, notre modèle permet une facilitation d'intégrer dans la boucle de régulation, et comme ça on réduit les intervention des opérateurs, donc la réduction des erreurs humaine, qui dues à l'estimation visuelle, par conséquent cette automatisation nous permet de faire un meilleur management de l'énergie et à la réduction du consommation du KWh /ton, donc augmenter la production .

Avec ce nouveau modèle nous pouvons voire clairement son importance par rapport au modèle réel puisque il présente quelques avantages comme ;

- La réduction des oscillations du courant d'électrode et la tension qui montre le bénéfice sur le plan économique (longévité des équipements électriques et mécaniques).
- Minimisation l'effet de scintillement sur le moteur des électrodes
- Réduction le temps de la fusion. .
- Une large gamme de contrôle.
- Augmentation de la production.
- Moins des perturbations tel que les harmoniques, flicker et le déséquilibre.

On sait que le fonctionnement du four à arc fait apparaître plusieurs perturbations telle que les harmoniques, flicker, le déséquilibre ...etc. Plusieurs solutions d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, notamment la dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées, on peut citer le filtrage, la compensation de l'énergie réactive ...qui sont pratiquement suffisantes pour atténuer les harmoniques (rangs < 13).

Autre solutions c'est l'adaptation de l'installation pour diminuer les harmoniques basée sur l'utilisation des transformateurs à couplages particuliers « double secondaire » pour réduire les harmoniques 5 et 7 donc une nouvelle architecture d'alimentation composée par les redresseurs « chapitre IV ».

Notre modèle est valable pour le four à courant alternatif que pour celui à courant continue qui sont les deux principaux types utilisés dans le domaine de la sidérurgie, le four à courant alternatif malgré ces perturbations stochastiques est le plus répondu, grâce a son faible coût et inertie par rapport au four à courant continue, ce dernier est utilisé dans les grandes aciéries électrique associé toujours par un four d'affinage « four de poche » généralement à courant alternatif.

Pour conclure ce travail, nous avons constaté que les principaux objectifs fixés prévus ont été atteints. De ce fait, cette présente étude pourrait en effet servir de base pour des éventuelles études plus exhaustives.

## Bibliographie

- [1] B.Trentini ; « Aciéries. Évolution des procédés », Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7600, pp 1-11.
- [2] 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, Mai 1986, p. 377-394.
- [3] 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.
- [4] P.V. Riboud, M. Olette ; « Mechanisms of some of the reactions involved in secondary refining. (Mécanismes de certaines réactions mises en oeuvre en métallurgie secondaire) ». 7<sup>em</sup> congrès international sur la métallurgie sous vide, Tokyo, 26-30 Novembre 1982. Proceedings, pp. 879-889.
- [5] P. Ayed, C. Ouvradou, J.Astier ; « Aciérie électrique » ; Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7 700, pp.1-24.
- [6] S.Vacquité ; « Arc électrique. » Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique D 2 870, pp. 3-95.
- [7] C.Gary ; « L'arc électrique et ses applications », Revue de Génie Electrique, 1983, vol. 4, pp. 5-264.
- [8] 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.
- [9] M. Kratz ; « Four à arc » Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique, D 5 920, pp.5-99.
- [10] J.C. Huber, C. Grisvard, D. Pernet , J.P. Birat ; « Recyclage des pneumatiques au four électrique d'aciérie », Rapport IRSID RC00.33, Janvier 2001.
- [11] B.Gros (ARCELOR) «Charging tires in the EAF as a substitute for carbon», BLIC meeting, 13 November 2003.
- [12] La Sidérurgie ; « Guide pour l'estimation des gaz à effet de serre produits par des systèmes de combustion et des procédés industriels ». Division des gaz à effet de serre Environnement Canada Mars 2004.
- [13] B.Bowman, L. Camagna ; « Les fours à arcs rapides en Europe ».La Revue de Métallurgie Janvier 1995.
- [14] G.Dolle ; « Historique du four à arc ». Revue de métallurgie 1995.
- [15] H. Sticker, S.E. Stenkvis (ABB); «The DC Arc Furnace: An important tool in modern Steelmaking ». 4<sup>th</sup> European Electric Steel Congress, Madrid, 3-6 November. 1992.
- [16] H. Muller (Voest-Alpine), D.Meredith ; ((Florida Steel Corporation) et E.NIX ((Deutsche Voest-Alpine) ; « Four électrique à courant continu de Florida Steel Corporation à Tampa (USA). ATS ». Journées sidérurgiques 92, Paris, Décembre 1992.
- [17] P. Nyssen & al ; « Contrôle du four électrique grâce à un nouveau modèle métallurgique ». La Revue de Métallurgie, Avril 1999.
- [18] M. Amblard ; « Compte-rendu du 3<sup>eme</sup> congrès - Fours Electriques - de BOURNEMOUTH ». La Revue de Métallurgie, Mars 1990.
- [19] P.Bianchi & al ; « Optimisation de la technologie et de l'environnement du four UHP de l'usine de CAMPI de la Nuova ITALSIDER ». La Revue de Métallurgie, Août - Septembre 1985.
- [20] J. Antoine, P. Lelouer ; « Le bruit et l'insonorisation industrielle. Application au cas des aciéries électriques » La Revue de Métallurgie, Août -Septembre 1984
- [21] R. Ott ; « Qualité de la tension ; Fluctuations et flicker » .Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 263, pp.1-20, 1990.

- [22] C.Fetha, « Analysis of Essential index on Electric Energy Quality In the case of Voltage Dips and Interruptions ».JEE, Vol.2, No.4, 2004.
- [23] M.A.Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) », Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Strasbourg Septembre 2002.
- [24] Méthodes de mesures des caractéristiques et cibles de qualité de tension fournie par le réseau d'Hydro-Québec. IREQ, 1<sup>er</sup> Décembre 2000.
- [25] F. De Chateauvieux, « Creux de tension et coupures brèves », Notes EDF, Groupe de travail UIE power quality : Guide sur la qualité de l'électricité pour l'alimentation des installations industrielle, partie 2, HR- 22/96/045.A, 1996.
- [26] Guide to quality of electrical supply for industrial installations Partie 2, « Voltage dips and short interruptions », Working Group UIE Power Quality, 1996.
- [27] Ch.Seraudie, « Surtensions et parafoudres en BT « coordination de l'isolement BT », Cahier Technique n°179, Septembre 1995.
- [28] D.Fulchiron , « Surtensions et coordination de l'isolement », Cahier Technique n°151.
- [29] C.Collombet, J.M.Lupin et J.Schonek, "Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement », Cahier Technique n° 152.
- [30] E.Bettega , J.N.Fiorina ; « Harmoniques: Convertisseurs propres et compensateurs Actifs », Cahier Technique n° 183.
- [31] A.Robert , J.Marquet ;« Evaluation de la qualité de la tension point de vue harmonique, flicker et déséquilibre », CIGRE 36-203, août 1992.
- [32] T. Deflandre, P. Mauras ; « Les harmoniques sue les réseaux électriques », Edition Eyrolles, 1998.
- [33] Power quality courses, the Belgium Laboratory of the Electricity Industry, Laboralec 2003.
- [34] P. Meynaud, P. Pene, G. desquilbet ; « Déséquilibre de tension ». Notes EDF, 96NR00003, 1996.
- [35] G. Murry ; « Aciers. Généralités ». Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 300, pp 1-29.
- [36] J.Astier ; « Sidérurgie ; Avant-propos ». Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7000, pp 1-7.
- [37] M.Olette, Ch.Gatellier et G.Lamarquie ; « Métallurgie secondaire ». Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7750, pp 1-30.
- [38] M. Grumbach ; « Aciers d'usage général », Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 305, pp.3-40.
- [39] J. Duflot; « Lingots. Lingotières » ; Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7 800, pp.2-9.
- [40] G. Jouvin ; « La sidérurgie française, une industrie en pleine refonte », Le 4 Pages, Sessi, n° 143, Février 2001
- [41] Y. Djeghader, H. Labar, K. Bounaya ; « Modelling and Parametrical Approximation of an Electric Arc Furnace of Steelmaking » JEE ,Volume 9 / 2009 – Edition 3.
- [42] H.Labar, Y.Djeghader, M.S.Kelaiaia , K.Bounaya; « Closely Parametrical Model for an Electrical Arc Furnace», XXX. WASET International Conference that will take place on July 04- 06, 2008 in Paris, France.
- [43] H. Schau, D. Stade ; « Mathematical modelling of three phase arc furnaces ». In Proceedings of the IEEE-ICHPS II, Bologna, September 1994, pp 422-428
- [44] E.A. Cano Plata, H.E. Tacca ; « Arc furnace modelling in ATPEMTP » , International Conference on Power Systems Transients IPST'05, Montréal, Canada, 2005.

- [45] B. Boulet, G. Lalli and M. Ajersch ; « Modelling and control of an electric arc furnace,» in Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, 2003, pp. 3060-3064
- [46] K. Timm ; « Circle diagram of AC-Furnaces ». Electrical Engineering of Arc Furnaces» Symposium, Kehl, Germany, 18-21 April 2005.
- [47] O.Ozgun and Ali Bur; « Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies». Power Engineering Society Summer Meeting, 1999 IEEE, pp.507-511, July 1999.
- [48] Y. Djeghader, H. Labar, K. Bounaya ; «Analysis of Harmonics Generated by Different Structures of a DC EAF», International Review on Modelling and Simulations - October 2008
- [49] A. E. Emanuel, J.A. Orr ; « An Improved Method of Simulation of the Arc Voltage-Current Characteristic » .9<sup>th</sup> international Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings p.p. 148-150, October 1-4, 2000, Orlando, Florida.
- [50] M. Panoiu, C.Panoiu, I. Sora , et M. Osaci ; «Using a Model Based on Linearization of the Current - Voltage Characteristic for Electric Arc Simulation ». Proceedings of the 16<sup>th</sup> IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, Palma de Mallorca, Spain, August 29-31, 2007, page. 99-103.
- [51] H. Labar, Y. Djeghader, K. Bounaya, M.S Kelaiaia, « Improvement of electrical arc furnace operation with an appropriate model », Journal of Energy, Vol. 34, No. 9, 1207-1214, 2009
- [52] A.Robert, M.Couverur ; « Expérience récente de raccordement de grands fours à arcs sous l'angle du flicker ». Publicationon CIGRE 36-305, Septembre 1994.
- [53] Ph. Ferracci ; « La qualité de l'énergie électrique » ; Cahier Technique n° 199.
- [54] F.Vaillant ; « La compatibilité électromagnétique », Cahier Technique n° 149.
- [55] H. Bühler ; « Réglage par la logique floue », PPR 1994
- [56] J.N. Fiorina ; « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI » ; Cahiers Techniques Schneider Electric n° 160.
- [57] G.Maurer, J.P.Motte, J.Davene, C.Boisdang ; « Le four à arcs d'aciérie alimenté en courant continu » ; IRSID RE ACI 83/1033 Octobre 1983.
- [58] M. Schubert, W.Reinhard ; « Le four à arcs continu de 15 tonnes, conception technique et expériences acquises en exploitation » ; Electrowarme International N° 41 B3 Juin 1983.
- [59] G.Maurer « Nouvelles techniques du four à arcs à courant continu à impédance d'arc élevée » ; IRSID RE ACI 83/1010 Octobre 1983.
- [60] G.Maurer « Fours à arcs pilotes à courant continu ; Prolongation à l'étude à l'échelle pilot IRSID RE ACI 82/961 Décembre 1982.

## Annexe N° 01

## ❖ Caractéristiques techniques du four étudié

MODELE	80 LHF 12,5
Puissance du transformateur	12,5MVA
Tension Primaire nominale	63 KV
Fréquence	50 Hz
Diamètre des poches utilisées	Environ 3020mm
Poids nominal de coulée	80 t
Capacité de chauffage	3-4 C°/min
Diamètre cercle des électrodes	700mm
Diamètre électrode	350mm
Plage de variation de la tension secondaire à puissance apparente constante	234-265 V
Plage de variation de la tension secondaire	90-234 V
Courant secondaire maximal	31 KA
Tension de court circuit	Environ de 7%
Enroulement	Deux
Montage	Primaire : Triangle ou Etoile
	Secondaire : Triangle
Refroidissement	Circulation forcée d'huile /d'eau (OFWF)
Nombre de circulation de refroidissement	1x 100%
Nombre de niveau de tension	8
Réglage de la tension	Sélecteur entraîné par moteur et manuellement sous charge
Section de câble	4000mm <sup>2</sup>
Section totale/phase	8000mm <sup>2</sup>
Matière isolante	Caoutchouc
Matériaux flexibles	Caoutchouc
Matière de protection contre la chaleur	Fibre de verre
Protection anti-frottement	Anneaux en caoutchouc
Diamètre extérieur des tubes	170mm
Diamètre intérieur des tubes	146mm
Section des tubes	5956mm
Section totale par phase	5956mm
Diamètre pinces	350mm

## Annexe N° 02

## Tableaux des mesures :

➤ *Différents cas de teste*

TEST	ELECTRODE A	ELECTRODE B	ELECTRODE C
a-b	on	on	off
a-c	on	off	on
b-c	off	on	on
a-b-c	on	on	on

➤ *Résultats mesurées*

TEST	COURANT D'ELECTRODE [KA]			TENSION D'ELECTRODE [V]			PUISSANCE ACTIVE [KW]		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
a-b	23,38	23,38	0	114,1	113,7	234,9	0,35	0,35	0
a-c	23,25	0	23,25	113,5	242,1	115,3	0,35	0	0,35
b-c	0	22,63	22,72	241,9	114,3	116,6	0	0,31	0,31
a-b-c	25,51	25,69	25,49	130,4	130,4	130,4	0,4	0,4	0,4

➤ *Calcul les paramètres électriques*

TEST	IMPEDANCE [MΩ]			RÉSISTANCE [MΩ]			INDUCTANCE [MΩ]		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
a-b	4,8802	4,5631	/	0,6403	0,6403	/	4,8381	4,8208	/
	- 2,55%	- 2,89%	/	2,58%	2,58%	/	- 2,63%	- 2,98%	/
a-c	4,8817	/	4,9591	0,6475	/	0,6475	4,8386	/	4,9167
	- 2,52%	/	- 0,97%	3,73%	/	3,73%	- 2,62%	/	- 1,05%
b-c	/	5,0508	5,1320	/	0,6053	0,6005	/	5,0144	5,0968
	/	0,86%	2,48%	/	- 3,02%	- 3,79%	/	0,92%	2,56%
a-b-c	5,1117	5,0759	5,1157	0,6147	0,6061	0,6156	5,0746	5,0396	5,0786
	2,07%	1,36%	2,15%	- 1,53%	- 2,90%	- 1,37%	2,13%	1,43%	2,21%
Moyenne	5,0078			0,6242			4,9687		

**Annexe N° 3**

**Données du travail :** Nous avons 32 mesures pour chaque tension secondaire du transformateur (il existe 9 tensions) comme montrées sur les tableaux suivants :

<b>TENSIONS SECONDAIRES DU TRANSFORMATEUR [V]</b>															
265	234	210	190	174	160	149	112	90							

<b>PUISSANCE REACTIVE [MVAR]</b>																						
20,8	20,5	19,4	17,9	15,9	13,3	11,8	11,5	11,2	10,9	10,6	10,2	9,9	9,6	9,2	8,9	8,5	8,2					
7,8	7,5	7,1	6,8	6,5	6,1	5,8	5,4	5,1	4,7	4,4	4,1	3,7	3,4									
16,5	16,2	15,3	14,1	12,6	10,5	9,4	9,1	8,9	8,6	8,3	8,1	7,8	7,6	7,3	7,0	6,7	6,5	6,2	5,9			
5,6	5,4	5,1	4,8	4,6	4,3	4,0	3,7	3,5	3,2	2,9	2,7											
13,2	13,0	12,3	11,4	10,1	8,5	7,5	7,3	7,1	6,9	6,7	6,5	6,3	6,1	5,9	5,6	5,4	5,2	5,0	4,8	4,5	4,3	4,1
3,9	3,7	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,1														
10,8	1,6	10,1	9,3	8,3	6,9	6,2	6,0	5,8	5,7	5,5	5,3	5,1	5,0	4,8	4,6	4,4	4,3	4,1	3,9	3,7	3,5	3,3
3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8													
9,1	8,9	8,4	7,8	6,9	5,8	5,2	5,0	4,9	4,7	4,6	4,5	4,3	4,2	4,0	3,9	3,7	3,6	3,4	3,3	3,1		
3,0	2,8	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5												
7,7	7,5	7,1	6,6	5,9	4,9	4,4	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,3
2,4	2,2	2,1	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2													
6,7	6,5	6,2	5,7	5,1	4,3	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3		
2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1												
3,8	3,7	3,5	3,3	2,9	2,4	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3		
1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6												
2,5	2,4	2,3	2,1	1,9	1,6	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4												

<b>PUISSANCE ACTIVE [MW]</b>																																
3,2	4,2	6,1	7,8	9,2	10,0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,0	10,0	9,9	9,8	9,8	9,7	9,6	9,5														
9,3	9,2	9,1	8,9	8,7	8,6	8,4	8,2	8,0	7,7	7,5	7,2	7,0																				
2,5	3,3	4,8	6,2	7,3	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,9	7,9	7,8	7,8	7,7	7,6	7,6	7,5	7,4	7,3	7,2	7,0	6,9	6,8								
6,6	6,5	6,3	6,1	5,9	5,7	5,5																										
2,0	2,7	3,9	5,0	5,8	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3	6,3	6,2	6,1	6,1	6,0	5,9	5,9	5,8	5,7	5,6	5,4	5,3	5,2	5,1	4,9	4,8	4,6	4,4	
1,6	2,2	3,2	4,1	4,8	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1	5,0	5,0	4,9	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,5	4,4	4,3	4,1	4,0	3,9	3,8	3,6	
1,4	1,8	2,7	3,4	4,0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3	4,2	4,2	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	3,8	3,7	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,0	
1,2	1,5	2,2	2,9	3,4	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6
1,0	1,3	1,9	2,5	2,9	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2	
0,6	0,8	1,1	1,4	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	
0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	

TENTION [V]													
234,1	234,7	236,4	238,7	241,7	245,2	247,2	247,6	248,1	248,5	248,9	249,4	249,8	249,8
250,3	250,7	251,2	251,6	252,1	252,6	253,1	253,6	254,1	254,6	255,1	255,6	256,1	256,6
257,1	257,7	258,2	258,7	259,3									
209,4	209,8	211,2	213,0	215,4	218,2	219,8	220,1	220,5	220,8	221,1	221,5	221,8	221,8
222,2	222,6	222,9	223,3	223,7	224,1	224,5	224,8	225,2	225,6	226,0	226,5	226,9	227,3
227,7	228,1	228,6	229,0	229,4									
187,7	188,1	189,3	191,0	193,1	195,7	197,1	197,4	197,7	198,1	198,4	198,7	199,0	199,0
199,3	199,7	200,0	200,3	200,7	201,0	201,4	201,7	202,1	202,4	202,8	203,2	203,5	203,9
204,3	204,7	205,1	205,5	205,9									
169,7	170,1	171,2	172,7	174,7	177,0	178,3	178,6	178,9	179,1	179,4	179,7	180,0	180,0
180,3	180,6	180,9	181,2	181,5	181,8	182,2	182,5	182,8	183,1	183,5	183,8	184,1	184,5
184,8	185,2	185,5	185,9	186,2									
155,3	155,7	156,7	158,1	159,9	162,0	163,2	163,5	163,7	164,0	164,3	164,5	164,8	164,8
165,1	165,3	165,6	165,9	166,2	166,5	166,8	167,1	167,4	167,7	168,0	168,3	168,6	168,9
169,2	169,5	169,9	170,2	170,5									
142,8	143,1	144,0	145,3	147,0	148,9	150,1	150,3	150,5	150,8	151,0	151,3	151,5	151,5
151,8	152,0	152,3	152,5	152,8	153,1	153,3	153,6	153,9	154,2	154,4	154,7	155,0	155,3
155,6	155,9	156,2	156,5	156,8									
132,8	133,1	134,0	135,2	136,8	138,6	139,7	139,9	140,1	140,3	140,6	140,8	141,0	141,3
141,5	141,7	142,0	142,2	142,5	142,7	143,0	143,3	143,5	143,8	144,1	144,3	144,6	144,9
145,1	145,4	145,7	146,0										
101,3	101,5	102,1	102,9	103,9	105,1	105,8	106,0	106,1	106,2	106,4	106,6	106,7	106,7
106,9	107,0	107,2	107,3	107,5	107,7	107,8	108,0	108,2	108,4	108,5	108,7	108,9	108,9
109,1	109,3	109,4	109,6	109,8	110,0								
82,1	82,2	82,7	83,3	84,0	84,9	85,4	85,5	85,6	85,7	85,9	86,0	86,1	86,2
86,3	86,4	86,6	86,7	86,8	86,9	87,0	87,2	87,3	87,4	87,6	87,7	87,8	88,0
88,1	88,2	88,4	88,5										

COURANT [KA]													
45.9	45.5	44.3	42.5	40.0	36.4	34.0	33.4	32.9	32.4	31.8	31.2	30.6	30.0
29.4	28.7	28.1	27.4	26.8	26.1	25.4	24.7	24.0	23.2	22.5	21.8	21.0	20.2
19.4	18.6	17.7	16.9										
41.1	40.7	39.6	38.1	35.8	32.5	30.4	29.9	29.4	28.9	28.4	27.9	27.4	26.8
26.3	25.7	25.1	24.6	24.0	23.3	22.7	22.1	21.4	20.8	20.1	19.5	18.8	18.1
17.4	16.6	15.9	15.1										
36.8	36.5	35.5	34.1	32.1	29.2	27.2	26.8	26.4	26.0	25.5	25.0	24.6	24.1
23.6	23.1	22.5	22.0	21.5	20.9	20.4	19.8	19.2	18.6	18.1	17.4	16.8	16.2
15.6	14.9	14.2	13.5										
33.3	33.0	32.1	30.9	29.0	26.4	24.6	24.3	23.9	23.5	23.1	22.6	22.2	21.8
21.3	20.9	20.4	19.9	19.4	18.9	18.4	17.9	17.4	16.9	16.3	15.8	15.2	14.7
14.1	13.5	12.9	12.2										
30.5	30.2	29.4	28.2	26.6	24.1	22.5	22.2	21.8	21.5	21.1	20.7	20.3	19.9
19.9	19.5	19.1	18.6	18.2	17.8	17.3	16.9	16.4	15.9	15.4	14.9	14.4	13.9
13.4	12.9	12.3	11.8	11.2									
28.0	27.8	27.0	26.0	24.4	22.2	20.7	20.4	20.1	19.7	19.4	19.0	18.7	18.3
17.9	17.5	17.1	16.7	16.3	15.9	15.5	15.1	14.6	14.2	13.7	13.3	12.8	12.3
11.8	11.3	10.8	10.3										
26.1	25.8	25.1	24.1	22.7	20.6	19.3	19.0	18.7	18.4	18.0	17.7	17.4	17.0
16.7	16.3	15.9	15.6	15.2	14.8	14.4	14.0	13.6	13.2	12.8	12.3	11.9	11.5
11.0	10.5	10.1	9.6										
19.9	19.7	19.2	18.4	17.3	15.7	14.7	14.5	14.2	14.0	13.8	13.5	13.3	13.0
12.7	12.4	12.2	11.9	11.6	11.3	11.0	10.7	10.4	10.1	9.7	9.4	9.1	8.7
8.4	8.0	7.7	7.3										
16.1	16.0	15.5	14.9	14.1	12.8	11.9	11.7	11.6	11.4	11.2	11.0	10.7	10.5
10.3	10.1	9.9	9.6	9.4	8.9	8.7	8.4	8.2	7.9	7.6	7.4	7.1	6.8
6.5	6.2	5.9											

DISTANCE DE L'ARC [CM]																									
0	0	0	16	34	42	44	46	48	50	52	53	55	57	59	61	63	64	66	68	70	72	74	76	78	80
81	83	85	87	89																					
0	0	0	10	25	33	34	36	38	39	41	42	44	46	47	49	51	52	54	56	57	59	61	62	64	66
67	69	71	72	74																					
0	0	0	5	18	25	27	28	30	31	33	34	35	37	38	40	41	43	44	46	47	49	50	52	53	55
56	58	59	61	62																					
0	0	0	1	13	19	20	22	23	24	26	27	28	30	31	32	34	35	36	38	39	40	42	43	44	46
47	48	50	51	53																					
0	0	0	0	8	14	15	17	18	19	20	21	22	24	25	26	27	29	30	31	32	34	35	36	37	39
40	41	42	44	45																					
0	0	0	0	4	10	11	12	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	32
33	35	36	37	38																					
0	0	0	0	1	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	32	33																					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	11
11	12	13	14	15																					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	2	3	3	4																					

PUISSANCE D'ARC [KW]																																	
0,0	1,1	3,2	5,1	6,8	8,0	8,4	8,5	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,5	8,5	8,4	8,4	8,3	8,2	8,2	8,1	7,9	7,8	7,7	7,5	7,4	7,2	7,0	6,8	6,5		
0,0	0,8	2,5	4,0	5,4	6,3	6,6	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,7	6,6	6,6	6,5	6,4	6,4	6,3	6,2	6,1	5,9	5,8	5,7	5,5	5,4	5,2		
0,0	0,7	2,0	3,2	4,3	5,1	5,3	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,3	5,3	5,2	5,2	5,1	5,0	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,4	4,3	4,2		
0,0	0,6	1,6	2,7	3,5	4,2	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,2	4,2	4,1	4,1	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	
0,0	0,5	1,4	2,2	3,0	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9	
0,0	0,4	1,2	1,9	2,5	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	
0,0	0,3	1,0	1,6	2,2	2,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	
0,0	0,2	0,6	0,9	1,2	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	
0,0	0,1	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8																						

## Annexe N° 04

## Schémas de simulation « Four à arc à courant continu »

