

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

LEGOUGUI Iman

**Thème:**

# Simulation d'un four à arc électrique triphasé

Soutenu publiquement

Le : 04/06/2017

Devant le jury :

M<sup>f</sup> ROUIBEH Taher

MC (B) Président

UKM Ouargla

M<sup>f</sup> AYAD Ahmed Nour El Islam

MC (B) Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>f</sup> BENMAKHOULF Abdesslam

MA (A) Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2016/2017

# REMERCIEMENTS

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

❖ De façon spéciale, je tiens à remercier mon rapporteur chargé du suivi de mon travail,

*Monsieur Ayad Ahmed Nour El islam*

Pour ses encouragements à effectuer cette étude, ses conseils précieux, son sérieux et sa Disponibilité

❖ Je remercie monsieur Rouibeh Taher maitre de conférence à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

J'adresse, aussi mes remerciements à monsieur Benmakhlouf Abdesslam Maître assistant de l'Université Kasdi Merbah Ouargla d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère*

*A ma famille*

*A mes amis*

*et que ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration  
de ce travail*

**Liste des symboles, Notations & Abréviations et *Nomenclatures*:**

<b>SYMBOLE</b>	<b>DESIGNATION</b>
A	superficie de la surface cylindrique de l'arc.
B	représente la chute de tension par longueur d'arc de la lampe
$d_0$	constante de densité de courant par unité de superficie de l'arc
$dQ/dt$	est la variation (le changement) de la quantité en chaleur Q en fonction du temps
G S	vecteur de la conductivité mesurée de lampe
$g_j$ (j = a, b, c)	est la conductivité instantanée d'arc dans chaque phase.
$g_{min}$	la conductivité minimale
i	est le courant d'arc électrique
$I_j$ (j = a, b, c)	est le courant instantané d'électrode dans chaque phase.
$L_j$ (j = a, b, c)	l'inductance des électrodes
$L_s$	l'inductances du côté source
$M_{ij}$	sont les inductances mutuelles
P	Puissance active
$P(t)$	la puissance instantanée
$P_r$	pression totale
Q	est la quantité de chaleur de l'énergie stockée .
$R_j$ (j = a, b, c)	sont les résistances des électrodes dans chaque phase.
$r_s$	sont la résistances du côté source
THD A %	Déformation harmonique totale dans le courant
THD V %	Déformation harmonique totale dans la tension
$t_p$	est le rapport de transformation de four à arc électrique
u	est la tension d'arc
i	est le courant de l'électrode
$P_{per}$	est la puissance dissipée d'arc
Q	Puissance réactive
T	Température
t	Time

$E_0$	la tension d'arc électrique
$\theta$	c'est la constante de temps de recombinaison de charge d'arc électrique
$\sigma$	La conductivité électrique
$I_n$	Le courant harmonique du rang n
AC	Courant alternatif
EAF	four à arc électrique
HF	Haute Fréquence
UV	Ultraviolet
V-I	tension-courant
Xe	Xénon
BT	Basse tension
HT	Haute tension
THD	Taux d'harmonique de distorsion

## LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES	PAGE
Figure I-1	Four à arc électrique	4
Figure I-2	Vue de coupe et extérieure d'un four à courant alternatif	5
Figure I-3	Vue extérieure d'un four à courant alternatif [ph]	6
Figure I-4	Caractéristiques d'arc $U_2 = f(I_2)$ pour différentes longueurs d'arc $l_A$	8
Figure I-5	Diagramme de fusion d'un four à arc [1]	10
Figure I-6	Effet du courant sur l'arc	11
Figure I-7	Répartition du potentiel de la décharge d'arc, le long de l'axe	12
Figure I-8	Alimentation de four à arc à courant alternatif	12
Figure I-9	Alimentation de four à arc à courant continu	14
Figure II-1	Colonne de l'arc électrique selon Cassie.	19
Figure II-2	Colonne de l'arc selon Mayr	22
Figure II-3	Caractéristique statique des modèles proposés de la décharge	24
Figure II-4	Modèle monophasé pour un four lié à la source d'alimentation.	25
Figure II-5	Le modèle triphasé détaillé d'un réseau qui alimente un four à arc.	26
Figure III-1	Le modèle de la conductivité d'une seule phase d'un four à arc électrique.	29
Figure III-2	Déclaration des variables d'entrée de la conductivité d'arc électrique	30
Figure III-3	Le modèle général de la Simulation d'un four dans un réseau électrique.	31
Figure III-4	Phénomène d'extinction et de réamorçage de l'arc	32
Figure III-5	Extinction d'arc.	33
Figure III-6	Court-circuit électrode- ferraille.	33

Figure III-7	Formes d'ondes instantanées de la tension d'arc déséquilibrée des trois phases.	35
Figure III-8	Formes d'ondes instantanées du courant d'arc déséquilibré des phases (A,B,C).	36
Figure III-9	Valeurs instantanées de la tension et du courant pendant la phase de forage.	37
Figure III-10	la tension et le courant d'arc dans une phase A avec du clignotement de 10Hz aléatoire.	38
Figure III-11	La tension d'arc dans une phase avec du clignotement de 10Hz pendant la phase fusion.	39
Figure III-12	Le courant d'arc dans une phase avec du clignotement de 10Hz pendant la phase fusion.	39
Figure III-13	La conductivité pendant la phase fusion.	40
Figure III-14	La caractéristique tension/courant vue dans la phase A	40
Figure III-15	La tension et le courant d'arc dans la phase d'affinage.	41
Figure III-16	La conductance d'arc électrique liée à la phase A.	42
Figure III-17	Spectre fréquentiel des courants	44
Figure III-18	Spectre fréquentiel des tensions	45

### LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX	TITRES	PAGE
Tableau III.1	paramètres caractéristiques d'équipement.	31

<b>SOMMAIRE</b>	
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>Chapitre I : Technologies des fours à arcs</b>	
I. Introduction. ....	2
I.2. Définition.....	2
I.2.1. Arc électrique.....	2
I.2.2. Four à arc électrique .....	2
I.3. Composition et principe de fonctionnement du four électrique.....	3
I.3.1. Constituants du four électrique. ....	3
a) La cuve du four à arc .....	5
b) Le berceau de basculement.....	5
c) La voûte.....	5
d) Les électrodes.....	5
I.3.2 Fonctionnement du four à arc à courant alternatif triphasé.....	6
I.3.3. Point de vue électrique. ....	6
I.3.4. Point de vue thermique .....	7
I.3.4.1. Chargement.....	7
a) Phase de forage (amorçage).....	7
I.3.4.2. Fusion.....	8
I.3.4.3. Affinage. ....	8
I.3.5. Propriétés de l'arc de soudage.....	9
a) Courant d'arc.....	10
b) Tension d'arc.....	10
I.4. Classification des fours à arc.....	11
I.4.1. Four alimenté en courant alternatif.....	11
I.4.1.1. Description de la partie électrique.....	12
I.4.2.2. Four alimenté en courant continu.....	13
I.4.2.1. Description de la partie électrique.....	13
I.5. Avantages du four à arc.....	14
I.6. Conclusion.....	15
<b>Chapitre II : Modélisation d'un four à arc à courant alternatif</b>	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Modélisation d'un four à arc à courant alternatif.....	16
II.2.1. Modèle d'arc de Cassie-Mayr.....	16
II.2.2. Les équations du modèle.....	17
II.2.3. Le modèle de M. Cassie.....	18
II.2.4. Le modèle de O. Mayr.....	20
II.2.5. La combinaison du modèle d'arc de Cassie Mayr.....	23
II.2.6. Le modèle général combiné de la conductivité d'arc de Cassie-Mayr.....	24



II.3. Le modèle proposé.....	24
II.3.1. Source d'alimentation.....	25
II.3.2. Les différents paramètres du réseau électrique.....	25
II.4. Conclusion .....	27

### **Chapitre III : Simulation d'un four à arc électrique**

III.1. Introduction .....	28
III.2. Simulation du four à arc électrique .....	28
III.3. Résultats de simulation.....	31
III.3.1.1. Perturbations du four à arc électrique .....	31
a) Extinction d'arc.....	32
b) Court-circuit .....	33
c) Déséquilibre des tensions d'arc et des courants de ligne .....	34
III.3.1.2. Présentation des tensions et des courants d'arc pendant le cycle de fusion.....	36
a) la phase forage .....	36
b) la phase fusion .....	37
c) la phase d'affinage .....	41
III.4. Analyse des harmoniques .....	42
III.4.1. Harmoniques en courant .....	43
III.4.2. Harmonique en tension .....	45
III.5. Conclusion .....	46

### **Conclusion générale**

Conclusion générale. ....	47
---------------------------	----

### **Bibliographie**

Bibliographie .....	48
---------------------	----

## Introduction générale

Le four à arc est utilisé dans l'industrie pour la fabrication de l'acier. Le four à arc est un outil de fusion le mieux adapté, 35% des aciers sont produits des fours. [1]

La qualité d'énergie est un facteur très important du côté sécurité et continuité de service des réseaux électriques et équipements et l'économie des pays industrialisés. Les charges non linéaires dans l'industrie spécialement les fours à arcs créent des problèmes électriques et des perturbations dans les réseaux électriques, à cause de l'arc électrique est non linéaire, instable et dissymétrique, donc il est très difficile de trouver un modèle générale. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons simulé la conductivité du four à arc en fonction des paramètres électriques. Notre étude est organisée en trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous allons citer quelques phénomènes de la décharge électrique et ses applications, et puis donner le principe de fonctionnement d'une décharge d'arc et quelques domaine d'application l'industriel, ainsi que les classifications des fours à arc utilisés en métallurgie.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation mathématique de la conductivité de l'arc électrique d'un four à arc électrique, elle est basé sur la combinaison du modèle de Cassis et le modèle de Mayr.

Le troisième chapitre sera consacré aux résultats de simulation d'un four à arc électrique triphasé à courant alternatifs dans les trois phases : forage fusion affinage sous environnement Matlab Simulink. L'ensemble des résultats obtenus montrent les tensions, les courants, et la conductivité de chaque phase. Une analyse spectrale est faite pour savoir le niveau d'harmonique produit dans le réseau électrique.

# **Chapitre I :**

# *Technologies des fours à arcs*

## **I.1. Introduction**

C'est au début du XX<sup>em</sup> siècle que sont apparus les premiers fours à arcs industriels (1863-1914), afin de faire fondre les ferrailles et pour la production des aciers spéciaux. ces fours permet de réaliser un affinage sur mesure en assurant au choix une atmosphère oxydante et/ou réductrice. Les températures des fours à arc électrique sont très élevées (supérieur à 1650°C). [1]

Initialement, le four comporte trois électrodes reliées chacune à une bornes d'une source triphasé à courant continue ou alternatif. La capacité de fusion de ces fours était de l'ordre de quelques dizaines de tonnes. [2]

En effet, la capacité de production des fours modernes avoisine les 200 tonnes avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t. ils représentent une part importante de la consommation d'énergie électrique dans le domaine industriel. [2]

## **I.2. Définitions :**

### **I.2.1 Arc électrique**

L'arc électrique se produit lors du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu ionisé (air ou gaz particulier), il se caractérise par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique est obtenu entre deux électrodes soumises à une différence de potentiel. Lorsque l'arc apparaitre entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle ci devient moins importante : L'ionisation intense de l'espace inter-électrodes rendre cette zone très conductrice alors qu'elle était isolante avant l'amorçage.

### **I.2.2 Four à arc électrique :**

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, le métal fond a travers les 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 et la variation 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.

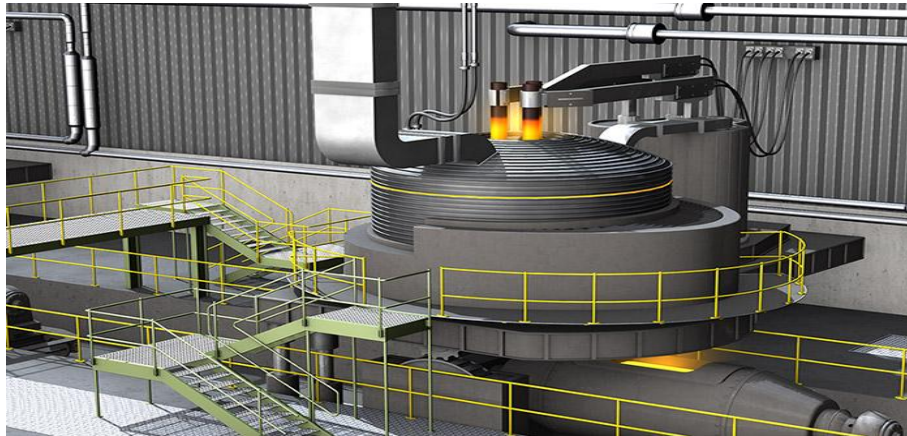


Figure I-1: Four à arc électrique.

### **I.3. Composition et principe de fonctionnement du four électrique :**

#### **I.3.1. Constituants du four électrique :**

Les principaux éléments constitutifs du four électrique sont :

- ✓ L'alimentation électrique.
- ✓ L'enceinte du four capable de contenir d'abord des ferrailles fondre, de densité relativement faible 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. Du point de vue constitution, ce four peut être représenté par le schéma de la figure suivante :

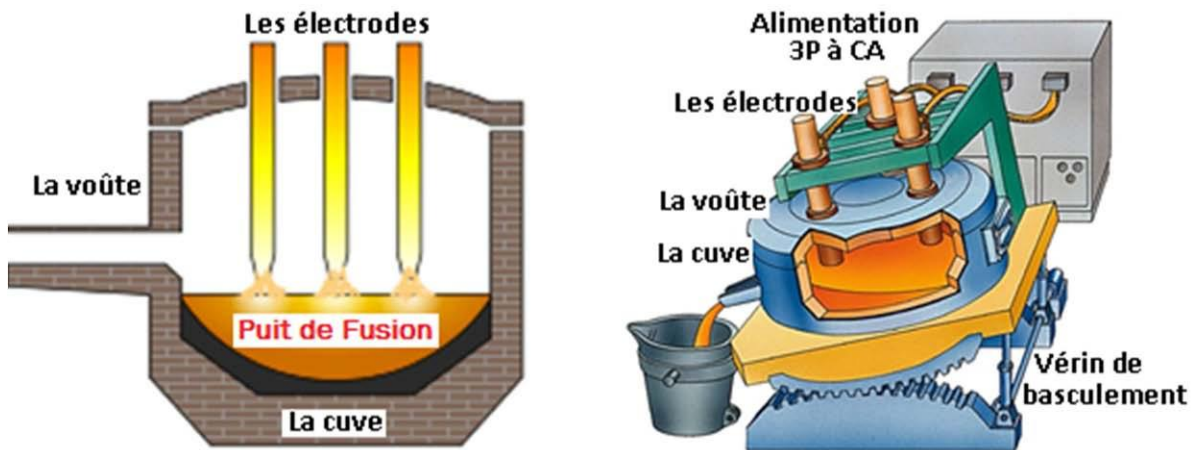


Figure I-2 : Vue de coupe et extérieure d'un four à courant alternatif. [3]

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

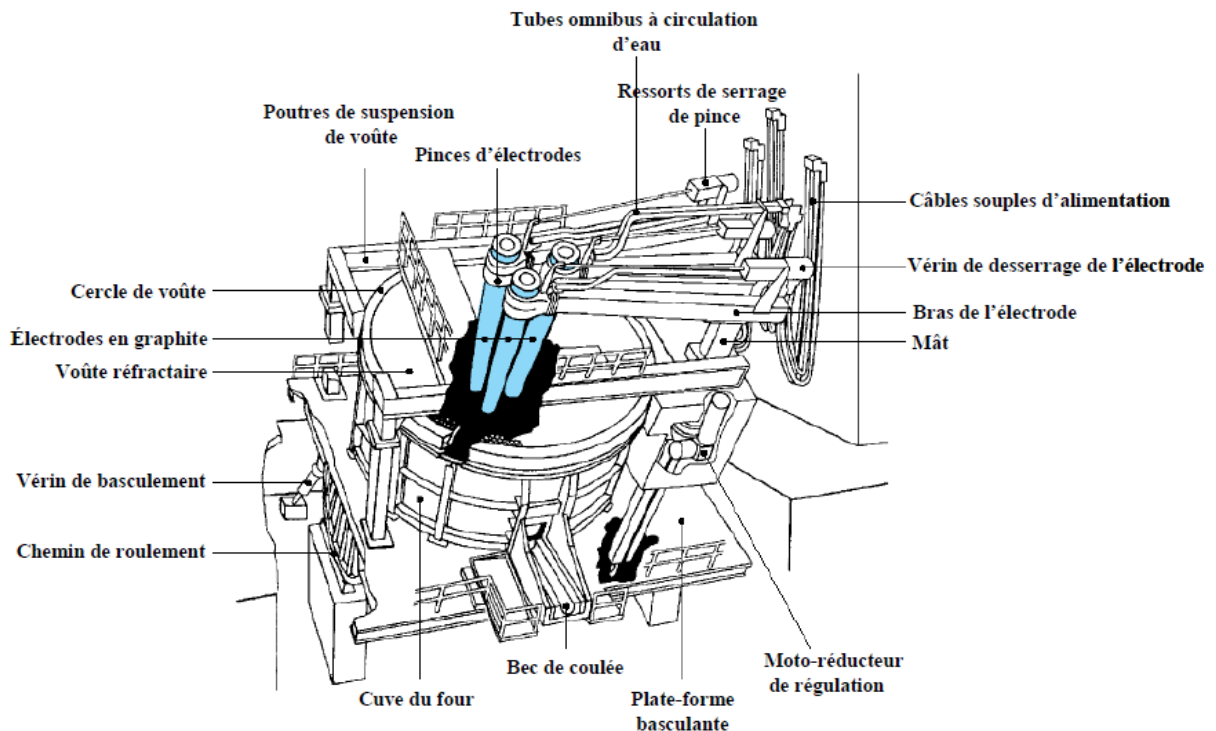


Figure I-3 : Vue extérieure d'un four à courant alternatif [1]

Comme s'est illustrée sur la figure précédente, le four à arc se compose des éléments suivants : La cuve (a), le berceau de basculement (b), la voûte. (c) et les électrodes (d)

#### **a) La cuve du four à arc**

La cuve est composée de deux parties : le fond ou « sole » et la virole. Sur de nombreux fours, cette virole est amovible et il existe une virole de rechange. De cette manière, on gagne un temps précieux, le four pouvant continuer à être utilisé pendant la réfection du garnissage réfractaire.

#### **b) Le berceau de basculement**

Le basculement est assuré par des vérins hydrauliques, le déplacement aux deux seules positions  
En avant, pour une vidange totale, En arrière, pour opérer le décrassage.

#### **c) La voûte**

La voûte, ou couvercle du four, 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.

#### **d) Les électrodes**

Les électrodes sont constituées d'une pâte de carbone avec un traitement de graphitisation. Elles s'usent au cours de la fusion. Cette fusion d'électrodes est due à deux types d'usure :

- L'usure de pointe est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la durée de fonctionnement.
- L'usure latérale : cette usure est due à l'oxydation du graphite porté au rouge et est proportionnelle au temps de cycle de fusion. [1]

### I.3.2 Fonctionnement du 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. [3]

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. Un courant traverse à une intensité « $I$ » importante.
2. La décharge par arc exige un minimum de tension et un maximum de courant. La tension est dépend du type de gaz et la distance entre les électrodes, quand on écarte les électrodes, la tension de l'arc s'accroît.

### I.3.3. Point de vue électrique

L'énergie électrique est la principale source d'énergie utilisée par le four à arc pour la fusion de l'acier.

Lorsqu'un arc est amorcé et entretenu entre l'électrode et une pièce métallique reliées aux bornes d'un générateur, avec une tension ( $U_2$ ) et un courant ( $I_2$ ) d'arc. Ces deux grandeurs sont reliées par une relation de nombreuses variables comme la distance des électrodes, [ $U_2 = f(I_2, l, \dots)$ ] montré par des courbes appelé caractéristiques d'arc (figure I-4). Les normes AFNOR pour des caractéristiques conventionnelles de la forme :  $U_2 = A + B I_2$  [3]



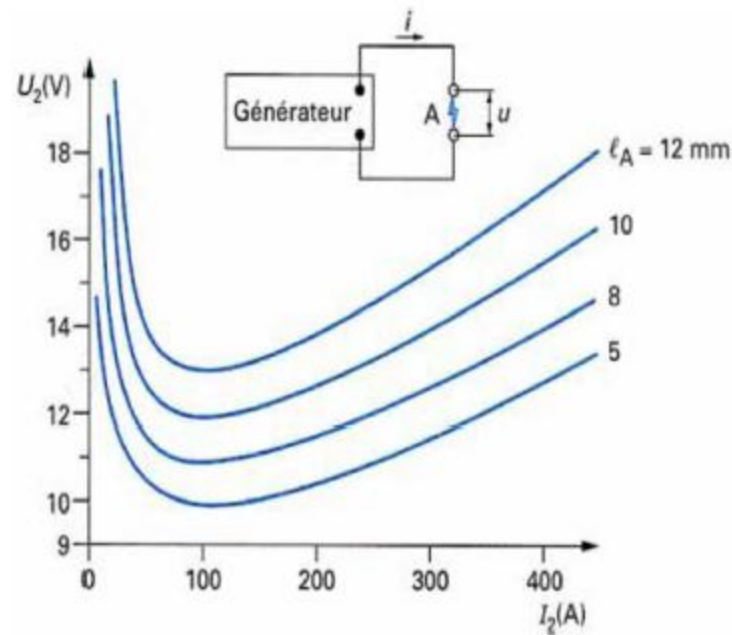


Figure I-4 : Caractéristiques d'arc  $U_2 = f(I_2)$  pour différentes longueurs d'arc  $l_A$ . [3]

### I.3.4. Point de vue thermique

L'objectif est de faire fondre une charge d'un métal, puis par l'affinée, afin de modifier sa composition par l'élimination ou l'addition des éléments. La coulée du métal en poche et, éventuellement, la réparation du revêtement réfractaire avant le chargement pour l'opération suivante.

#### I.3.4.1 Chargement

Le chargement doit être réalisé rapidement pour limiter le refroidissement du creuset, la durée du chargement ne demandant que quelques minutes. La durée du chargement varie de 35 mn pour une tonne. [5]

##### a) Phase de forage (amorçage)

Les électrodes creusent un puits au milieu de la cuve du four à arc qui est remplie de ferrailles. C'est sous puissance réduite qu'a lieu cette séquence de fonctionnement. Le puits ainsi créé, permet de limiter le rayonnement de l'arc sur les parois du four et donc de minimiser l'usure du matériau

réfractaire. Cette phase dure environ 2 minutes. Cette période est caractérisée par des déclenchements des courts-circuits.

#### **I.3.4.2 Fusion**

Après avoir chargé le four, les trois électrodes sont mises sous tension et descendues sur la ferraille.

Les arcs se provoquent entre l'extrémité des trois électrodes et la charge.

Le métal fond sous l'effet 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.

La quantité de bain augmente et noie à peu près complètement à un moment donné, les ferrailles non fondues. Les électrodes remontent car 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.

#### **I.3.4.3 Affinage**

Le métal est complètement fondu, le métallurgiste modifie sa composition par des additions de « *Fe-Mn* », « *Fe-Si* » ou autres éléments.

L'affinage est caractérisé par un arc continu. 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.

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).

La quantité de chaleur emmagasinée est maximale généralement au milieu de l'affinage. [2]

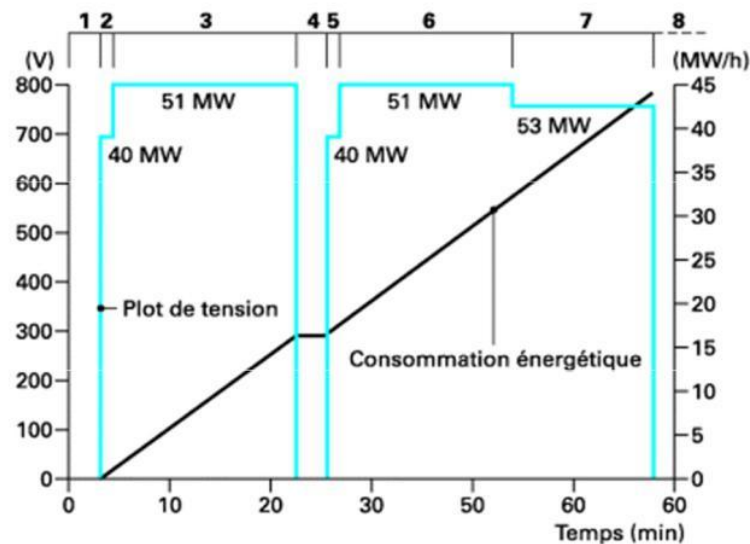


Figure I-5: Diagramme de fusion d'un four à arc. [3]

La figure I-7 représente le diagramme de fusion d'un four à arc en précisant la tension, la puissance et le temps.

Nous avons alors respectivement : Chargement 1er panier (1), Amorçage (2), Fusion (3), Chargement 2<sup>ème</sup> panier (4), Amorçage (5), Fusion (6), Affinage (7), Coulée (8).

### I.3.5 Propriétés de l'arc de soudage

Un arc de soudage est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant lumière et chaleur. Il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques. L'arc électrique est la source de chaleur à la base d'un certain nombre de procédés de soudage s'appuyant sur :

- Ses effets thermiques aux électrodes, un arc court entre une électrode, formant l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion.
- Les phénomènes de transfert de métal, de l'électrode lorsqu'elle est fusible. L'électrode se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique. [4]

### a) Courant d'arc

Pour une longueur d'arc donnée  $l$ , on augmente le courant en agissant sur la force électromotrice du générateur. La tension aux bornes de l'arc s'accroît, la température et le volume ionisé augmentent en même temps (Figure I-5). Donc en agissant sur le courant que régulation la puissance de l'arc en soudage. [4]

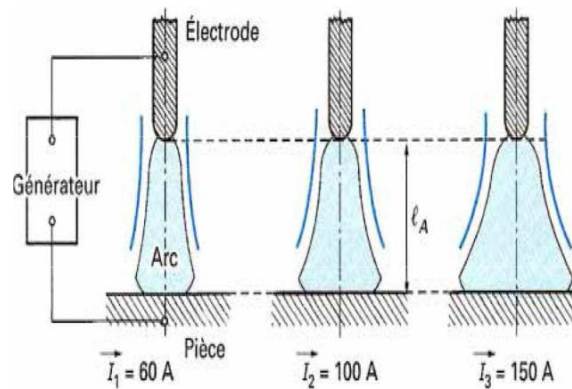


Figure I-6: Effet du courant sur l'arc. [3]

### b) Tension d'arc

La tension qui apparaît aux électrodes résulte de la distance qui les sépare et du courant qui le traverse, ainsi que le gaz du milieu. Il existe trois chutes de potentiel (Figure I-7):

Chute anodique, cathodique et chute dans la colonne ionisée.

Les deux premières sont liées aux phénomènes électroniques prenant place à la surface des électrodes.

La chute de tension de la colonne ionisée s'étend donc pratiquement d'une électrode à l'autre et donne lieu à un gradient électrique uniforme. Si la longueur d'arc augmente, la tension augmente également de façon proportionnelle. La mesure de la tension d'arc donne par suite une information sur la longueur d'arc. [4,3]

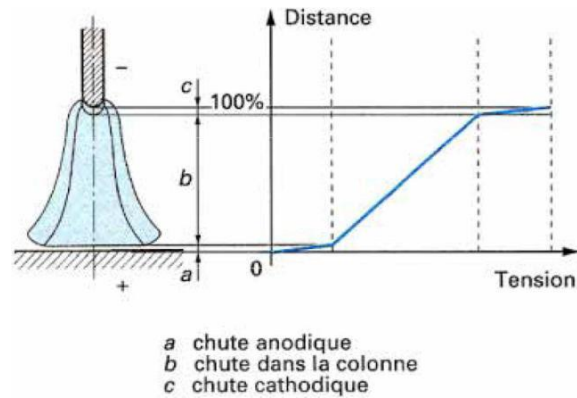


Figure I-7: Répartition du potentiel de la décharge d'arc. [3]

## I.4. Classification des fours à arc

### I.4.1. Four alimenté en courant alternatif

Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé. Il contient trois électrodes verticales en graphite. Les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal. Sa tension d'arc diminue quand le courant augmente ; un arc pour aurait une caractéristique hyperbolique. En fait, le système possède toujours une impédance non linéaire. [9]

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.

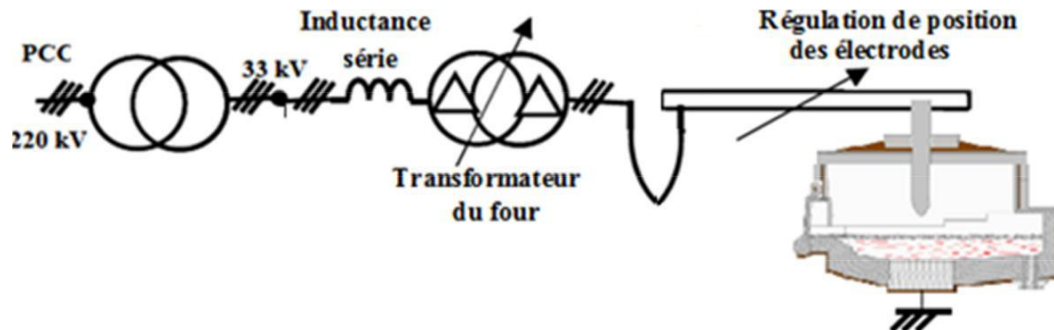


Figure I-8 : Alimentation de four à arc à courant alternatif. [2]

#### I.4.1.1. Description de la partie électrique

Étant donné 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-8)

### I.4.2. 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, équipé la grande majorité des fours à courant continu. [10]

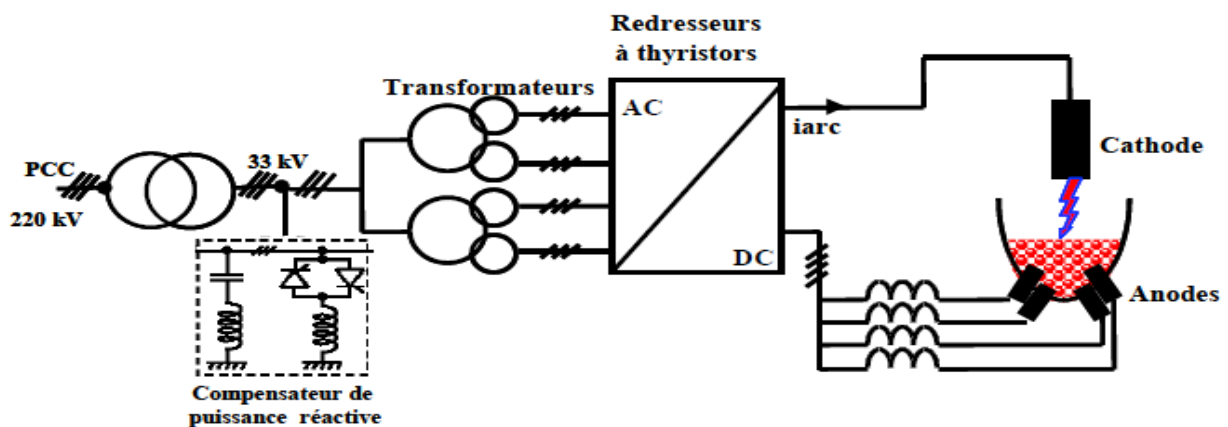


Figure I-9 : Alimentation de four à arc à courant continu. [1]

#### I.4.2.1. Description de la partie électrique

L'architecture d'alimentation électrique contient un 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. [11,12]

### **I.5. Avantages du four à arc**

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.
- Températures élevées.
- Souplesse de conduite.
- Maîtrise indépendante de l'intensité et de la tension.
- Taille modulable.
- Grande rapidité de fusion.

Les fours à arc électrique sont utilisés pour produire une matière première de luxe avec une production lourde. Cette production résulte de l'amélioration des données économiques liées aux progrès techniques et aux fluctuations du marché. [13]



## **I.6. CONCLUSION**

Nous avons rappelé l'essentiel concernant les principaux procédés à décharge. Par conséquent et compte tenu de leurs non linéarité produite par l'arc électrique dans les fours à arc électrique, génèrent plusieurs perturbations et une pollution de la qualité d'énergie fournie au client comme les harmoniques et effet flicker produisant des effets indésirables sur les installations et les équipements utilisés du réseau électrique

# **Chapitre II**

## *Modélisation d'un four à arc à courant alternatif*

---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons un modèle mathématique de la conductivité des fours à arc électrique en fonction du temps. Un four d'arc électrique triphasé peut être modélisé par une impédance variable et instable, pour la description du phénomène d'arc électrique de nature non-linéaire variable en fonction du temps. [15]

La nature des fours à arc électrique cause des problèmes de qualité d'énergie électrique ; tels que les déséquilibres des amplitudes, effet flicker, les harmoniques dans le réseau électrique. [16]

## II.2. Modélisation d'un four à arc à courant alternatif

Au cours des années, beaucoup de modèles de four à arc électrique soit en fonction du temps ou la fréquence. Ils ont été développés suivant les besoins et leur application. Le modèle combiné de Cassie/Mayr est le plus utilisé et appliqué pour l'analyse d'interaction d'arc électrique. Ce modèle de four à arc prend en compte l'interaction entre le réseau d'alimentation et le four. [16]

### II.2.1. Modèle d'arc de Cassie-Mayr

Plusieurs études prouvent que les phénomènes d'arc-plasma sont très complexes en raison de la caractéristique non linéaire de l'arc et de la nature du processus de fusion. Il existe de nombreux facteurs qui rentrent en jeux :

- Le type de gaz
- Pression de gaz
- Distance de séparation d'électrode
- Matière d'électrode
- Géométrie et position des électrodes.

Les modèles d'équations de Cassie et de Mayr, sont basés sur les lois de la conservation électriques, la loi d'ohm et les hypothèses simplificatrices, et le bilan de puissance perdu et stockée, la puissance utile de l'arc. Afin de comprendre les phénomènes d'amorçage ou l'extinction d'arc à travers la combinaison des deux modèles de Cassie et de Mayr à une forme générale du modèle d'arc électrique d'un four. [17]

Les équations de ces modèles proviennent de l'étude du bilan énergétique de la décharge :

- ✓ Le modèle de CASSIE considère la densité de courant dans la décharge comme constante (sur toute sa section).
- ✓ Le modèle de MAYR considère que la puissance est perdue en périphérie de l'arc.

### II.2.2. Les équations du modèle

Le principe est basé sur le bilan énergétique et thermique entre la production de la chaleur de l'arc et les pertes dans le four électrique. [18]

La puissance d'arc est la suivante :

$$P(t) = v(t) \cdot i(t) = P_{per} + \frac{dQ}{dt} \quad [\text{II-1}]$$

où  $P(t)$  : la puissance d'entrée du four ou la puissance fournie,  $v$  : est la tension d'arc,  $i$  : est le courant de l'électrode,  $P_{per}$  est la puissance dissipée d'arc (est la puissance de perdu ou d'atténuation thermique), et  $Q$  est la quantité de chaleur de l'énergie stockée.

$dQ/dt$  : est la variation (le changement) de la quantité en chaleur  $Q$  en fonction du temps [19].

Si nous supposons que la conductivité d'arc  $G$ , elle dépend de la chaleur  $Q$  d'énergie stockée dans l'arc à un certain temps  $t$  :

$$G(t) = Fct[Q(t)] = \frac{i(t)}{v(t)} = \frac{1}{R(t)} \quad [\text{II-2}]$$

la conductance de l'arc est donnée par l'équation (II-3) :

$$G(Q) = \frac{i}{v} \quad [\text{II-3}]$$

D'après les équations (II-1) et (II-2) on obtient la relation entre la conductance d'arc et  $Q$  :

$$G = G(Q) = G\left(\int (P - P_{per}) dt\right) \quad [\text{II-4}]$$

Nous calculons la dérivé de la conductivité à partir de l'équation (II-4) par rapport au temps,  $dG(t)/dt$  et puis nous remplaçons cette dernière dans l'équation (II-1), ceci donne :

$$\frac{dG}{dt} = \frac{dG(Q)}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{dG(Q)}{dt} (P - P_{per}) \quad [\text{II -5}]$$

### II.2.3. Le modèle de M. Cassie

M. Cassie en 1939, suppose un canal d'arc cylindrique avec un gaz ionisé, la section de la zone d'arc croit qui diminue la chaleur et causera une dissipation et des pertes de puissance. le diamètre du canal de l'arc change quand le courant change. En conséquence la perte de chaleur est alors proportionnelle au rayon d'arc figure II-1. [20]

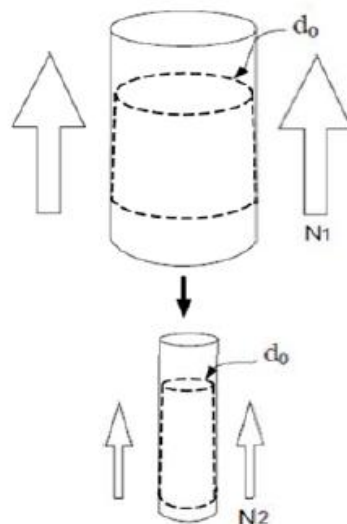


Figure II-1: Colonne de l'arc électrique selon Cassie. [3]

Cela pour une densité de courant constante : «  $d_0$  » une perte de chaleur constante par unité superficielle de l'arc. Pour une forte intensité, nous supposons que la densité de courant est constante, avec la perte  $N1$  ou  $N2$  est proportionnelle à la section de l'arc.

Les équations (II -6) , (II -7) et (II-8) montrent les valeurs ,  $Q, P_{per}$  .

$$G = G_0 A \quad [\text{II -6}]$$

$$Q = Q_0 A \quad [\text{II -7}]$$

$$P_{per} = P_0 A \quad [\text{II-8}]$$

$G_0$ ,  $Q_0$  et  $P_0$  sont des constantes de la conductivité, l'énergie et la puissance, dispersées respectivement en fonction d'unité de volume,  $A$  : superficie de la surface cylindrique de l'arc. Cependant, on définit la puissance dissipée et la puissance d'entrée dans (II-9) et (II-10) respectivement, où  $V_0$  est la tension initiale de l'arc dans l'état stable. [21]

$$P_{per} = G_0 V_0^2 \quad [\text{II-9}]$$

$$P_{in} = G V^2 \quad [\text{II-10}]$$

A partir de (II-6) et (II-7) on obtient :

$$G = G_0 \frac{Q}{Q_0} \quad [\text{II-11}]$$

La dérivation de l'équation (II-11) donne :

$$\frac{dG}{dQ} = \frac{G_0}{Q_0} \quad [\text{II-12}]$$

A partir de (II-7) et (II-8) on obtient :

$$P_{per} = P_0 \frac{Q}{Q_0} \quad [\text{II-13}]$$

On remplaçant les équations (II-12) et (II-13) dedans (II-4) :

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0} (P_{in} - P_0 \frac{Q}{Q_0}) \quad [\text{II-14}]$$

Puis on remplace (II-9) et (II-10) dans l'équation (II-14) :

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0} (G V^2 - G_0 V_0^2 \frac{Q}{Q_0}) \quad [\text{II-15}]$$

Après on remplace (II-9) et (II-11) dans l'équation (II-15) on obtient :

$$\frac{dG}{dt} = \frac{P_0}{V_0^2 Q_0} (G V^2 - G V_0^2) \quad [\text{II-16}]$$

Avec :

$$\Theta = \frac{Q_0}{P_0} \quad [\text{II-17}]$$

$\Theta$  est la constante de temps de recombinaison de charge d'arc électrique de Cassie.

En multipliant les deux côtés de l'équation avec  $\frac{1}{G}$ , D'après l'équation (II-16) on obtient :

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{V^2}{V_0^2} - 1 \right) \quad [\text{II-18}]$$

L'équation de Cassie basée sur le courant d'arc qui est obtenu par l'injection de l'équation (II-3) dedans (II-18), peut être écrite comme suit:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{i^2}{G^2 V_0^2} - 1 \right) \quad [\text{II-19}]$$

L'expression finale obtenue et que la tension est constante  $V_0^2 = E_0^2 = \text{constante}$ , où l'indice "c" représente le modèle de Cassie :

$E_0$  : tension d'arc aux bornes de la décharge (à courant constant)

$$\frac{dG_c}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{i \cdot v}{E_0^2} - G_c \right) \quad [\text{II-20}]$$

Le modèle de Cassie est applicable à la simulation du comportement de l'arc, aux courants relativement élevés (de l'ordre de 100 A-100KA) et que la température du plasma l'arc est très élevée (dans l'ordre de 8000 K ou plus). Ce modèle a un inconvénient parce que le modèle d'arc ne pourrait pas être interrompu. Il décrit le comportement de l'arc quand le courant est grand. [20]

#### II.2.4. Le modèle de O. May

Mayr en 1943, a décrit l'arc dans la zone près du zéro, avec une température plus petite, et les pertes de puissance sont provoquées par la conduction thermique. [20]

Ceci signifie que la conductivité est fortement dépendante de la température. Dans le modèle de Mayr, on suppose que la perte de la chaleur se produit dans le périphérique d'arc seulement, et la conductivité d'arc change avec l'énergie stockée. [17]

Mayr a supposé que le canal de l'arc a une forme cylindrique, pour le même diamètre du cylindre la température est variable (Figure II-2).

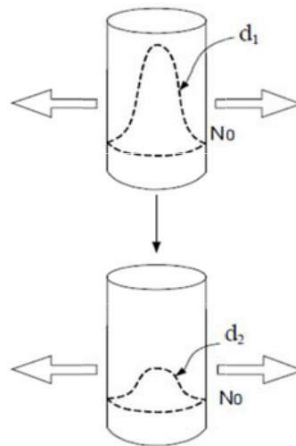


Figure II-2: Colonne de l'arc selon Mayr. [3]

$N_0$ : La constante de la puissance perdue de Mayr.

Pour la capacité de chaleur spécifique constante,  $Q = \text{const} \cdot T$ , où  $T$  est la température,  $\sigma$  La conductivité électrique, peut être exprimée par  $\sigma = \text{const} e^T$ .

$$\ln \frac{x^2}{1-x^2} \cdot Pr = -\frac{U}{aT} + b \cdot \ln(T) - C$$

Avec ;

$X$  : degré d'ionisation de ce gaz

$Pr$  : pression totale

$U$  : la chaleur de la dissociation de ce gaz

$T$  : température absolue en Kelvin

$a, b, c$  : ce sont des constantes.

Il se suit cela :

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot Pr = \frac{e^{-\frac{U}{aT}} T^b}{C} \quad [\text{II-22}]$$

Après plusieurs conditions et simplifications, pour un mélange des gaz ionisés, ceci mène à :

$$G(Q) = K \cdot e^{\frac{Q}{Q_0}} \quad [\text{II-23}]$$



Avec  $K$  et le  $Q_0$  étant des constantes. L'équation de conservation d'énergie peut être écrite comme suite :

$$v \cdot i = P_{per} + \frac{dQ}{dt} \quad [\text{II-24}]$$

Par la combinaison de l'équation (II-24) avec l'équation (II-5) le variation de la conductivité d'arc devient :

$$\frac{dG_m}{dt} = \frac{G}{Q_0} (vi - P_{per}) \quad [\text{II-25}]$$

Encore Mayr a supposé que la relation entre le courant et la tension est constante, et que  $P_{per} =$  constante  $= P_0$ .

$P_0$  : Puissance dissipée dans la décharge (à courant constant). À partir de l'équation (II-3) et par la division par la conductivité on obtient l'équation suivante de Mayr :

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{P_0}{Q_0} \left( \frac{P}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{P}{P_0} - 1 \right) \quad [\text{II-26}]$$

$\Theta = \frac{Q_0}{P_0}$  : est la constante du temps de recombinaison en raison de changement de la température sans puissance fournie dans l'arc ou par un autre terme la constante de temps de recombinaison de charge. L'index  $m$  signifié la conductance de Mayr. [19]

L'expression finale de Mayr est la suivante :

$$\frac{dG_m}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{i^2}{P_0} - G_m \right) \quad [\text{II-27}]$$

Le modèle de Mayr donne de parfaits résultats, il est meilleur pour des courants près de zéro (petits). Cette équation permet à l'arc de s'interrompre puisque  $G$  est petite, et le rapport

$i^2/P_0$  peut encore être moins que l'unité, la conductivité continue à diminuer jusqu'à ce que l'arc soit éteint. Par conséquent, nous avons proposé d'employer  $G$  la conductivité d'arc comme variable au lieu de  $R$ , car ces modèles sont habituellement exprimés en conductance plutôt que résistance d'arc en raison des valeurs extrêmement basses pour la résistance d'arc. [17] L'équation originale de Cassie peut être transformée est donnée par :

$$G_c = \frac{vi}{E_0^2} - \Theta \frac{dG_c}{dt} \quad [\text{II-28}]$$

Et l'équation original de Mayr transformée à :

$$G_m = \frac{i^2}{P_0} - \frac{dG_m}{dt} \quad [\text{II-29}]$$

La combinaison des deux équations (II-28) et (II-29) dans un seul modèle simple développé par Wang et Vilathgamuwa en « 1997 », est employée pour représenter les caractéristiques de la conductivité d'arc et pour définir la transition du courant  $I_0$  et qu'un arc puisse être simulé par cette combinaison. [17]

Tel que la conductivité d'arc est donné par :

$$G = \frac{vi}{E_0^2} - \frac{dG}{dt} \quad \text{si} \quad i > I_0 \quad [\text{II-30}]$$

$$G = \frac{i^2}{P_0} - \frac{dG}{dt} \quad \text{si} \quad i < I_0$$

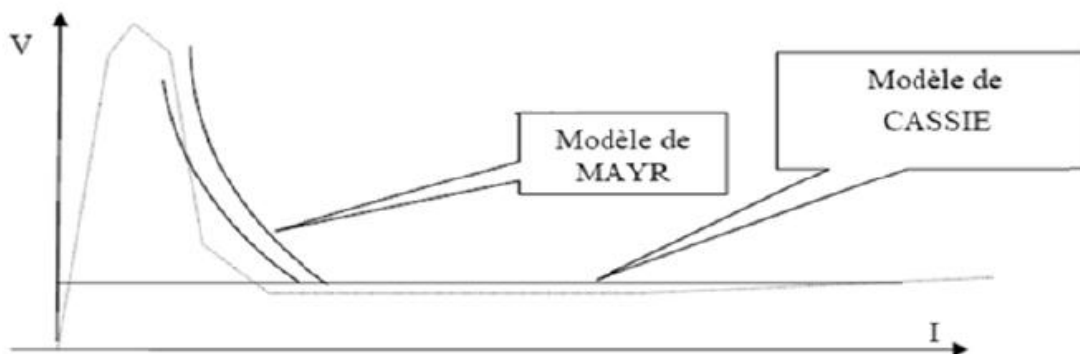


Figure II-3: Caractéristique statique des modèles proposés de la décharge. [3]

D'après le système d'équation (II-30), il y a deux catégories : les sources de tension, indépendante du courant de décharge (modèle de CASSIE), et les sources de puissance (modèle de MAYR est pour des courants plus faibles) Figure II-3. Ceci mène à un manque d'une dérivée défini au point de transition entre les deux équations. [23]

### II.2.5. La combinaison du modèle d'arc de Cassie Mayr

Pour créer une transition douce entre les deux modèles, on fait appel à un facteur de transition  $\delta(i)$  il est en fonction du courant d'arc, la combinaison de la conductivité finale d'arc est donnée par:

$$G = (1 - \delta(i)G_c) + \delta(i)G_m \quad [\text{II-31}]$$

D'où  $G_c, G_m$  sont des conductances donnés par  $u(t) = \text{Re}(\bar{U} e^{j\omega t})$  et de

$u(t) = \text{Re}(\sum_{k=0}^{nh} \bar{U}_k e^{kj\omega t})$  respective ment. Le facteur de transition varie entre le zéro et l'unité :

$$\delta = \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \quad [\text{II-32}]$$

$I_0$  : est le courant de transition.

Quand le courant d'arc  $i$  est plus petit que  $I_0$ , la valeur de  $\delta(i)$  est près de l'unité, et  $G$  est égale à la conductibilité  $G_m$  le modèle de Mayr qui domine.

Le modèle de Cassie dominera quand le courant d'arc  $i$  est plus grand que  $I_0$ , et  $\delta(i)$  devient négligeable, et donc,  $G$  est dominé par  $G_c$  la conductance de Cassie.

$G_{min}$ , valeur minimale dépend de plusieurs facteurs : la distance entre les électrodes, la géométrie des électrodes et le type du gaz et de la température. [17]

### II.2.6. Le modèle général combiné de la conductivité d'arc de Cassie-Mayr

Le modèle complet combiné de Cassie-Mayr pour un arc électrique est donné par l'équation suivante :

$$G = G_{min} + \left(1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{vi}{E_0^2} + \left(\exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{i^2}{P_0} - \frac{dG}{dt} \quad [\text{II-33}]$$

### II.3. Le modèle proposé

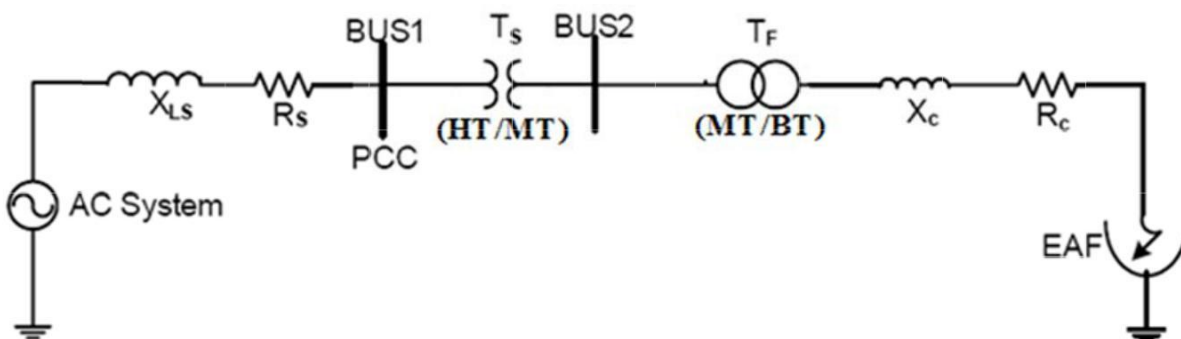


Figure II-4 : Modèle monophasé pour un four lié à la source d'alimentation. [24]

La figure II-4 représente un schéma fonctionnel constitué de :

- Une source d'alimentation.
- Point de couplage commun PCC.
- Un transformateur TS (HT /MT)
- Un transformateur (M T/BT).
- Des câbles flexibles relient chaque phase de transformateur aux électrodes.
- Des bras portant les électrodes, pour commander la position et ajuster la longueur de l'arc.

### II.3.1. Source d'alimentation

L'alimentation d'énergie électrique à haute tension  $e_a, e_b, e_c$  : sont des tensions de phase de la source d'alimentation peuvent être exprimées par :

$$\begin{cases} e_a(t) = U_M \sin \omega t \\ e_b = U_M \sin(\omega t - 120) \\ e_c = U_M \sin(\omega t + 120) \end{cases} \quad [\text{II-42}]$$

$U_M$  : est la valeur maximale des tensions, et  $\omega$  est la fréquence angulaire du système, et  $t$  est le temps. Le réseau peut être simplifié dans un circuit équivalent simple (Voir la figure II-5).

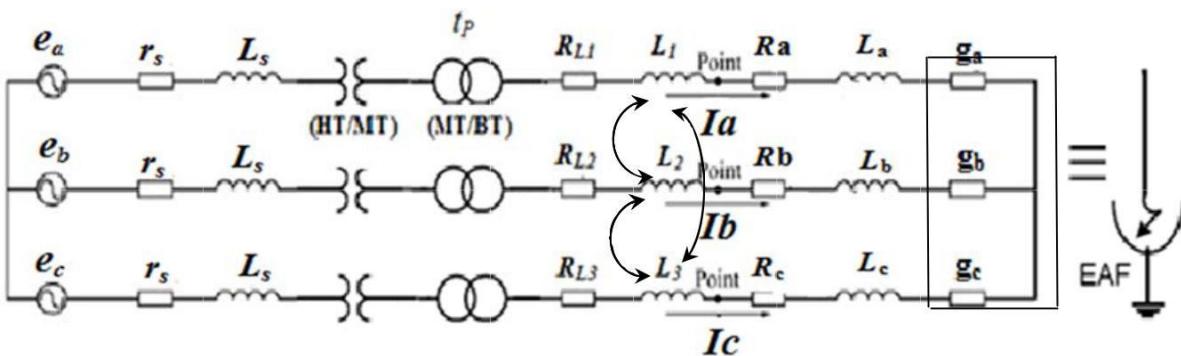


Figure II-5 : Le modèle triphasé détaillé d'un réseau qui alimente un four à arc. [24]

### II.3.2. Les différents paramètres du réseau électrique

Les câbles flexibles qui relient le transformateur du four avec les électrodes du four à arc électrique, sont équivalents à la résistance  $R_{Lj}$  et à l'inductance  $L_j$  de système.

$$L_1 = L_2 = L_3 = L$$

[II-38]

$$R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R_L$$

-le transformateur de four est considéré comme transformateur idéal avec le rapport  $t_p$ , et déphasage est négligé.

-les inductances mutuelles ont les mêmes effets entre les phases, parce que la distance est équilatérale entre les câbles flexibles employés dans le modèle du four. On suppose que :

$M_{ij}$  sont les inductances mutuelles entre phases  $i$  et  $j$ .

$$M_{12} = M_{21} \text{ et } M_{13} = M_{31} \text{ et } M_{23} = M_{32} \quad \text{[II-39]}$$

$r_s, L_s$  : sont la résistance et l'inductance du côté source .

$I_j$  ( $j = a, b, c$ ) est le courant instantané d'électrode dans chaque phase.

$R_j$  ( $j = a, b, c$ ) et  $L_j$  ( $j = a, b, c$ ) sont les résistances et les inductances des électrodes dans chaque phase.

$g_j$  ( $j = a, b, c$ ) est la conductivité instantanée d'arc dans chaque phase.

et  $M_{j,jl}$  ( $j, jl = a, b, c$  et  $j \neq jl$ ) est l'inductance mutuelle dans la phase  $j$ . [25]

La conductivité d'arc dans chaque phase donnée par le modèle combiné de Cassie-Mayr est sous la forme suivante :

$$\begin{cases} g_1 = g_{min} + \left(1 - \exp\left(-\frac{if_1^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{if_1^2}{g_1 E_1^2} + \left(\exp\left(-\frac{if_1^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{if_1^2}{P_0} - \frac{d}{dt} g_1 \\ g_2 = g_{min} + \left(1 - \exp\left(-\frac{if_2^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{if_2^2}{g_2 E_2^2} + \left(\exp\left(-\frac{if_2^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{if_2^2}{P_0} - \frac{d}{dt} g_2 \\ g_3 = g_{min} + \left(1 - \exp\left(-\frac{if_3^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{if_3^2}{g_3 E_3^2} + \left(\exp\left(-\frac{if_3^2}{I_0^2}\right)\right) \frac{if_3^2}{P_0} - \frac{d}{dt} g_3 \end{cases} \quad \text{[II-40]}$$

La constante du temps d'arc pour les trois phases a, b, c est la suivante :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \tau_0 \exp(-\alpha |if_1|) \\ \tau = \tau_0 + \tau_0 \exp(-\alpha |if_2|) \\ \tau = \tau_0 + \tau_0 \exp(-\alpha |if_3|) \end{cases} \quad \text{[II-41]}$$

**II.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons vu le modèle mathématique de Cassei / Mayr de la conductivité pour un four à arc électrique triphasé. Nous avons donné le modèle monophasé et triphasé d'un réseau électrique qui contient un four à arc électrique afin de le simuler dans le chapitre suivant avec le logiciel Matlab Simulink.

# **Chapitre III**

## *Simulation d'un four à arc électrique*

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler un four à arc électrique triphasé à courant alternatif dans un réseau électrique. Afin de voir les caractéristiques dynamiques du four tel que les tensions les courants et la conductivité, ainsi que les différentes perturbations générées et la pollution du réseau par des harmoniques, pour les trois phases forage fusion affinage.

### III.2. Simulation du four à arc électrique

Le modèle mathématique de la conductivité du chapitre II a été simulé dans le logiciel de MATLAB /SIMULINK/ Sim Power System présenté dans la figure III-1.

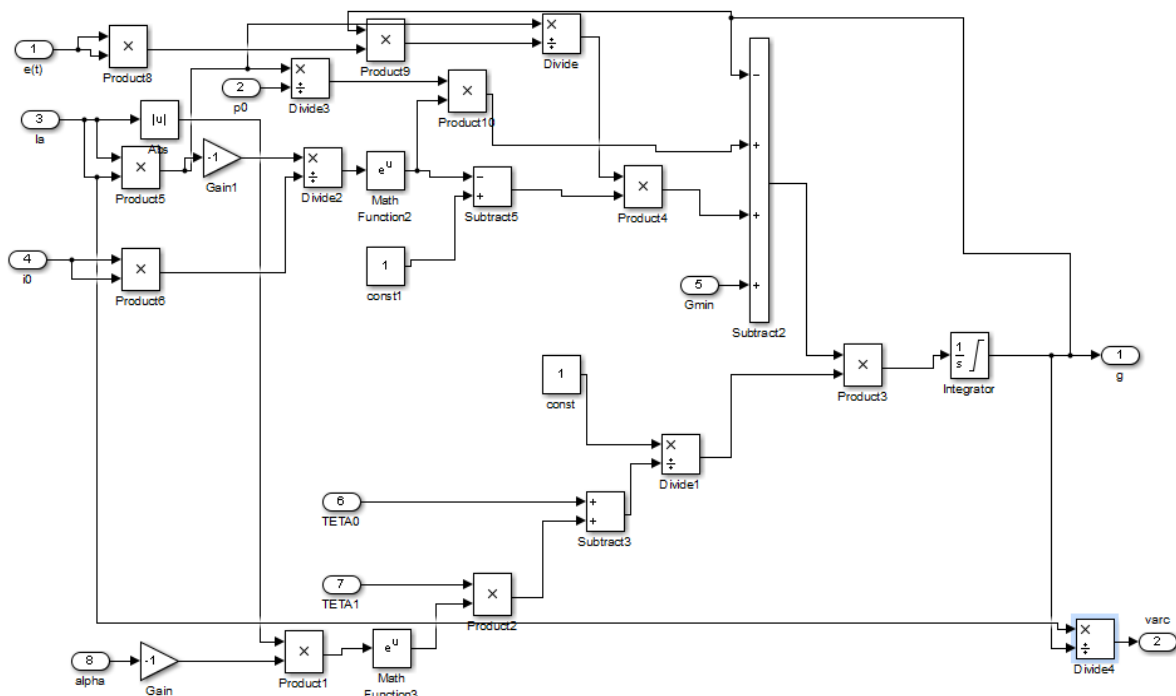


Figure III-1 : Le modèle de la conductivité d'une seule phase d'un four à arc électrique.



Déclaration des variables d'entrée de l'équation (II- 33), Après voir masqué l'ensemble dans un sous-système :

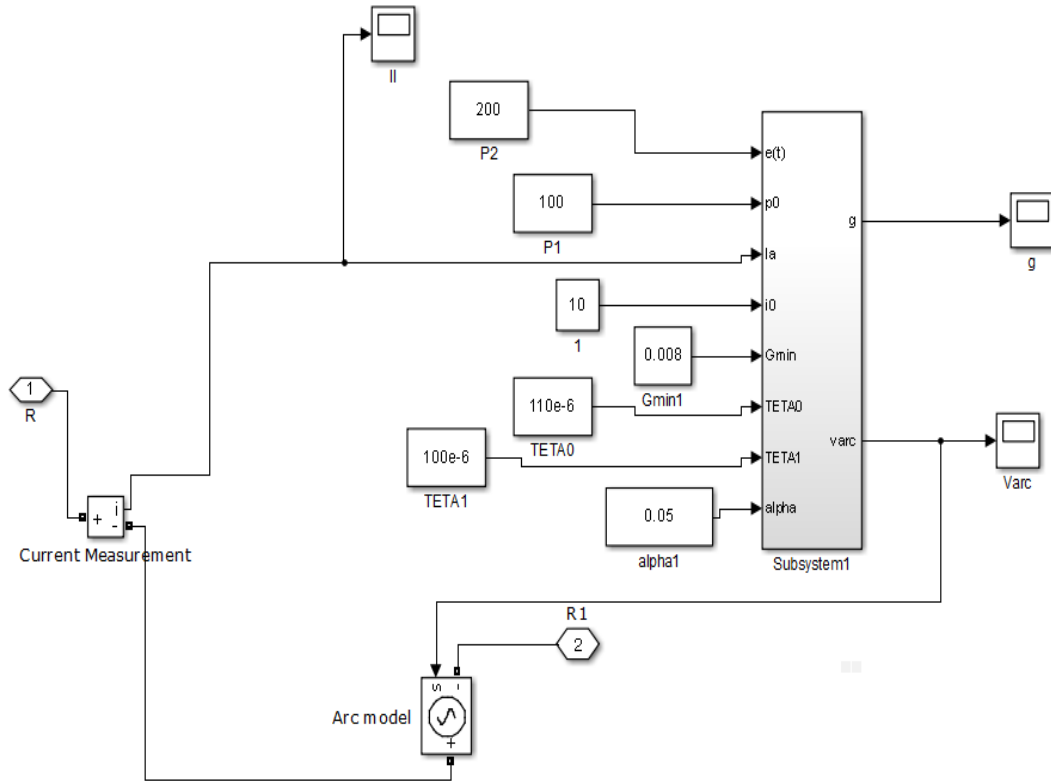


Figure III-2: Déclaration des variables d'entrée de la conductivité d'arc électrique

Déclaration des paramètres caractéristiques du four et les éléments du réseau électrique sont spécifiées respectivement dans le tableau suivant :

Nom d'élément	paramètre de l'équipement
Source triphasé	$V_{\text{phase-phase}} = 138000 * 1.06V$ , $f=50\text{Hz}$ , $R_S = 0.1\text{m}\Omega$ , $L_S=1\text{Mh}$ , $V_{SC}=1000\text{MVA}$ , $\frac{x}{r} = 2.5\text{PU}$
HT/MT transformateur	$P_n=250\text{MVA}$ , $V_n = \frac{138}{60}\text{KV}$ , $R_{HT}=0.002\text{PU}$ , $L_{HT}=0.04\text{PU}$ , $R_{MT}=0.002\text{PU}$ , $L_{MT}=0.04\text{PU}$ , $Y\Delta_1$
MT/BT transformateur	$P_n=100\text{MVA}$ , $V_n = \frac{60}{0.430}\text{KV}$ , $R_{MT}=0.002\text{PU}$ , $L_{MT}=0.04$ $\text{PU}$ , $R_{BT}=0.002\text{PU}$ , $L_{BT}=0.04\text{PU}$ , $Y\Delta_{11}$
Les résistances et les inductances des câbles qui relient les électrodes au secondaire du transformateur du four	$R_{L1}=0.0004\Omega$ , $R_{L2}=0.0004\Omega$ , $R_{L3}=0.0004\Omega$ $L_1=15.97\text{mH}$ , $L_2=15.97\text{mH}$ , $L_3=15.97\text{mH}$ , $M_{12}=4.58\text{mH}$ , $M_{13}=3.89\text{mH}$ , $M_{23}=4.58\text{mH}$
la résistance et l'inductance propre et mutuelle des électrodes de four	$R_a=R_b=R_c=0.0004\Omega$ $L_a=L_b=L_c=1.579e^{-5}\text{H}$ $L_M=0.45e^{-5}\text{H}$
Paramètre du four	$P_0=100\text{W}$ , $I_0=10\text{A}$ , $\theta_0 = 100e^{-6}$ , $\alpha = 0.05$ , $E_0=200\text{V}$ $g_{\min}=0.008\text{ Simens}$

Tableau III.1 : paramètres caractéristiques d'équipement. [26]

La représentation de l'ensemble du réseau complet simulé est donnée dans la figure III-3.

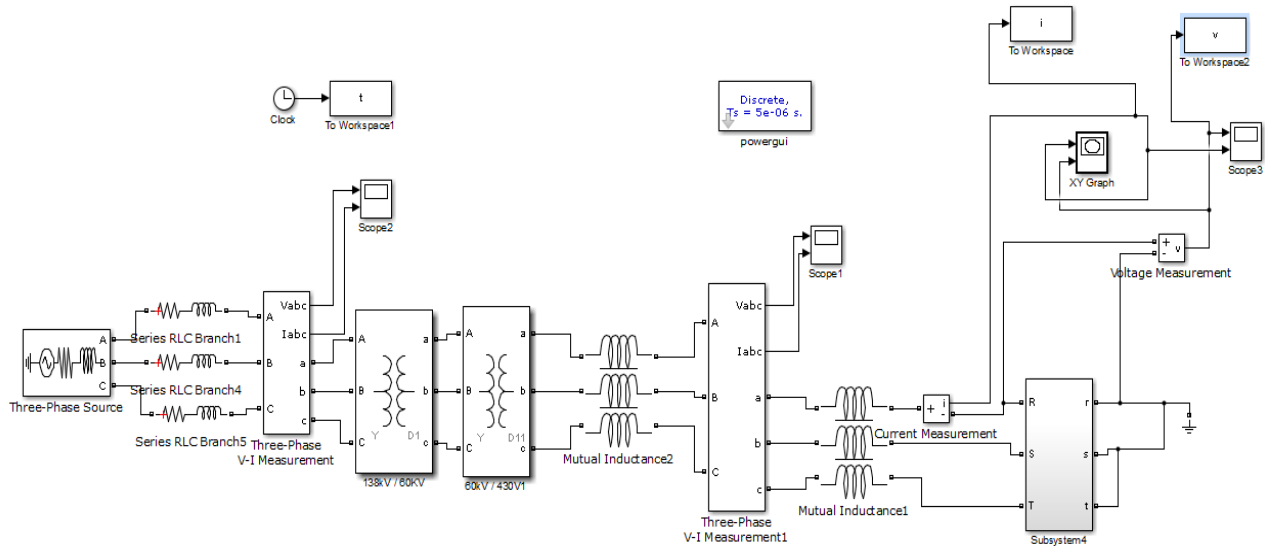


Figure III-3: Le modèle général de la Simulation d'un four dans un réseau électrique.

### III.3. Résultats de simulation

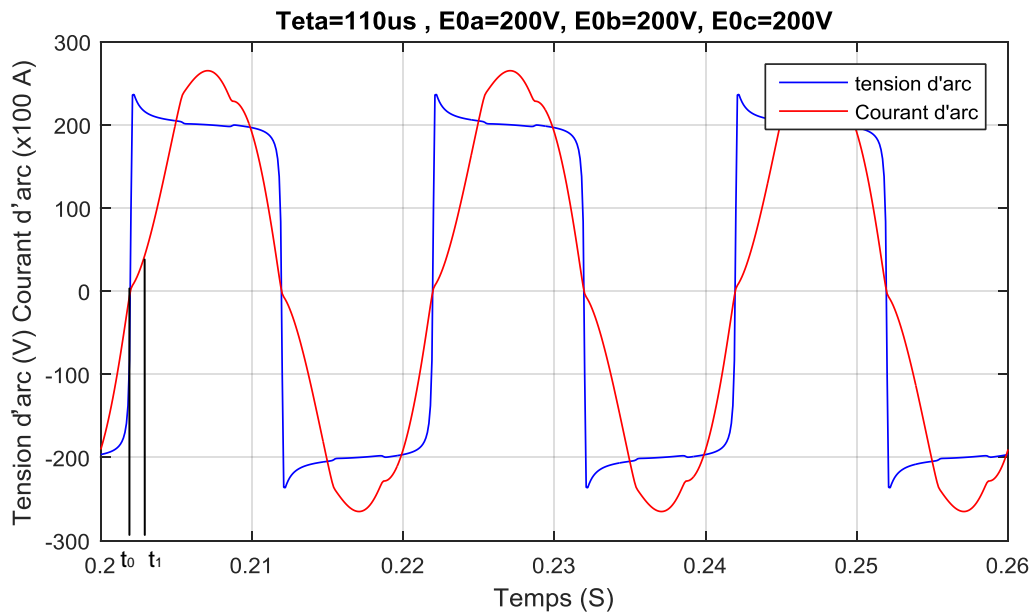
#### III.3.1.1. Perturbations du four à arc électrique

Le fonctionnement d'un four à arc, lors des phases de forage et en début de fusion, il se caractérise par des fortes variations d'amplitude de la tension d'arc donne un déséquilibre, pouvant aller du court-circuit jusqu'à l'extinction d'arc. Ces fluctuations de la tension d'arc sont les plus importantes, dans la phase fusion. La ferraille perturbe les tensions d'arc par ses mouvements et par son hétérogénéité physique.

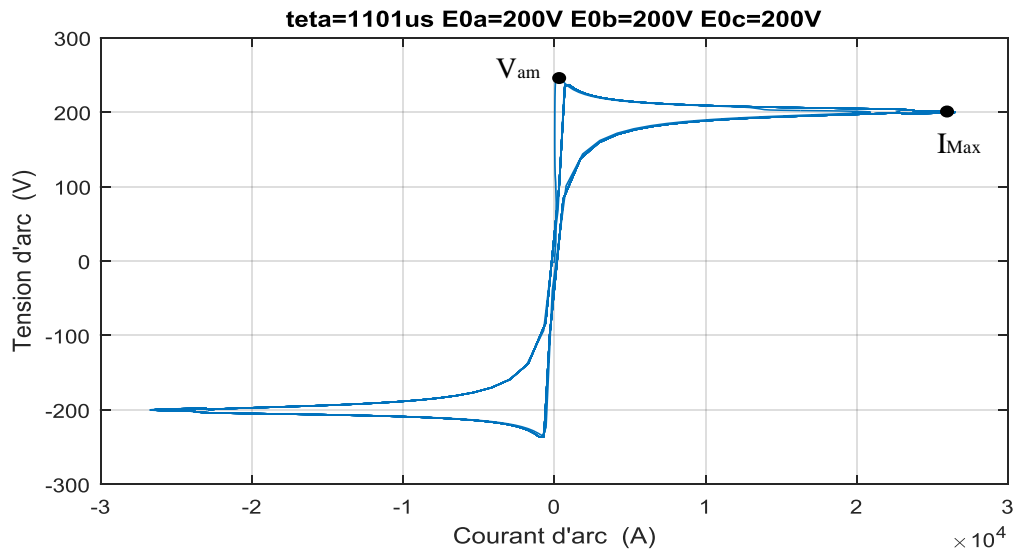
La figure III-4: présente une extinction d'arc de brève durée. La tension d'alimentation à l'instant  $t_0$  est inférieure à la tension  $V_{am}$ , jusqu'à l'instant  $t_1$  à partir duquel l'arc se réamorçe.

$V_{am}$  : la tension de réamorçage de la décharge.

Au passage par zéro du courant l'arc s'éteint ( $i_{arc} = 0$ ), le courant d'arc reste nul il se réamorçe lorsque la valeur de la tension dépasse la tension  $V_{am}$ , dans ce cas, nous supposons que l'arc se réamorçe lorsque la tension d'alimentation dépasse la tension d'amorçage



(a) : Formes d'ondes de tension et courant « extinction d'arc de brève durée »



(b) : La caractéristique de tension/courant dynamiques électrique vue dans la phase A.

Figure III-4: Phénomène d'extinction et de réamorçage de l'arc

**a) Extinction d'arc**

Les nombreuses interruptions de fonctionnement, présentées en début de la phase de forage, sont essentiellement dues aux chutes des morceaux de ferraille qui commencent à fondre. A cause de l'accroissement de la distance ferraille-électrode, la chute d'un morceau de ferraille fait augmenter

la longueur de l'arc. Si la tension d'arc dépasse la tension maximale que peut délivrer l'alimentation, l'arc s'éteint. Ces phénomènes sont accompagnés de l'annulation du courant sur le réseau. Voir la figure III-5

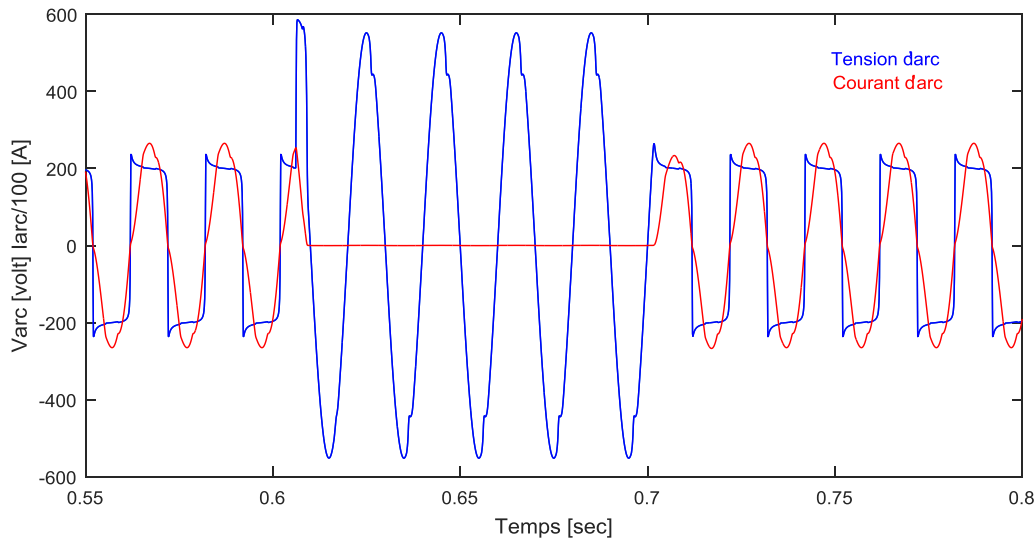


Figure III-5: Extinction d'arc.

### b) Court-circuit

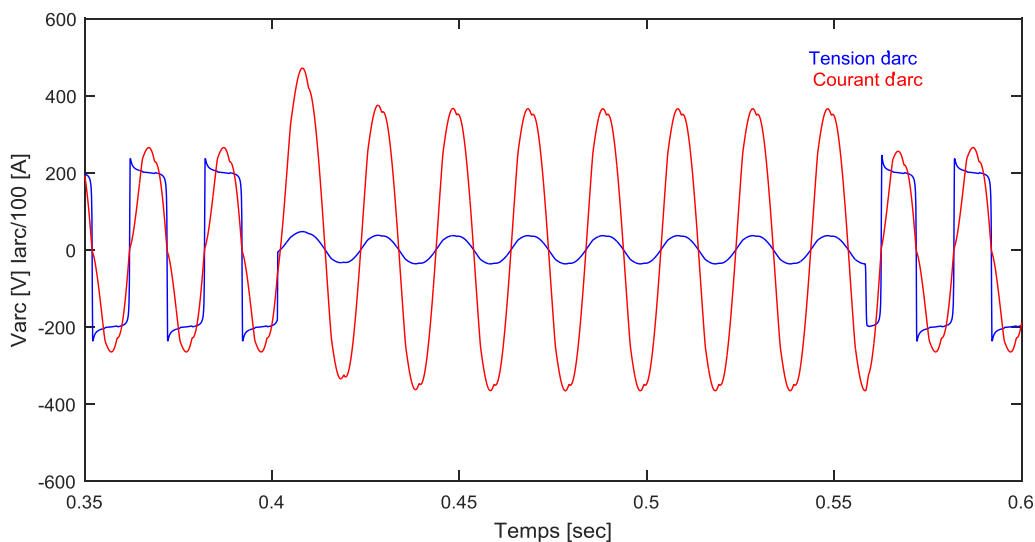


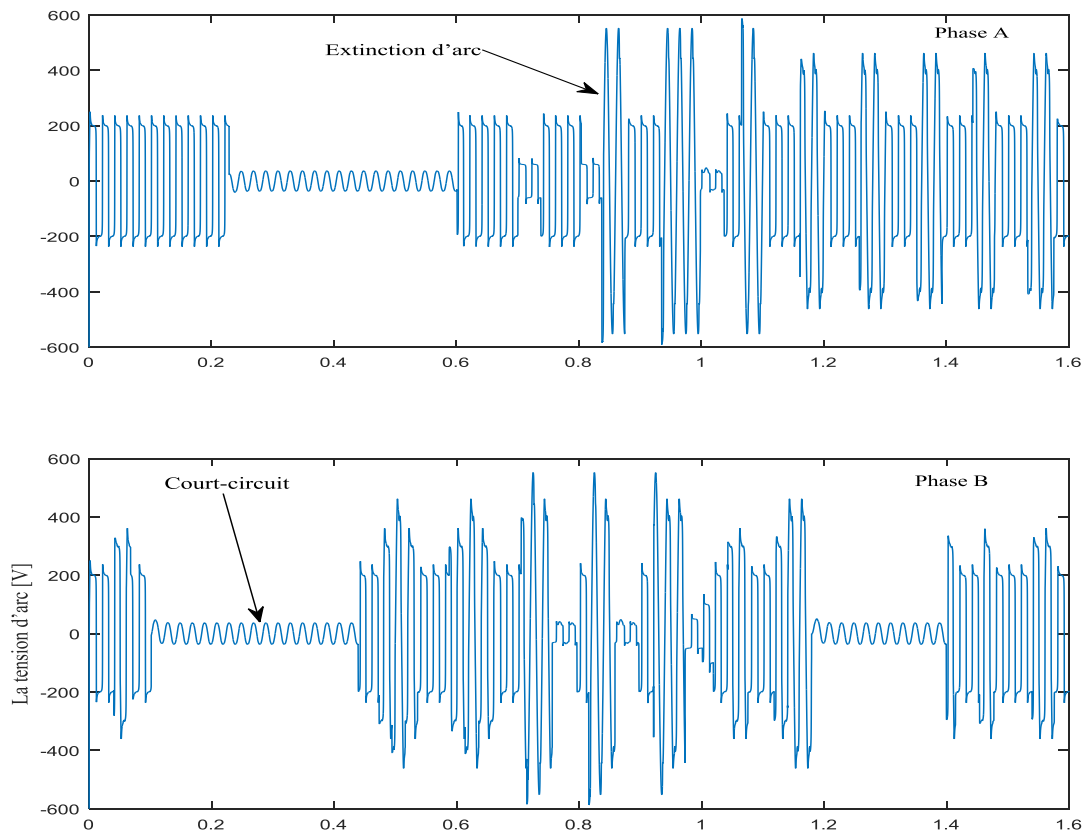
Figure III-6: Court-circuit électrode- ferraille.

La chute de morceaux de ferraille à l'intérieur du four peut aussi entraîner une mise en court-circuit électrode-ferraille (court-circuit sur une phase) ou inter-électrodes (court-circuit sur plusieurs phases) (Voyez la figure III-6).

### c) Déséquilibre des tensions d'arc et des courants de ligne

L'étude des formes d'ondes instantanée, présentée dans les paragraphes précédents, a mis en évidence que le régime de fonctionnement d'un four à arc est dans la plupart des cas déséquilibré. D'après la figure (III-7) des tensions d'arc dans les trois phases nous remarquons le déséquilibre des amplitudes à des intervalles de temps différents, à cause des perturbations produites dans le four.

L'analyse des résultats de simulation d'une charge non équilibrée d'un four sera expliquée par le déséquilibre de phases. Les résultats de simulation prouvent que les trois courants de phase de la charge deviennent non équilibrés. La structure des trois phases explique l'aspect de qualité de puissance : tension et situation non équilibrée.



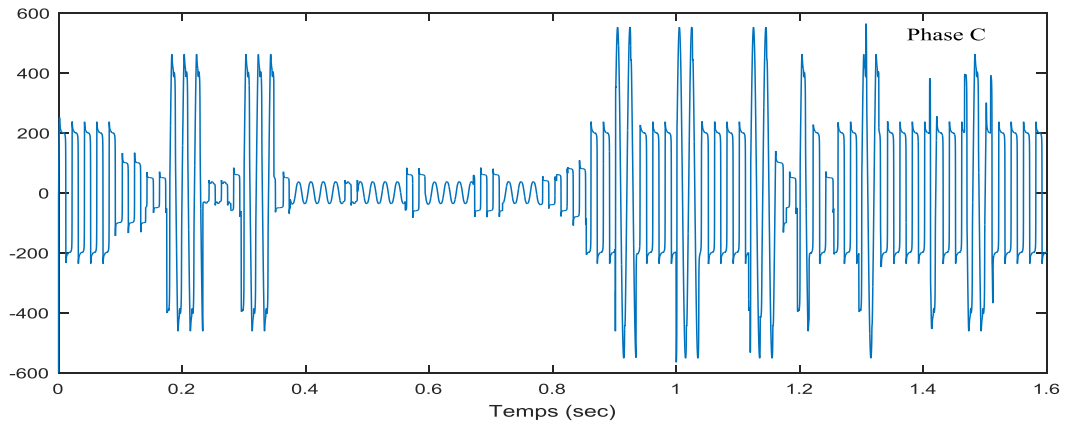
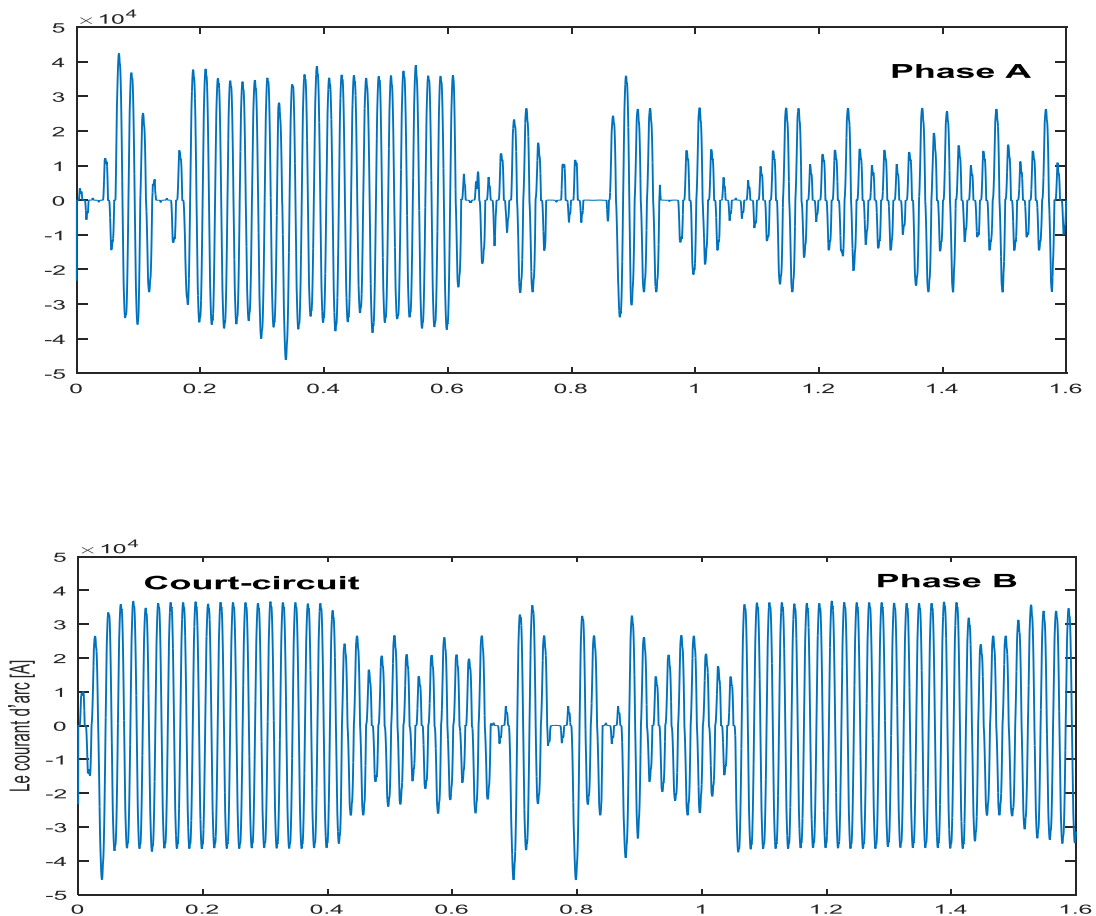


Figure III-7: Formes d'ondes instantanées de la tension d'arc déséquilibrée des trois phases.



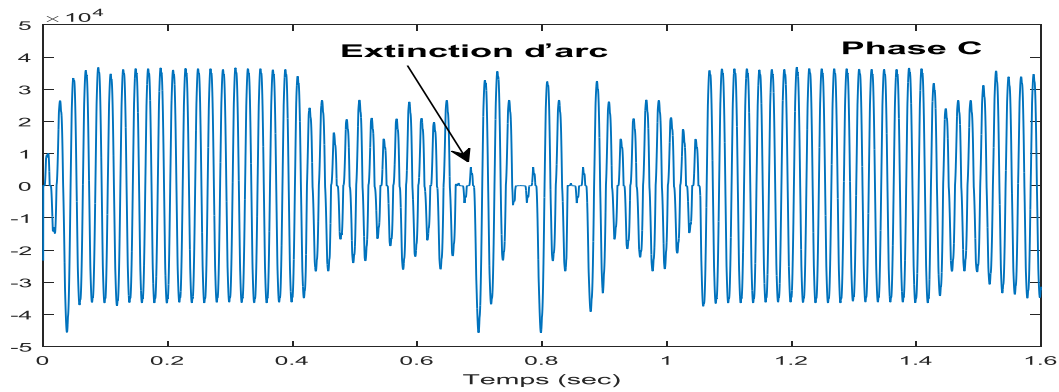


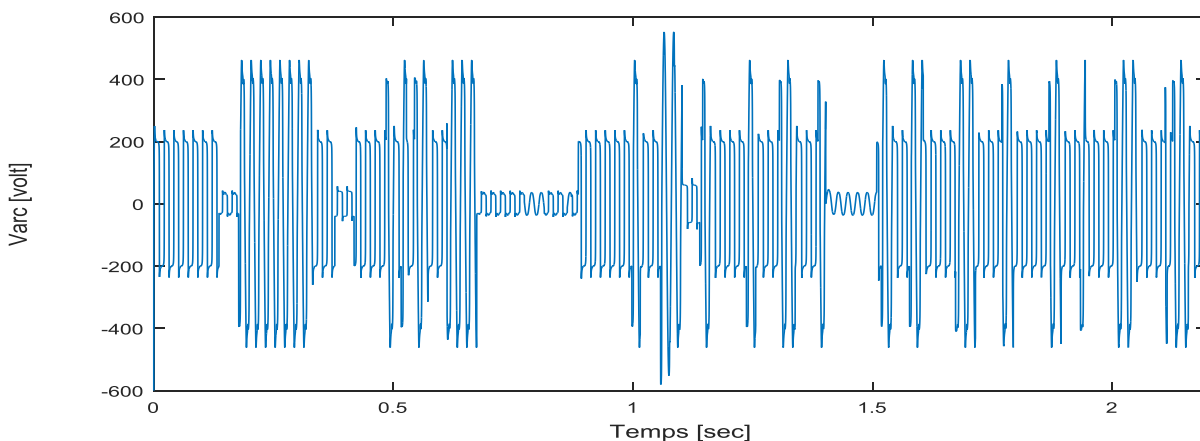
Figure III-8: *Formes d'ondes instantanées du courant d'arc déséquilibré des phases (A,B,C).*

Le régime de fonctionnement déséquilibré du four, entraîne des variations de puissance active et réactive sur le réseau. Ces variations limitent le transfert d'énergie électrique entre l'alimentation et le four provoquant des fluctuations de la valeur efficace de la tension et du courant.

### III.3.1.2. Présentation des tensions et des courants d'arc pendant le cycle de fusion

#### a) la phase forage

Le cycle forage est caractérisé par des problèmes : des interruptions et les court circuits déséquilibrés du four est le plus important. Cela affecte la stabilité de l'arc voir la Figure III-9 cette figure montre la tension et le courant d'arc pendant la phase forage.





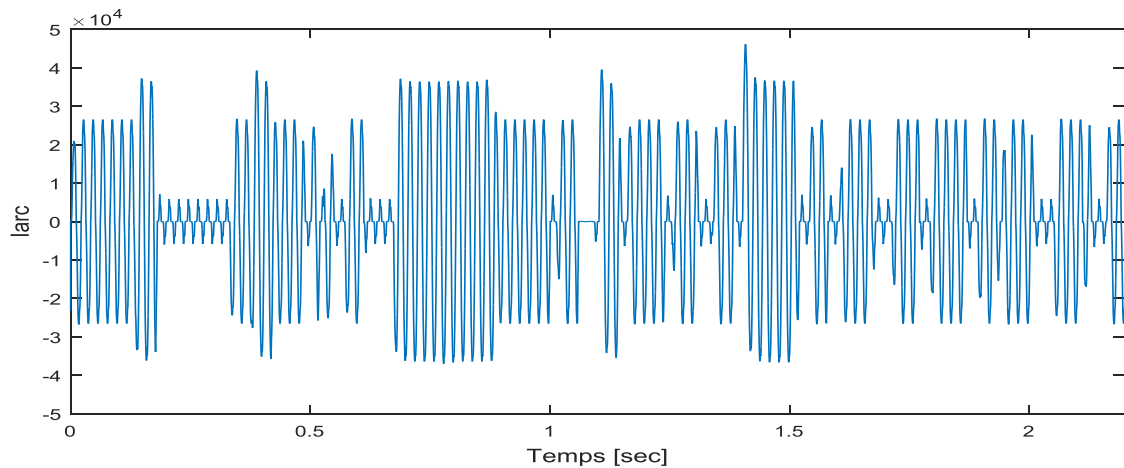
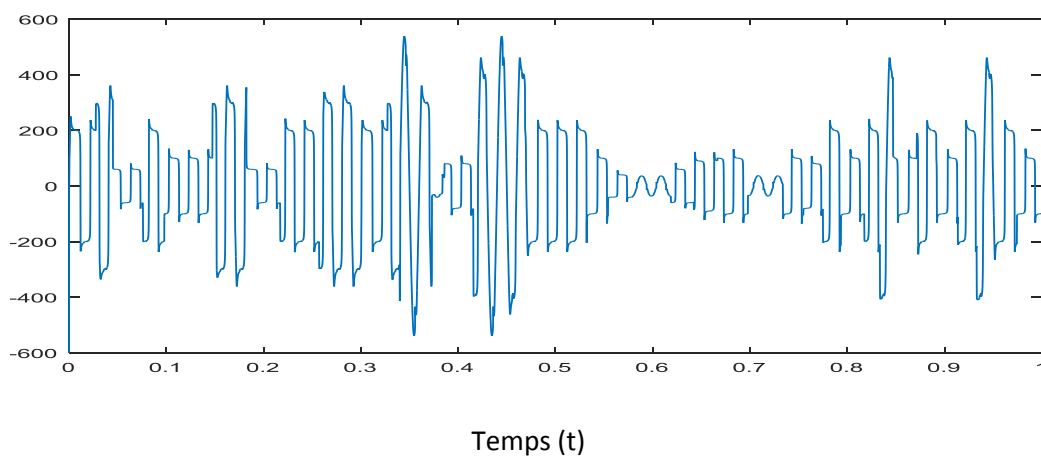


Figure III-9: Valeurs instantanées de la tension et du courant pendant la phase de forage.

### b) la phase fusion

Pendant cette phase les caractéristiques du four varient aléatoirement dans les trois phases qui peuvent expliquer la nature de la charge qui est fortement non équilibrée. La tension d'arc  $E_{1,2,3}$  est aléatoire. Pour différentes phases peuvent être écrites par :

$$\begin{cases} E_1 = E_{01}(1 + m_1 N_1(t)) \\ E_2 = E_{02}(1 + m_2 N_2(t)) \\ E_3 = E_{03}(1 + m_3 N_3(t)) \end{cases} \quad \text{[III-1]}$$



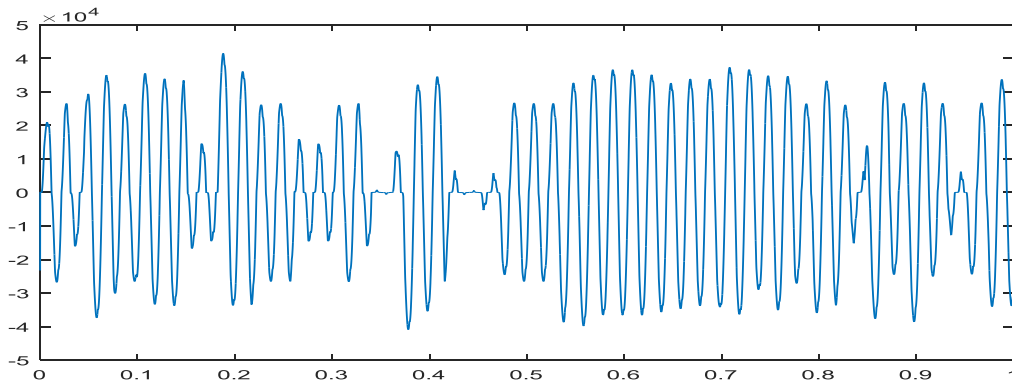


Figure III-10: la tension et le courant d'arc dans une phase A pendant la phase de fusion.

D'après la figure III-10 nous remarquons une forme d'onde aléatoire, leurs variation est indéfinie qui explique l'instabilité de cette phase début de fusion due à plusieurs perturbations est essentiellement causée par le mouvement de la ferraille mais aussi par les vibrations des potences porte-électrodes excitée par des effets électromagnétiques. Cette perturbation provoque des variations d'amplitude de la tension d'arc et entr aînent un déséquilibre des courants absorbés.

L'effet de clignotement ou l'effet flicker a une forme répétitive en fonction du temps dans les différentes phases donné par la formule suivante:

( $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ ) sont assignées à des valeurs variables dans le temps.

$$\begin{cases} E_1 = E_{01}(1 + m_1 \sin \omega ft) \\ E_2 = E_{02}(1 + m_2 \sin \omega ft) \\ E_3 = E_{03}(1 + m_3 \sin \omega ft) \end{cases} \quad \text{[III-2]}$$

D'où :

$$m_k = \frac{E_k(L)}{E_k(L_0)} = \frac{A+BL}{A+BL_0} \quad \text{[III-3]}$$

$m_k$  : dépend de la constante de longueur d'arc .

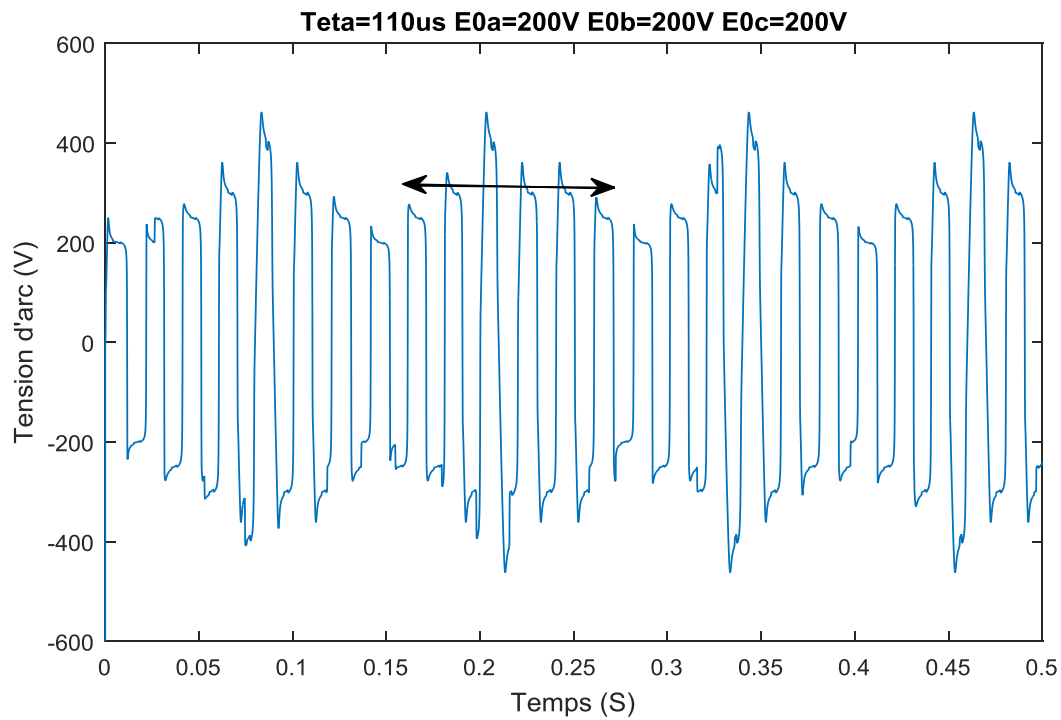


Figure III-11: La tension d'arc dans une phase avec du clignotement de 10Hz pendant la phase fusion.

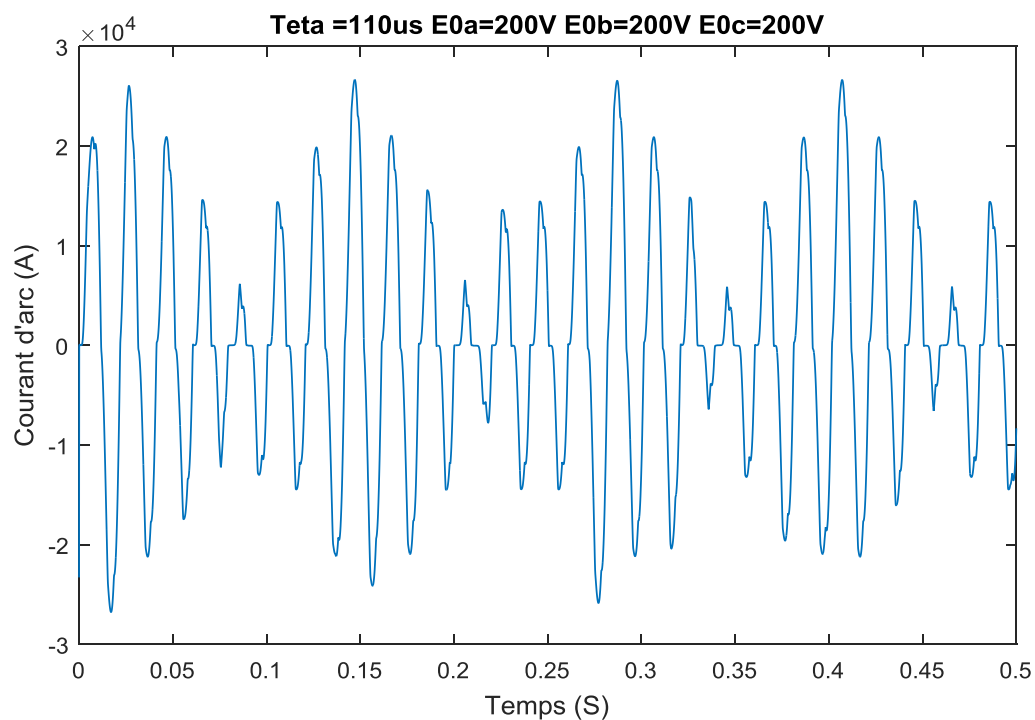


Figure III-12: Le courant d'arc dans une phase avec du clignotement de 10Hz pendant la phase fusion.

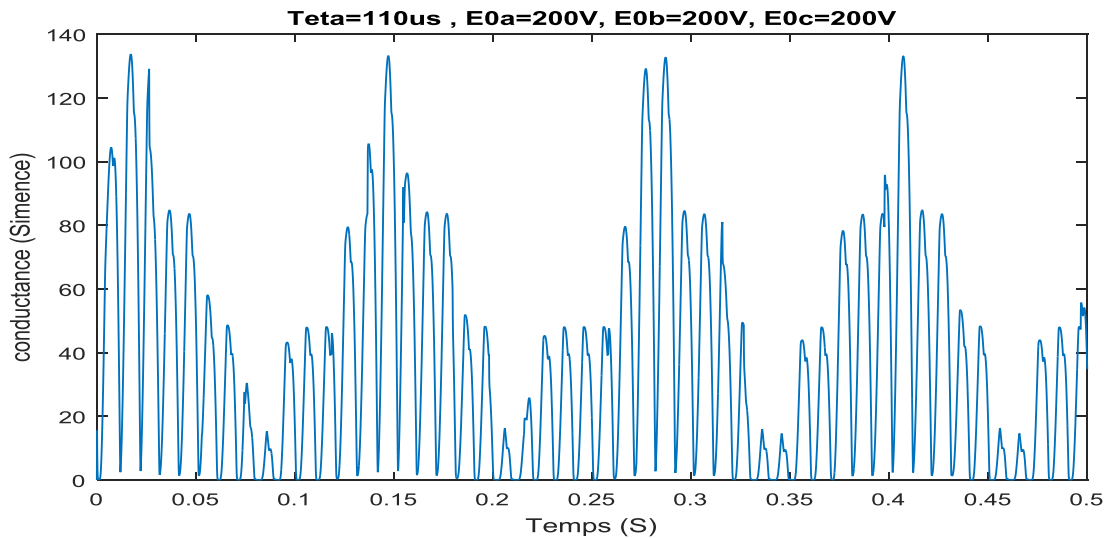


Figure III-13: La conductivité pendant la phase fusion.

Des variations rapides de tension, répétitives, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée par des fours à arc. Le fonctionnement d'un four à arc par des fortes variations d'amplitude de la tension d'arc qui font affecter l'allure du courant et le déformer encore dans la phase fusion ( figure III-11 et III-12)

L'allure de la forme d'onde de la conductivité montre l'effet flicker qui affecte la tension et le courant (figure III-13)

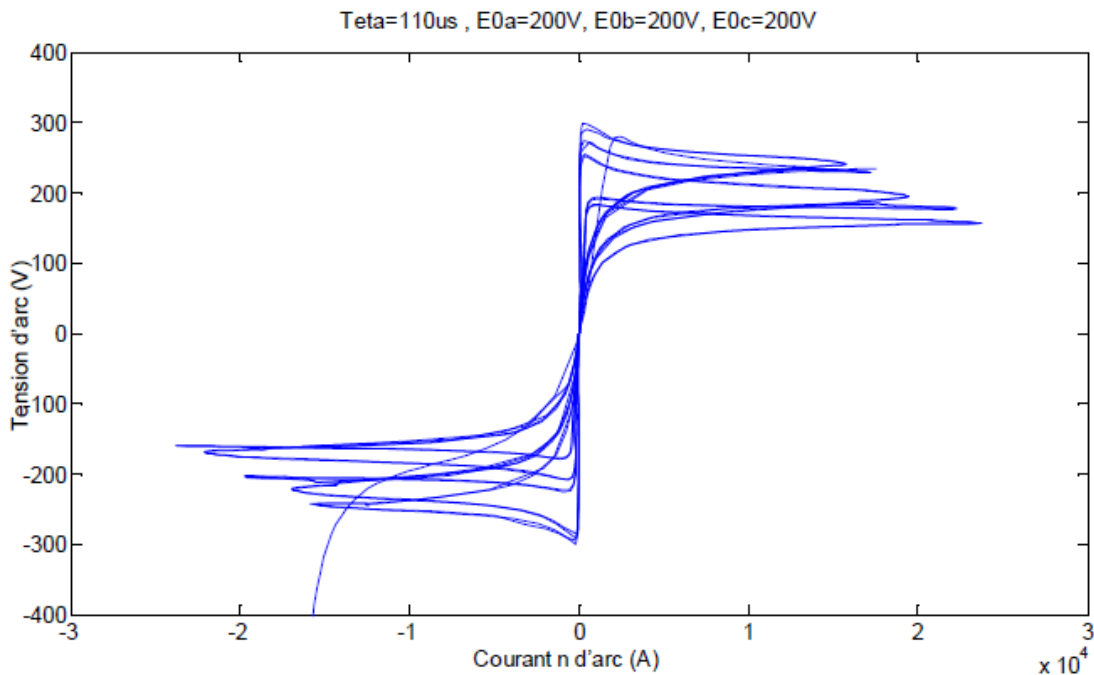


Figure III-14: La caractéristique tension/courant vue dans la phase A

La caractéristique dynamique de la tension/courant vue dans la phase A montre le papillotement et des fluctuations d'effet flicker d'un four à arc électrique

**c) la phase d'affinage.**

En phase d'affinage, caractérisée par un bain plat car les ferrailles sont totalement fondues. La distance électrode-bain est réduite, la tension et le courant d'arc sont très stables.

nous considérons la valeur temporaire des tensions d'arc dans les différentes phases ( $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ ) sont assignées à une valeur constante qui égale à 200V . Les résultats de Simulation sont représentés dans les figures suivantes :

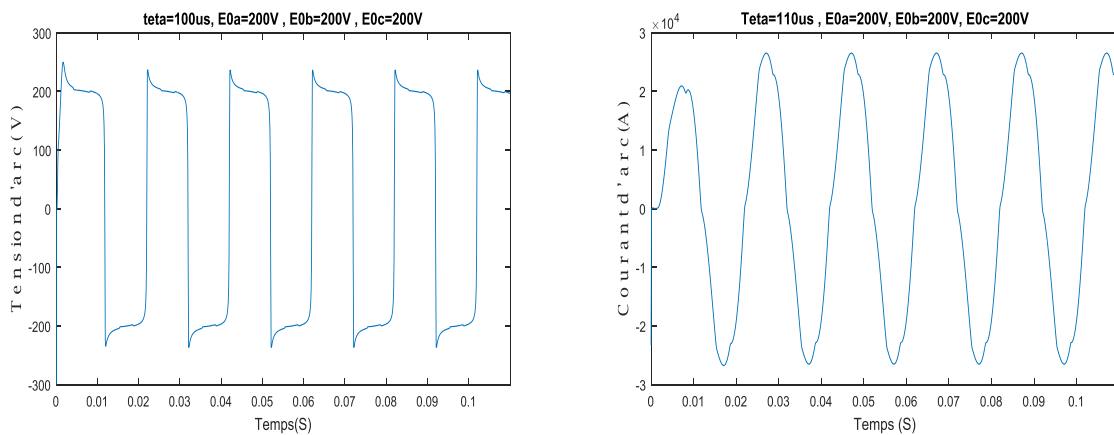


Figure III-15: La tension et le courant d'arc dans la phase d'affinage.

Le fonctionnement des arcs électriques est stable avec une nature alternative de l'alimentation réamorçage et d'extinction de l'arc, et on remarque aussi que le pique de surtension pour chaque réamorçage.

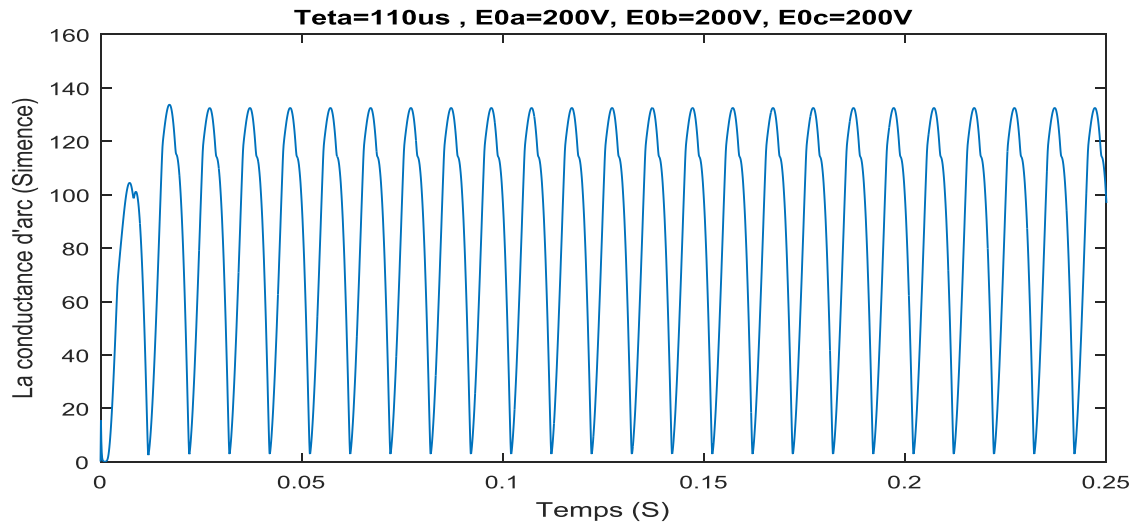


Figure III-16: La conductance d'arc électrique liée à la phase A.

La conductance d'arc électrique liée à la phase A, explique le phénomène d'extinction et de réamorçage de l'arc (la conduction discontinu) causée par la nature alternative de l'alimentation, qui explique la durée de conduction.

#### III.4. Analyse des harmoniques

Le four absorbe un courant déformé (harmoniques) et injecte des courants harmoniques dans le réseau. C'est un dispositif perturbateur (agresseurs), le réseau électrique devient victime.

Une analyse harmonique des tensions et des courants est nécessaire pour comparer la différence entre les phases forage, fusion, affinage à travers le développement en série de Fourier de la tension  $v_k(t)$  et du courant  $i_k(t)$ .

Les formes d'onde du courant ont été étudiées par l'analyseur de FFT (transformée de Fourier fonction). En admettant, le block « powergui » prêt à l'utilisation dans MATLAB, basé sur une analyse fréquentiel, il permet encore de calculer la déformation harmonique (THD).

### III.4.1. Harmoniques en courant

D'après la figure III-17, nous remarquons des harmoniques du rang impair (5,7,11,13...), (harmoniques dus à la non-linéarité de la caractéristique de l'arc). L'amplitude des inter-harmoniques augmente lorsque la longueur d'arc varie aléatoirement.

Dans la phase fusion et la phase forage, les résultats montrent que le modèle du four à arc électrique contient des inter-harmoniques de rang non entier, ils ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental, cela est dû au phénomène d'arc avec les différentes amplitudes plus au moins importantes et de plusieurs rangs. L'inter-harmonique, responsable de l'effet de flicker, les l'infra-harmoniques sont des signaux a des fréquences inférieures à celle du fondamental voir la figure III-17.

Par contre, dans le cas des harmoniques pairs, l'analyse spectrale n'a pas montré de grandes valeurs de l'amplitude. (Sa présence est due à la dissymétrie de la caractéristique de l'arc et le déséquilibré).

Par conséquent, la phase d'affinage et la fin de la phase fusion, les résultats illustrent que le modèle du four à arc électrique contient des harmoniques du rang impair (5,7,11,13...) avec des amplitudes décroissantes par rapport aux autres phases, avec des THD moins importants. Par exemple, l'harmonique trois atteint 15 % pour la phase fusion au contraire 1% pour la phase affinage, et l'harmonique cinq atteint 5 % pour la phase d'affinage.

La comparaison entre les figures met en évidence que :

- ✓ les amplitudes des inter-harmoniques sont plus importantes dans la phase de fusion et forage
- ✓ les amplitudes des harmoniques du rang impair non-multiple augmentent légèrement à la phase d'affinage. Le régime de fonctionnement déséquilibré du four affecte donc différemment les harmoniques du rang impair de courant dans toutes les différentes phases.

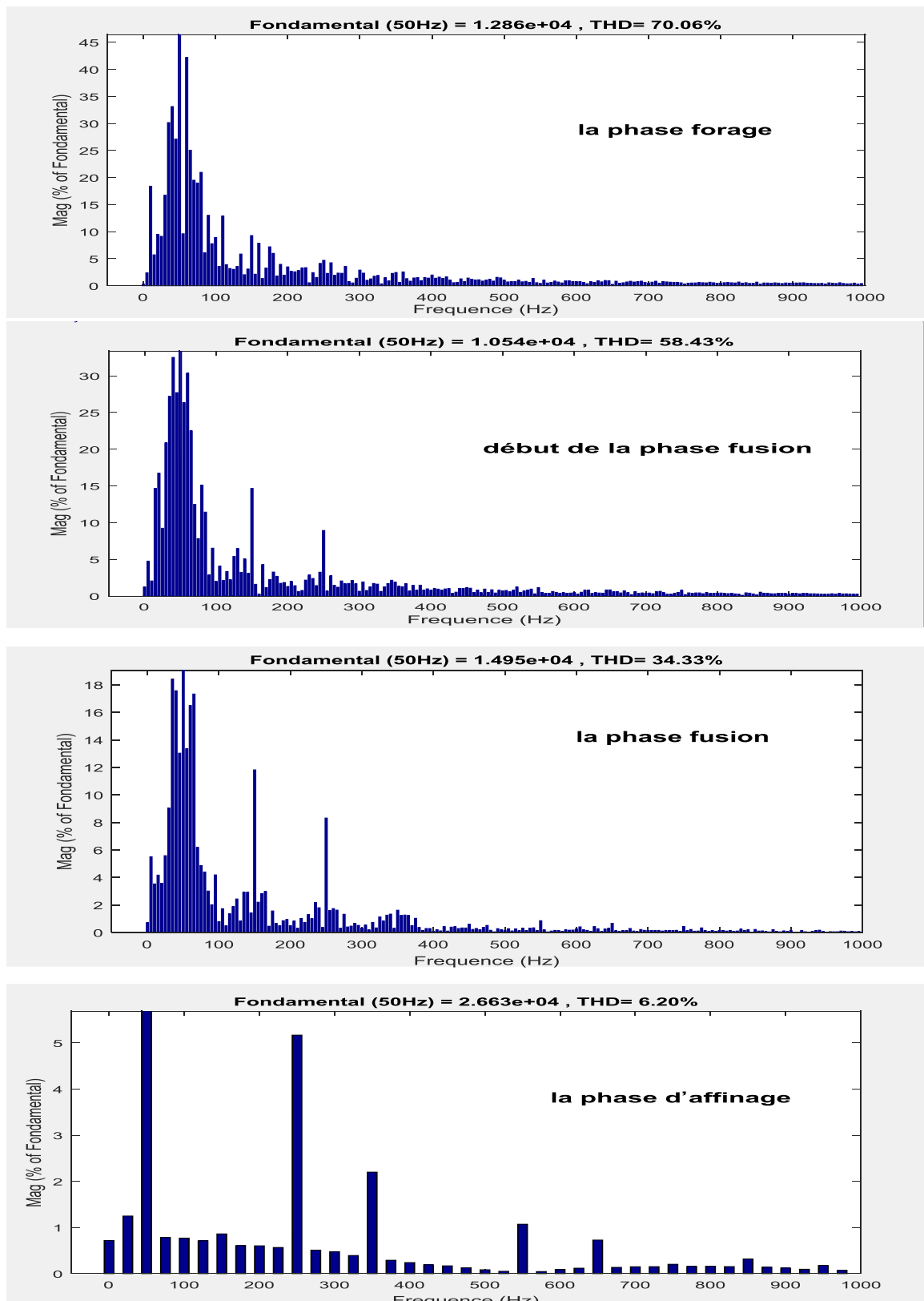


Figure III-17: Spectre fréquentiel des courants.



III.4.2. Harmonique en tension

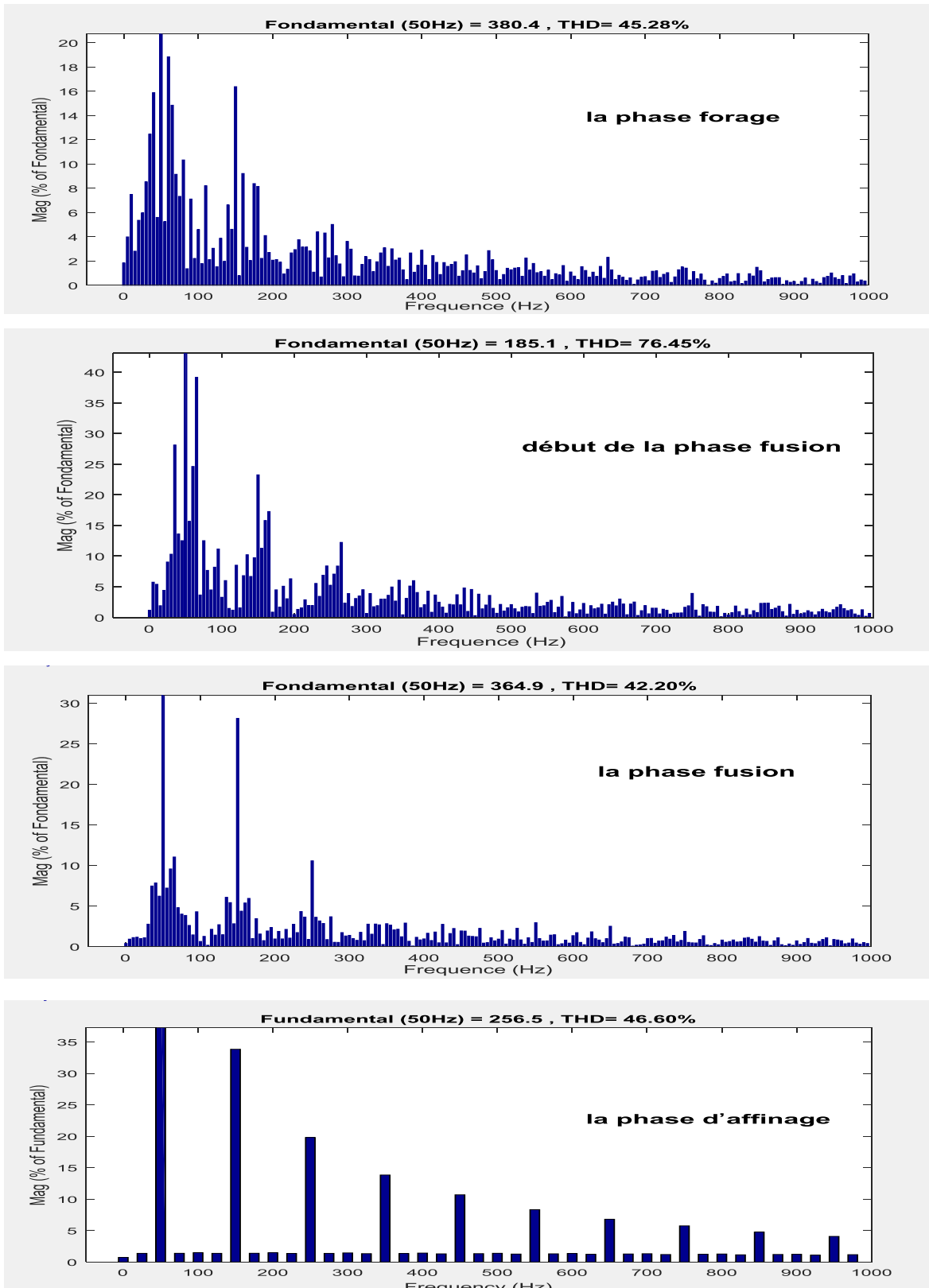


Figure III-18: Spectre fréquentiel des tensions.

Les fluctuations de la tension d'arc et la nature non linéaire de la conductivité génèrent des harmoniques. Ces harmoniques affectent les performances d'une alimentation du four à arc. La non-linéarité de la caractéristique d'arc cause l'injection des courants harmoniques dans un réseau à impédance élevée, il en résulte, en appliquant la loi d'Ohm des tensions harmoniques importantes. Le régime de fonctionnement déséquilibré, la surtension de l'arc fait apparaître des harmoniques du rang impair, et contient des inter-harmoniques de plusieurs rang non entier qui sont responsables de l'effet de flicker (la phase fusion et la phase forage).

### III.5. Conclusion

Le four à arc électrique génère des clignotements de la tension et des harmoniques au courant dus à la non-linéarité intrinsèque. D'après les résultats de simulation, on peut dire que le four à arc est un grand pollueur du réseau électrique à cause de sa nature, dissymétrique et l'instabilité. C'est une charge non linéaire, elle absorbe de l'énergie de façon non équilibrée sur les trois phases. Le four produit des différents types de perturbation électromagnétiques dans le réseau électrique pour les différents niveaux de tension HT ,MT, BT.

- Parmi les conséquences des fours dans un réseau électrique :
- Le déséquilibre des amplitudes
- La déformation harmonique de courant et de tension
- Le fonctionnement incorrect des dispositifs,
- Le vieillissement prématuré de l'équipement,
- Pertes additionnelles par transmission et la surintensité. [3]
- Effet flicker et des défauts dans les lignes électriques

## Conclusion générale

La simulation sous environnement MATLAB SIMULINK, montre les déformations subies par les grandeurs électriques et toute la pollution du réseau a cause du procédé à décharge électrique. La quantification des effets des perturbations ou la pollution obtenue a été faite par la détermination du taux d'harmonique « THD » et les rangs harmoniques impairs et les inters harmoniques existants dans chaque phase. Nous avons montré quelques défauts, tels que le déséquilibre des phases, l'extinction de l'arc, les courts circuits, effet flicker.

Le four à arc électrique génère des clignotements de la tension et des harmoniques au courant dus à la non-linéarité intrinsèque. D'après les résultats de simulation, on peut dire que le four à arc est un grand pollueur du réseau électrique à cause de sa nature, dissymétrique et l'instabilité. C'est une charge non linéaire, elle absorbe de l'énergie de façon non équilibrée sur les trois phases. Le four produit des différents types de perturbation électromagnétiques dans le réseau électrique pour les différents niveaux de tension HT ,MT, BT.

Au futur nous espérons faire une étude de simulation pour minimiser les harmoniques générés par l'insertion des compensateurs de puissance réactive ou des STATCOM. Ainsi qu'une implémentation des filtres actifs et hybrides pour l'élimination des harmoniques, et pour amélioration de la qualité d'énergie électrique.

## **Bibliographie**

- [1] Gianluca Postiglione « Nouvelle alimentation pour les fours à arc à courant alternatif » THESE de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse 20 décembre 2006.
- [2] DJEGHADER Yacine « Étude de la propagation et caractéristiques des harmoniques stochastiques générées par un four à arc » these de doctorat de L'université Badji Mokhtar – Annaba, année 2010
- [3] AYAD Ahmed Nour El Islam «Étude et analyse des interférences électromagnétiques (CEM) dans les procédés a décharges électriques» Mémoire de magister de l'université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès en Electrotechnique de 14/12/2011
- [4] Roland CAZES « Soudage à l'arc» B 7 730 Techniques de l'Ingénieur
- [5] B.Gros (ARCELOR) «Charging tires in the EAF as a substitute for carbon», BLIC meeting, 13 November 2003.
- [6] 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.
- [7] B.Bowman, L. Camagna ; « Les fours à arcs rapides en Europe ».La Revue de Métallurgie Janvier 1995.
- [8] G.Dolle ; « Historique du four à arc ». Revue de métallurgie 1995.
- [9] P. Ayed, C. Ouvradou, J.Astier ; « Aciérie électrique » ; Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7 700, pp.1-24.
- [10] 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.
- [11] M. Kratz ; « Four à arc » Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique, D 5 920, pp.5-99.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] M. SALANNE Jean-Philippe « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation. » docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse Thèse 18/11/2005
- [15] Abdolreza Tavakoli a, Mehdi Ehsan b, Seyed Mohammad Tagie Batahiee « A Simulink Study of Electric Arc Furnace Inactive Power Compensation by Using STATCOM» Islamic Azad University-Science and Research Branch, Tehran, Iran Vol.3, NO.10, Autumn 2006 Journal of Applied Mathematics, Islamic Azad University of Lahijan
- [16] H.Mokhtari, M. Hejri, « A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB» 0-7803-7525- 2002 IEEE.
- [17] King-Jet Tseng , Yaoming Wang, D. Mahinda Vilathgamuwa « An Experimentally Verified Hybrid Cassie–Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations», iee transactions on power electronics, vol. 12, no. 3, may 1997 nanyang technological university, singapore, singapore.
- [18] Stefan Berger «Mathematical approach to model rapidly elongated free-burning arcs in air in electric power circuits», Master Federal Institute of Technology University of technology Zurich Swiss
- [19] Adriaan Johannes Pieter De Lange « high voltage circuit breaker testing with a focus on three phases in one enclosure gas insulated type breakers » 13 november 2000 Doctorat Universiteit Delft, door elektrotechnisch ingenieur geboren te Alkmaar , the Netherlands
- [20] Jahel Hernandez Angeles « Implementación de Modelos de Arco Eléctrico para Simulación de Interruptores de Potencia en el EMTP» Tesis Grado De Maestro México, D. F. Diciembre, 2006
- [21] Jorge Gabriel Padilla Cantero « Modelado del horno de arco eléctrico para estudios relacionados con la calidad de la energía eléctrica » tesis instituto politécnico nacional méxico, d. f. junio 2007
- [22] Marius Peens « Modelling and Control of an Electrode System for a Three-Phase Electric Arc Furnace » Master of Engineering University of Pretoria etd – Peens, M (2006)
- [23] Source Internet : <http://www.u-bourgogne.fr/DESS-CEM/present.html>
- [24] Rahmat Allah Hooshmand Mahdi Torabian Esfahani « Optimal Design of TCR/FC in Electric Arc Furnaces for Power Quality Improvement in Power Systems » Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Hezar-Jerib St., Postal Code: 8174673441, Isfahan, Iran. 15, July-December 2009
- [25] WANG Yan MAO Zhi-zhong « Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace » Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010 J. Cent. South Univ. Technol. (2010) 17: 560–565 1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
- [26] A. Tavakkoli, M. Ehsan, M. Marzband « A SIMULINK Study of Electric Arc Furnace Power Quality Improvement by Using STATCOM » Islamic Azad University-Science and Research Branch, \* Islamic Azad University- Lahijan Branch, Tehran, Iran \*\* Sharif University of technology, Tehran, Iran 978-1-4244-1706-3/08/2008 IEEE.
-

[27] Larry Ray, PE; Louis Hapeshis Power System Harmonic Fundamental Considerations: Tips and Tools for Reducing Harmonic Distortion in Electronic Drive Applications, PE December 2005

[28] The McGraw-Hill Companies Source: Power Quality Primer Chapter 3 Power Quality Standards Downloaded from Digital Engineering Library McGraw-Hill ([www.digitalengineeringlibrary.com](http://www.digitalengineeringlibrary.com)) 2004.

## Résumé

Le four à arc est un équipement électrique pollueur des réseaux électriques ainsi que la de la qualité d'énergie électrique à cause de l'instabilité de l'arc électrique. Le four à arc génère des harmoniques et cause l'instabilité des courants et des tensions ainsi que l'effet flicker.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé le modèle mathématique de la conductivité pour simuler les caractéristiques dynamiques du four. Les résultats de simulation des trois phases montrent la pollution de la qualité d'énergie électrique avec des différents taux de distorsion harmonique ainsi que les différents rang harmonique existant de chaque phases de fonctionnement du four a arc électrique.

**Mots clés:** Four à arc à courant alternatif, qualité de l'énergie électrique, flicker

## ملخص

فرن الشرارة هو آلة كهربائية ملوثة لشبكات الكهربائية و جودة الطاقة الكهربائية بسبب عدم استقرار الشرارة . فرن الشرارة يولد التوافقيات ويسبب عدم استقرار التيار و الجهد ، وتأثير الوميض.

في هذه المذكرة ، استخدمنا النموذج الرياضي للموصلية، لمحاكاة الخصائص الديناميكية للفرن . وتشير نتائج ثلاث المحاكاة مراحل تلوث نوعية الطاقة الكهربائية مع اختلافات التشوه التوافقي ومراتب التوافقيات المختلفة , في كل مرحلة من مراحل عملية تشغيل فرن الشرارة الكهربائي. الكلمات المفتاحية: فرن الشرارة، نوعية الطاقة الكهربائية، الوميض

## Abstract

The arc furnace is an electrical equipment polluter of the electrical networks as well as the one of the quality of electrical energy because of the instability of the electric arc. The arc furnace generates harmonics and causes the instability of currents and voltages as well as the flicker effect.

In this paper, we used the mathematical model of conductivity to simulate the dynamic characteristics of the furnace. The simulation results of the three phases show the pollution of the electrical energy quality with different harmonic distortion rates as well as the different harmonic ranks existing in each operating phase of the electric arc furnace.

**Keywords:** AC arc furnace, electric power quality, flicker