

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université A. Mira - Bejaia

Faculté de technologie  
Département Génie électrique  
Spécialité Electrotechnique



## *Mémoire de Fin de cycle*

**En vue de l'obtention du diplôme de Master En Électrotechnique**

**Option : Réseaux électriques**

# Thème

*Le Processus de coupure d'un courant de court-circuit dans  
Un disjoncteur SF<sub>6</sub> haute tension*

**Réalisés par :**

**M<sup>r</sup> : AITEUR Koceila**

**M<sup>r</sup> : AMER Toufik**

**Encadrée par :**

**M<sup>me</sup> : ZIDANE.F**

2015/2016

# ***REMERCIEMENTS***

Nous remercions en premier lieu notre DIEU tout puissant de nous avoir donné la santé et le pouvoir de terminer ce modeste travail.

Nous remercions particulièrement notre promotrice **M<sup>me</sup> ZIDANE. F**, de nous avoir encadrée tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

***A.KOCEILA & A.TOUFIK***

# DÉDICACES

*Je dédie d'abord ce travail à mes très chers parents*

*A mes chers frères et chère sœur chacun a son nom*

*A toute ma famille*

*Sans oublier mon collègue Toufik et tous mes copains*

*de chambre*

*A la famille AMER*

*Et à tous mes amis*

*Koceïla .A*

# Dédicaces

*Je tiens à dédier ce modeste travail à:*

*A ma mère et mon père*

*A mes sœurs*

*A mes frères*

*A mes amis*

*Sans oublier mon collègue koceila et tous mes copains de  
chambre*

*Mehrez ,abdelhak ,lounes .....*

*A toute la famille AITEUR*

*Et à toute la promotion 2015/2016.*

*AMER Toufik*

# LISTE DES FIGURES

---

## CHAPITRE I : CALCULS DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

Fig.I.1: Court-circuit triphasé isolé	03
Fig.I.2: Court-circuit triphasé terre	03
Fig.I.3: Court-circuit biphasé terre	03
Fig.I.4: Court-circuit biphasé	04
Fig.I.5: Court-circuit monophasé	04
Fig.I.6: Séquence directe	06
Fig.I.7: Séquence inverse	06
Fig.I.8: Séquence homopolaire	07
Fig.I.9: Décomposition d'un système non symétrique en un système symétrique	07
Fig.I.10: Court- circuit triphasé terre	08
Fig.I.11: Représentation complexe du défaut triphasé	10
Fig.I.12: Court-circuit triphasé	11
Fig.I.13 : Court-circuit Biphase	11
Fig.I.14 : Représentation complexe du défaut biphasé	13
Fig.I.15 : Court-circuit biphasé terre	14
Fig.I.16 : Représentation complexe du défaut biphasé terre	15
Fig.I-17 : Court-circuit phase terre	16
Fig.I.18 : Représentation en composantes symétriques lors d'un défaut phase terre	17

## CHAPITRE II : INTERRUPTION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

Fig.II.1 : circuit RL en courant continu	21
Fig.II.2 : variation des paramètres courants, résistance en fonction de temps	22
Fig.II.3 : circuit RL en courant alternatif	23
Fig.II.4 : Schéma simplifié d'un réseau.	26
Fig.II.5 : Tension transitoire de rétablissement dans un circuit simple	27
Fig.II.6 : Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit	28
Fig.II.7 : La forme du courant prise en considération pour le pouvoir de coupure	29
Fig.II.8 : Tension transitoire de rétablissement	31

## LISTE DES FIGURES

---

Fig.II.9 : Caractéristiques de l'intensité et de la TTR lors d'une phase d'ouverture des Contacts	33
Fig.II.10: Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz	34
Fig.II.11 : L'évolution et la durée de l'arc dans la phase ouverture du disjoncteur	35

### CHAPITRE III : LES MODÈLES D'ARC À BOITE NOIRE

Fig.III.1: Caractéristique statique d'un arc de forte puissance	39
Fig.III.2 : Le modèle de Habedank	41
Fig.III.3 : Le modèle de KEMA	43
Fig.III.4 : Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés	45

### CHAPITRE IV : SIMULATION PAR LE MODÈLE DE MAYR MODIFIÉ

Fig. IV.1 : Système d'équation modèle de Mayr Modifié	49
Fig. IV.2 : Le bloc subsystem du modèle	49
Fig. IV.3 : Le bloc du modèle de Mayr Modifié	50
Fig. IV.4 : Subsystem de modèle de Mayr Modifié	50
Fig. IV.5: Modèle de Mayr Modifié intégré dans le circuit test	51
Fig. IV.6: Boite de dialogue du modèle Mayr Modifié	52
Fig. IV.7: Tension simulée par le modèle de Mayr Modifié	53
Fig. IV.8 : Courant simulée par le modèle de Mayr Modifié	53
Fig. IV.9 : Courant post arc	54
Fig. IV.10 : Tension transitoire de rétablissement (TTR)	54

### ANNEXES

Fig.1 : force électrodynamique lors d'un court -circuit biphasé	57
---	----

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau. III.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie	40
---	----

## TABLE DES ABBREVIATIONS ET DES SYMBOLES

### CHAPITRE I : CALCULS DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

**fig**: figure.

**V<sub>d</sub>** : tension directe. [V]

**V<sub>i</sub>** : tension inverse. [V]

**V<sub>h</sub>** : tension homopolaire. [V]

**I<sub>d</sub>** : courant directe. [A]

**I<sub>i</sub>** : courant inverse. [A]

**I<sub>h</sub>** : courant homopolaire. [A]

**Z<sub>d</sub>** : impédance directe. [ $\Omega$ ]

**Z<sub>i</sub>** : impédance inverse. [ $\Omega$ ]

**Z<sub>h</sub>** : impédance homopolaire. [ $\Omega$ ]

**a** : Opérateur de rotation d'un angle de 120°.

**V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>** : les tensions de phases réelles. [V]

**U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>** : les tensions composées réelles. [V]

**I<sub>1</sub> I<sub>2</sub> I<sub>3</sub>** : des courants réels. [A]

**E** : source de tension équivalente de toutes les sources, la tension interne qui est égales à 1pu.

**I<sub>terre</sub>** : courant de terre. [A]

**S<sub>cc</sub>** : Puissance de court-circuit. [VA]

**I<sub>cc</sub>** : courant de court-circuit (défaut). [A]

**U<sub>1n</sub>** : la tension nominale. [V]

**Z** : impédance de défaut. [ $\Omega$ ]

### CHAPITRE II : INTERRUPTION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

**$\tau$**  : la constante de temps de désionisation. [s]

**u** : la tension d'arc. [V]

**P<sub>0</sub>** : la puissance de refroidissement. [W]

**T** : la durée de la coupure. [s]

**r** : la résistance de l'interrupteur (résistance variable). [ $\Omega$ ]

**E** : la tension de la source. [V]

**R** : la résistance de circuit. [ $\Omega$ ]



## GLOSSAIRE

---

**L**: l'inductance de circuit. [H]

**i**: le courant électrique. [A]

**$i_{cc}$** : le courant de court-circuit. [A]

**$\hat{I}$** : le courant max du générateur. [A]

**$\hat{E}$** : la tension max du générateur. [V]

**Z**: l'impédance du circuit. [ $\Omega$ ]

**X**: Réactance du circuit. [ $\Omega$ ]

**L**: L'inductance du circuit. [H]

**$\omega$** : la pulsation. [rd/s]

**$\cos\varphi$** : Facteur de puissance.

**f**: fréquence de réseau. [Hz]

**w**: puissance dissipée dans l'appareil. [W]

**$t_0$** : l'instant d'initiation de l'arc. [s]

**$t_{arc}$** : l'instant de la coupure. [s]

**$SF_6$** : hexafluorure de soufre (six atomes de fluor et un atome de soufre).

**TTR**: tension transitoire de rétablissement. [V]

**CEI 60056**: norme commission international en électrotechnique.

**HT**: haute tension.

### CHAPITRE III : LES MODÈLES D'ARC À BOITE NOIRE

**g**: la conductance de l'arc. [S]

**u**: la tension de l'arc. [V]

**i**: le courant de l'arc. [A]

**$\tau$** : la constante de temps de désionisation.

**P**: la puissance de refroidissement ou la puissance évacuée de l'arc. [W].

**$w_0$** : Coefficient constant qui représente la quantité d'énergie.

**K**: exprime la valeur absolue de la conductance.

**w**: l'énergie de l'arc.

**P**: la pression de remplissage du disjoncteur. [bar]

**$U_0$** : le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique. [V/bar]

**$\tau_0$** : la constante de temps de l'arc. [s]

**$g_c$** : la conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie. [S]

## GLOSSAIRE

---

$\tau_c$  : la constante de temps de Cassie. [s]

$g_m$  : la conductance de l'arc décrite par l'équation de Mayr. [S]

$\tau_m$  : la constante de temps de Mayr. [s]

$\alpha$  : le paramètre qui influe sur  $\tau$  en fonction de  $g$ .

$\beta$  : le paramètre qui influe sur P en fonction de  $g$ .

$g_j$  : la conductance partielle de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc. [S]

$P_j$  : la puissance de refroidissement de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc. [W]

$\tau_j$  : la constante de temps de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc. [s]

$u_j$  : la tension partielle de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc. [V]

$i$  : le courant de l'arc. [A]

$\lambda_j$  : la commande Cassie-Mayr, de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc.

$P_1$  : la constante qui régularise l'influence de la puissance électrique d'entrée sur la puissance de refroidissement.

### CHAPITRE IV : SIMULATION PAR LE MODÈLE DE MAYR MODIFIÉ

$g$  : la conductance de l'arc. [S]

$u$  : la tension de l'arc. [V]

$I$  : le courant de l'arc. [A]

$\tau$  : la constante de temps de l'arc. [s]

$p$  : la pression de remplissage du disjoncteur. [bar]

$P_0$  : la puissance de refroidissement. [W]

$U_0$  : le pourcentage constant de la caractéristique u.i. [V/bar]

### ANNEXES

$I$  : le courant parcouru dans l'élément du conducteur. [A]

$B$  : Champ d'induction provenant d'autre courant. [T]

$g_2, g_3$  : galopes engendrées lors d'un défaut entre les phases. [N/m]

# SOMMAIRE

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale	01
-----------------------	----

## CHAPITRE I : CALCULS DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

Introduction	02
I.1.Définition d'un courant de court-circuit	02
I.2.Les types des courants de court-circuit	02
I.2.1. les Courts-circuits triphasé	02
I.2.1.1. Court-circuit triphasé isolé	02
I.2.1.2. Court-circuit triphasé terre	03
I.2.2. les Courts-circuits biphasé	03
I.2.2.1. Court-circuit biphasé terre	03
I.2.2.2. Court-circuit biphasé isolé	04
I.2.3. Court-circuit monophasé	04
I.3.Caractéristique du courant de court-circuit	04
I.3.1.leur durée	04
I.3.2.leur origine	04
I.4. Les conséquences des courants de court-circuit	05
I.4.1. Au point de défaut.	05
I.4.2. Pour les autres circuits électriques du réseau	05
I.5. Composantes symétriques	05
I.5.1. Système direct	06
I.5.2. Système inverse	06
I.5.3. Système homopolaire	06
I.6. Calcul des courants de court-circuit	08
I.6.1.Court-circuit triphasé terre	08
I.6.2.Court-circuit triphasé	10
I.6.3.Court-circuit biphasé	11
I.6.4.Court-circuit biphasé terre.	13
I.6.5.Court-circuit phase terre.	15
I.8.Puissance de court-circuit	18

# SOMMAIRE

---

Conclusion:	19
-------------	----

## CHAPITRE II : INTERRUPTION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

Introduction	20
II.1.Nature du courant électrique	20
II.2.L'interruption des courants électriques	21
II.2.1.Interruption d'un courant continu	21
II.2.2.Interruption d'un courant alternatif	23
II.2.2.1. Couper avec l'arc électrique	23
II.3. Les contraintes dues à l'interruption	24
II.4. Localisation des défauts	24
II.4.1. Les défauts aux bornes du disjoncteur	24
II.4.2. Le défaut en ligne	24
II.5. Conditions nécessaires pour réussir la coupure	25
II.6. Coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau HT	25
II.7.Les techniques de coupure en HT	27
II.7.1.Coupure au passage du courant par zéro	27
II.7.2.Répartition de la coupure dans des chambres en séries	28
II.8. Caractéristiques assignées des disjoncteurs à haute tension	29
II.8.1. Le pouvoir de coupure	29
II.8.2. Le pouvoir de fermeture assigné	30
II.8.3. La tension transitoire de rétablissement	31
II.9. Processus de coupure avec un arc électrique	31
II.9.1. La période d'attente	31
II.9.2. La période d'extinction	32
II.9.2.3.La période Post-Arc	33
II.10. Importance de la constante de temps de désionisation	33
Conclusion	35

# SOMMAIRE

---

## CHAPITRE III : LES MODÈLES D'ARC À BOITE NOIRE

Introduction	36
III.1. Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique	36
III.1.1. Les modèles diélectriques et thermiques	36
III.1.2. Les modèles empiriques	36
III.1.3. Les modèles à boîte noire	36
III.2. Représentation des modèles d'arc à boîte noire	37
III.3. Les modèles de base	37
III.3.1. Le modèle de Mayr	37
III.3.1.1. Première hypothèse	37
III.3.1.2. Deuxième hypothèse	38
III.3.1.3. Troisième hypothèse	38
III.3.2. Le modèle de Cassie	39
III.3.3. Comparaison des deux modèles	40
III.4. Les modèles d'arc améliorés	40
III.4.1. Le modèle de Mayr modifié	41
III.4.2. Le modèle de Habedank	41
III.4.3. Le modèle de Schwarz	42
III.4.4. Le modèle de KEMA	43
III.4.4.1. Choix des sous-modèles	44
III.4.4.2. Les paramètres du modèle	44
III.4.5. Le modèle de Schavemaker	44
III.4.5.1. Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts	45
III.4.5.1.1. Domaine des courants forts	45
III.4.5.1.2. Domaine des courants faibles	46
III.4.5.1.2.1. Avant le zéro du courant	46
III.4.5.1.2.2. Après le zéro du courant	46
Conclusion	46

# SOMMAIRE

---

## CHAPITRE IV : SIMULATION PAR LE MODÈLE DE MAYR MODIFIÉ

Introduction	47
IV.1. Conception du modèle	47
IV.1.1 Description du modèle de Mayr modifié	47
IV.1.2 Mise en équation du modèle dans le Simulink	48
IV.1.3 Insertion du modèle dans le circuit d'essai	49
IV.2. Simulation avec le modèle de Mayr Modifié	52
IV.3. Les résultats de la simulation	53
Conclusion	55

## CONCLUSION GÉNÉRAL

Conclusion général	56
--------------------	----

## ANNEXES

1. Les efforts électrodynamiques	57
2. L'arc électrique	57
2.1. Le plasma	58
2.2. La décharge électrique	59

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Introduction

La demande actuelle d'énergie électrique augmente de plus en plus dans le monde. Cette énergie est transportée par des réseaux électriques haute tension qui deviennent plus complexes, mais qui doivent être toujours sûres. Cette sécurité est assurée principalement par les disjoncteurs électriques à haute tension.

Les courts-circuits sont des incidents très fréquents sur les réseaux de haute tension, chaque année ces réseaux subissent un grand nombre de courts-circuits dus surtout aux orages, malgré la géométrie de la ligne aérienne et la présence des câbles de garde.

Les courants de court-circuit sont de fortes intensités et peuvent causer des dégâts importants. Les courants de court-circuit doivent être calculés en tout point du réseau pour faire le choix adéquat des disjoncteurs chargés de les interrompre.

Cependant, lors de la coupure d'un courant alternatif d'une manière générale et d'un courant de court-circuit d'une manière particulière, des phénomènes électriques surviennent et décident de la réussite ou de l'échec de la coupure.

Dans ce travail on s'intéresse au processus de la coupure d'un courant alternatif et surtout au processus de la coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension. Pour reproduire ce processus avec des simulations numériques, on a conçu « un interrupteur » à base du modèle d'arc de Mayr Modifié, dans le simulink de MATLAB.

Ce travail est constitué de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude et aux calculs des courants de court-circuit dans un réseau haute tension.

Le deuxième chapitre est réservé aux phénomènes d'interruption des courants de court-circuit dans le disjoncteur SF<sub>6</sub> et à la détermination des caractéristiques assignées des disjoncteurs chargés de la coupure.

Le troisième chapitre présente les modèles les plus utilisés pour modéliser l'arc électrique dans un disjoncteur SF<sub>6</sub> haute tension.

Le quatrième chapitre est consacré à la conception d'un « interrupteur » à base du modèle de Mayr Modifié et à la reproduction du processus de coupure d'un courant de court-circuit par un disjoncteur SF<sub>6</sub> haute tension, par simulation numérique en utilisant ce modèle.



# Chapitre I

## CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

## Introduction

Le court-circuit est un phénomène très fréquent, n'importe quel réseau électrique, poste de transformation peut être à n'importe quel moment exposé à un défaut de court-circuit.

Tout court-circuit s'accompagne par une surintensité dont la valeur dépend de plusieurs facteurs allant du point de son apparition jusqu'à la source. Ces fortes intensités ont des conséquences néfastes non seulement sur le matériel, mais aussi elles peuvent mettre en péril la vie humaine.

Les courants de court-circuit doivent être calculés en tout point du réseau pour faire le choix correct des équipements de protection. Dans ce but, des méthodes de calculs ont été développées et des logiciels ont été conçus pour permettre un calcul précis et rapide de ces courants.

Dans ce contexte, le présent chapitre est consacré aux calculs des différents courants de court-circuit en utilisant la méthode des composantes symétriques.

### I.1.Définition d'un court-circuit

Un court-circuit est une liaison accidentelle entre conducteurs par une résistance ou une impédance très faible, (court-circuit franc ou impédant) de deux ou plusieurs points du réseau électrique se trouvant normalement à des tensions différentes.

### I.2.Les types de court-circuit

On peut distinguer trois types de court-circuit:

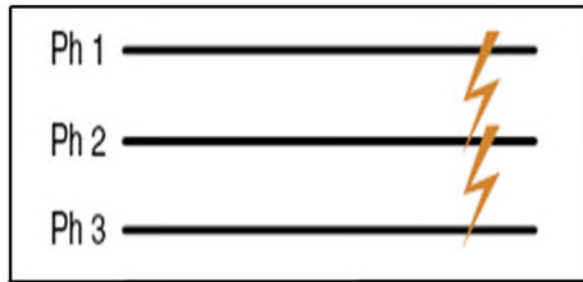
- **monophasés** : 80 % des cas ;
- **biphasés** : 15 % des cas. Ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés ;
- **triphases** : 5 % seulement dès l'origine.

#### I.2.1. Les courts-circuits triphasés:

Ce sont des courts-circuits symétriques et c'est eux qui provoquent généralement les intensités de courant les plus violentes. On distingue :

##### I.2.1.1. Le court-circuit triphasé isolé

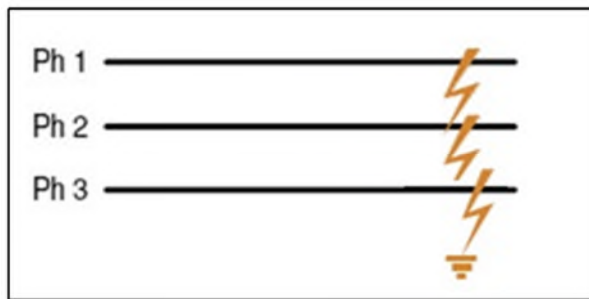
Il correspond à la réunion des trois phases, comme le montre la fig. (I.1).



*Fig.I.1: Court-circuit triphasé isolé.*

### I.2.1.2. Court-circuit triphasé terre

Il correspond à la réunion des trois phases et la terre comme le montre la fig ( I.2)



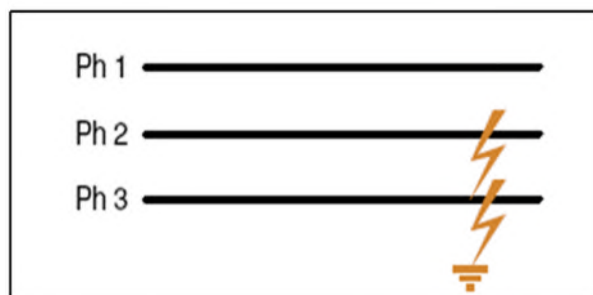
*Fig.I.2: Court-circuit triphasé terre*

### I.2.2. Les courts-circuits biphasés

Il correspond à un défaut entre deux phases sous tension, le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé on distingue :

#### I.2.2.1. Court-circuit biphasé terre

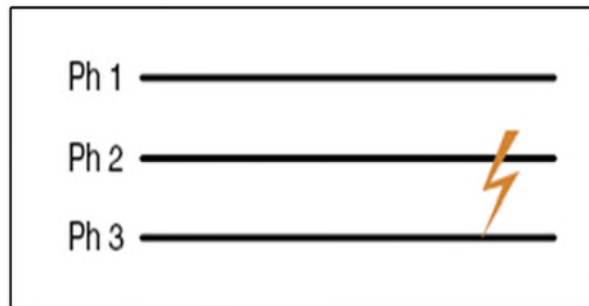
Il correspond à la réunion de deux phases à la terre comme le montre la fig.(I.3).



*Fig.I.3 : Court-circuit biphasé terre*

### I.2.2.2. Court-circuit biphassé isolé

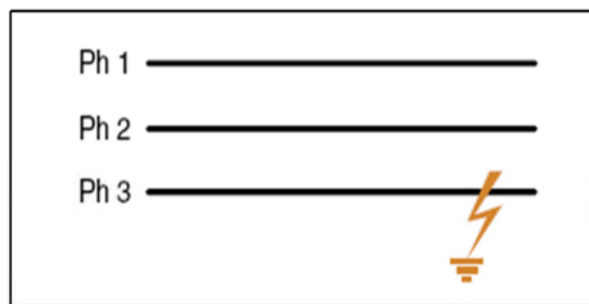
Il correspond à un défaut entre deux phases, comme le montre la fig.(I.4). [01]



*Fig.I.4: Court-circuit biphassé*

### I.2.3. Court-circuit monophasé

Il correspond à la liaison d'une phase et la terre comme le montre la fig.(I.5).



*Fig.I.5: Court-circuit monophasé*

## I.3. Caractéristique du courant de court-circuit

Les défauts de courts-circuits sont principalement caractérisés par :

### I.3.1. leur durée

- Auto-extincteurs : la durée du défaut est trop courte pour déclencher la protection ;
- Fugitifs : ils disparaissent après l'ouverture des disjoncteurs de protection et ne reparassent pas lors de la remise en service ;
- Permanents : ils nécessitent la mise hors tension et l'intervention du personnel d'exploitation.

### I.3.2. leur origine

- Mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux) ;
- Surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique ;

- dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive (vieillessement des isolements).

#### **I.4. Les conséquences des courants de court-circuit**

Les conséquences des courants de court-circuit sont variables selon le type et la durée du court-circuit, le point concerné du réseau et l'intensité. [2]

##### **I.4.1. Au point de défaut.**

La présence de défaut provoque :

- ✓ détérioration des isolants ;
- ✓ fusion des conducteurs ;
- ✓ incendie et danger pour les personnes ;
- ✓ des efforts électrodynamiques :
  - Déformation des jeux de barre ;
  - Arrachement des câbles. (pour plus d'information voir l'annexe page 57 )

##### **I.4.2. Pour les autres circuits électriques du réseau**

- ✓ les creux de tension pendant et après la durée d'élimination du défaut ;
- ✓ la mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma et la sélectivité des protections ;
- ✓ l'instabilité et/ou la perte de synchronisme des machines influencées par le court-circuit. [04]

#### **I.5. Composantes symétriques**

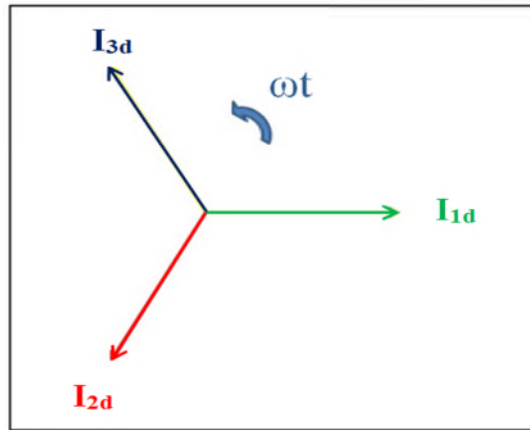
En fonctionnement normal équilibré symétrique, l'étude des réseaux triphasés se ramène à celle d'un réseau monophasé équivalent, caractérisé par les tensions simples, les courants de phase, et les impédances du réseau (appelées impédances cycliques). Dès qu'apparaît une dissymétrie significative dans la configuration ou le fonctionnement du réseau, la simplification n'est plus possible : on ne peut alors établir simplement les relations électriques dans les conducteurs à l'aide des impédances cycliques.

On emploie la méthode des composantes symétriques qui repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, inverse et homopolaire

On définit ces trois systèmes en prenant le courant  $I_1$  comme référence.

### I.5.1. Système direct

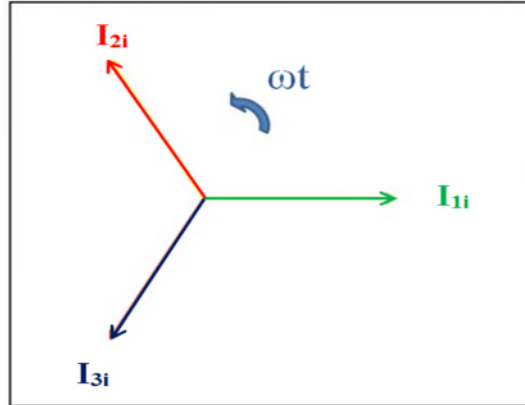
Le système direct est un système triphasé équilibré de séquence directe ( $I_{1d}$   $I_{2d}$   $I_{3d}$ ), chaque vecteur est déphasé de  $2\pi/3$  en arrière du précédent comme le montre la fig.(I.6).



*Fig.I.6: Séquence directe.*

### I.5.2. Système inverse

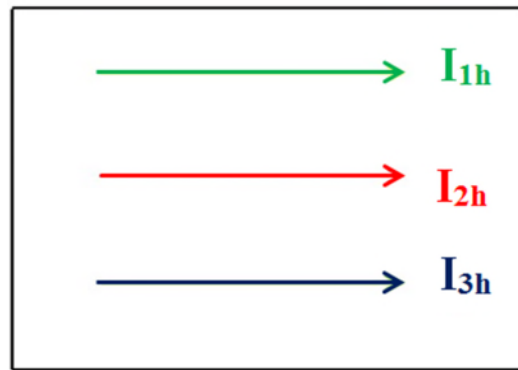
Le système inverse est de séquence inverse ( $I_{1i}$   $I_{3i}$   $I_{2i}$ ), chaque vecteur est déphasé de  $2\pi/3$  en avant du précédent comme le montre la fig. (I.7).



*Fig.I.7 : Séquence inverse.*

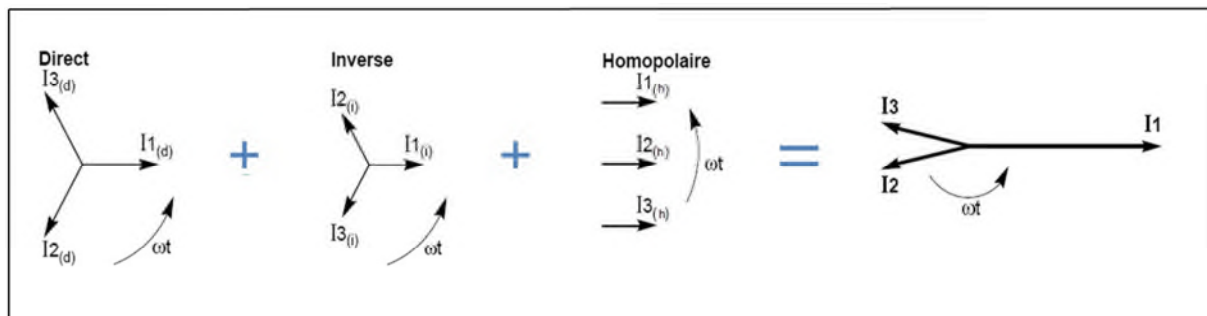
### I.5.3. Système homopolaire

Le système homopolaire (ou **séquence nulle**) est un système triphasé où les trois vecteurs sont semblables comme le montre la fig.(I.8).



**Fig.I.8** : Séquence homopolaire.

Appliquons ce principe à un système de courants, la figure (I.9) illustre la décomposition d'un système courants triphasés déséquilibrés en la somme de trois systèmes de courant triphasés équilibrés ; direct, inverse et homopolaire.



**Fig.I.9** : Décomposition d'un système non symétrique en trois systèmes symétriques.

En utilisant l'opérateur  $a$  :

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{entre } (I_1; I_2; I_3)$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = 1$$

$$I_1 = I_d + I_i + I_h$$

$$I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_h$$

$$I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_h$$

Soit sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_h \end{bmatrix}$$

Pour chaque système respectivement direct, inverse et homopolaire, tensions ( $V_d, V_i, V_h$ ) courants ( $I_d, I_i, I_h$ ) sont liés par les impédances ( $Z_d, Z_i, Z_h$ ) du même système. les impédances symétriques sont en fonction des impédances réelles, notamment des inductances mutuelles. la notion de composantes symétriques s'étend également aux puissances. [03]

La décomposition en composantes symétriques n'est pas uniquement une technique de calcul, mais correspond bien à une réalité physique des phénomènes. En effet on peut mesurer directement les composantes symétriques tensions, courants, impédances d'un système déséquilibré.

Les impédances directe, inverse, homopolaire d'un élément de réseau sont les impédances présentées par cet élément soumis à des systèmes de tension respectivement triphasé direct, triphasé inverse, phase-terre sur trois phases en parallèle.

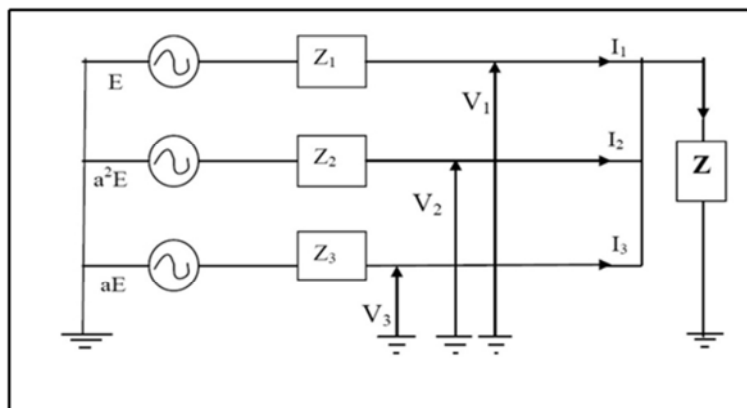
Les génératrices produisent la composante directe de la puissance, les défauts peuvent produire les composantes inverse et homopolaire.

Dans les moteurs, la composante directe crée le champ tournant utile, alors que la composante inverse est à l'origine d'un champ tournant de freinage. [01]

## I.6. Calcul des courants de court-circuit :

### I.6.1. Court-circuit triphasé terre

Ce défaut survient lorsque les trois phases se retrouvent accidentellement en contact avec une masse métallique reliée à la terre. Cette liaison à la terre peut avoir une certaine impédance que nous modélisons par  $Z$  voir la figure (I-10). [5]



*Fig.I.10 : Court- circuit triphasé terre.*



L'analyse de court-circuit consiste à déterminer les paramètres du régime au point du défaut en utilisant les composantes symétriques.

Les équations du défaut quand  $Z=0$  sont :

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = V_2 = V_3 = 0 \\ V_d = V_i = V_h = 0 \end{array} \right\} \quad (I.1)$$

Le court-circuit provoque un système dissymétrique, les équations du système qui déterminent les composantes réelles en fonction des composantes symétriques seront :

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = I_d + I_i + I_h \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_h \\ I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_h \end{array} \right\} \quad (I.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = V_d + V_i + V_h \\ V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_h \\ V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_h \end{array} \right\} \quad (I.3)$$

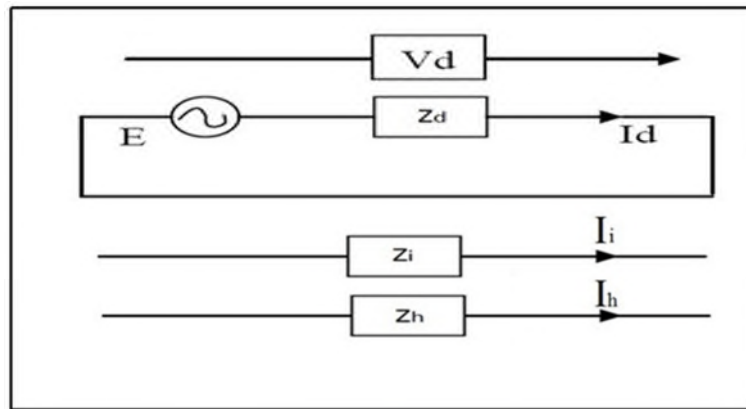
Les équations du système en composantes symétriques:

$$\left. \begin{array}{l} E = V_d + Z_d I_d \\ 0 = V_i + Z_i I_i \\ 0 = V_h + Z_h I_h \end{array} \right\} \quad (I.4)$$

La source ne fournit pas de composantes inverse et homopolaire on aura donc.

$$\left. \begin{array}{l} I_h = I_i = 0 \\ I_d = \frac{E}{Z_d} \end{array} \right\} \quad (I.5)$$

Ces différents résultats peuvent être représentés sous forme du schéma tel que celui de la fig. (I.11)



*Fig.I.11: Représentation complexe du défaut triphasé.*

Après avoir déterminé les composantes symétrique ; la détermination des composantes réelles seront comme suite :

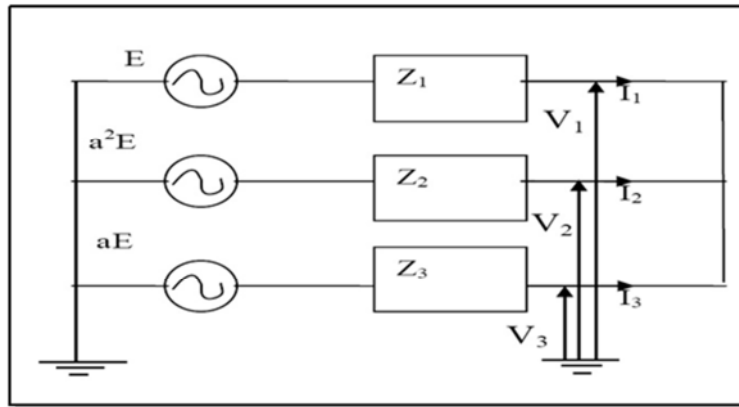
$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{Z_d} \\ I_2 &= a^2 \frac{E}{Z_d} \\ I_3 &= a \frac{E}{Z_d} \end{aligned} \right\} \quad (I.6)$$

$$I_{\text{terre}} = I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (I.7)$$

On constate que le défaut est indépendant des impédances  $Z_h$  et  $Z_i$

### **I.6.2.Court-circuit triphasé :**

Ce type de défaut est semblable au précédent, ils ont les mêmes effets. Dans ce cas, il est clair que les tensions de phases au point de court-circuit sont égales et les tensions composées sont nulles voir fig. (I-12). [5]



**Fig.I.12:** Court-circuit triphasé.

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_2 = V_3 \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.8)$$

Composantes symétriques :

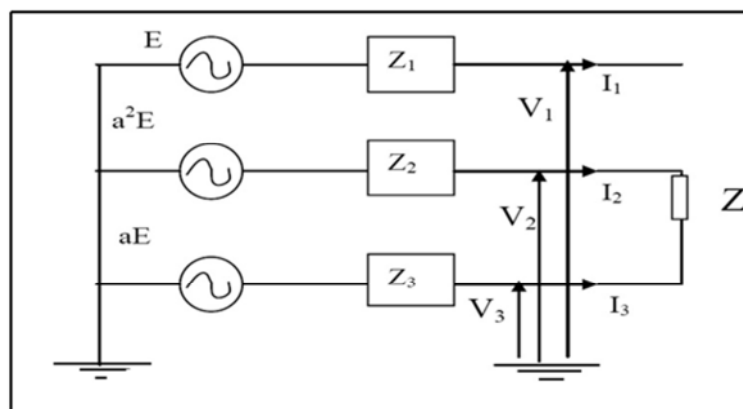
$$V_d = V_i = V_h = 0 \quad (I.9)$$

Donc les courts-circuits triphasés sont à l'origine de très forts courants, les tensions peut chuter jusqu' à zéro au point de défaut (court-circuit franc) ce qui provoque l'instabilité du réseau en l'absence des moyens de protection.

De ce point de vue, il est indispensable d'avoir des moyens de déclenchement automatique et rapide des éléments de protections.

### I.6.3. Court-circuit biphase

Ce défaut survient lorsque deux phases se retrouvent accidentellement en contact, ou dans le cas d'une charge **Z** branchée entre deux phases. Ce type de court-circuit crée une asymétrie des phases voir la fig. (I-13). [5]



**Fig.I.13:** Court-circuit Biphase .

Les équations de défauts sont :

$$\left. \begin{array}{l} I_1=0 \\ I_2= -I_3 \end{array} \right\} \quad (I.10)$$

$$U_{23}=ZI_2=-ZI_3 \quad (I.11)$$

$$(V_2=V_3 \text{ quand } Z=0)$$

En utilisant les équations (I.2), (I.3) et (I.4) nous obtenons

$$I_d+I_i+I_h=0 \quad (I.12)$$

Comme

$$I_d+I_i+I_h=0 \Rightarrow 3I_h=0 \Rightarrow I_h=0 \quad (I.13)$$

On aura donc

$$I_d = -I_i \quad (I.14)$$

de l'équation (I-13) on tire la valeur du courant direct et inverse

$$\left. \begin{array}{l} I_d = \frac{E}{Z+Z_d+Z_i} \\ I_i = -\frac{E}{Z+Z_d+Z_i} \end{array} \right\} \quad (I.15)$$

de l'équation (I.4) on déduit l'expression de la tension direct :

$$E = V_d + Z_d I_d \quad \text{et} \quad I_d = \frac{E}{Z_d+Z_i+Z}$$

Alors

$$V_d = \frac{(Z_i+Z)}{Z+Z_d+Z_i} E \quad (I.16)$$

Aussi pour la tension inverse :

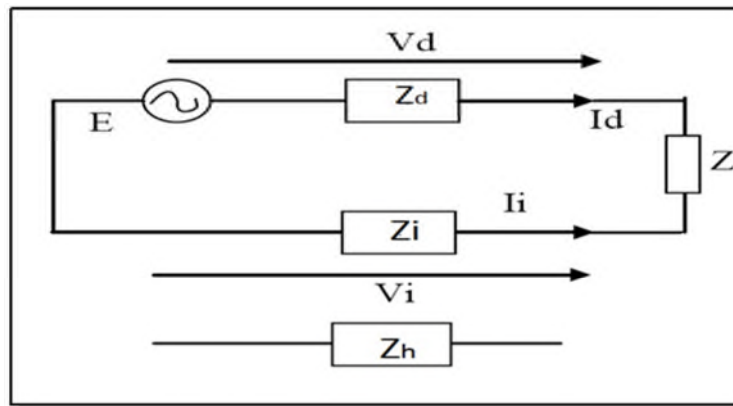
$$0 = V_i + I_i Z_i \quad \text{et} \quad I_i = -\frac{E}{Z_d+Z_i+Z}$$

Alors

$$V_i = \frac{Z_i}{Z_d+Z_i+Z} E \quad (I.17)$$

Quant à la tension homopolaire,  $V_h=0$ .

Les différentes grandeurs complexes sont représentées sur la Fig. (I-14). [5]



*Fig.I.14: Représentation complexe du défaut biphasé.*

Après avoir déterminé les composantes symétriques ; on déduit les composantes réelles.

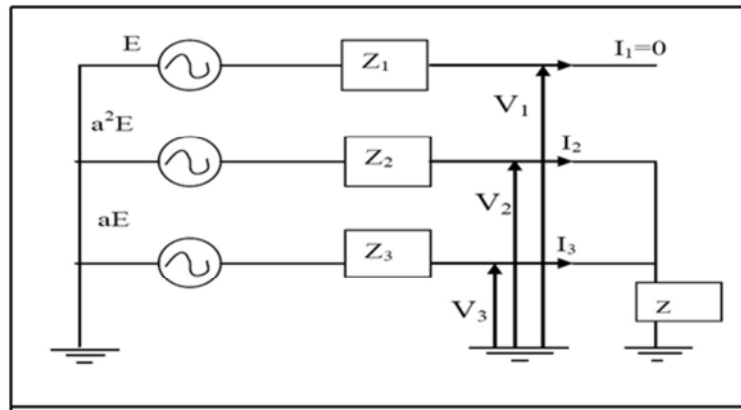
$$\left. \begin{aligned} I_1 &= 0 \\ I_2 &= -j\sqrt{3} \frac{E}{Z_d + Z_i + Z} \\ I_3 &= +j\sqrt{3} \frac{E}{Z_d + Z_i + Z} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.18})$$

Ainsi pour les tensions

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{(2Z_i + Z)E}{Z_d + Z_i + Z} \\ V_2 &= \frac{(2Z_i + a^2Z)E}{Z_d + Z_i + Z} \\ V_3 &= \frac{(2Z_i + aZ)E}{Z_d + Z_i + Z} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.19})$$

#### I.6.4. Court-circuit biphasé terre

Ce défaut a eu lieu lorsque deux phases se retrouvent accidentellement et simultanément en contact avec une masse métallique reliée à la terre. Cette liaison à la terre peut avoir une certaine impédance que nous appelons  $Z$  comme indiqué sur la Fig. (I.15). [5]



**Fig.I.15:** Court-circuit biphasé terre.

Les équations de défauts sont :

$$I_1=0 \tag{I.20}$$

$$V_2=V_3= Z (I_2+I_3) \tag{I.21}$$

Les tensions de phase sont nulles quand :  $Z=0$

$$(V_2=0 ; V_3=0)$$

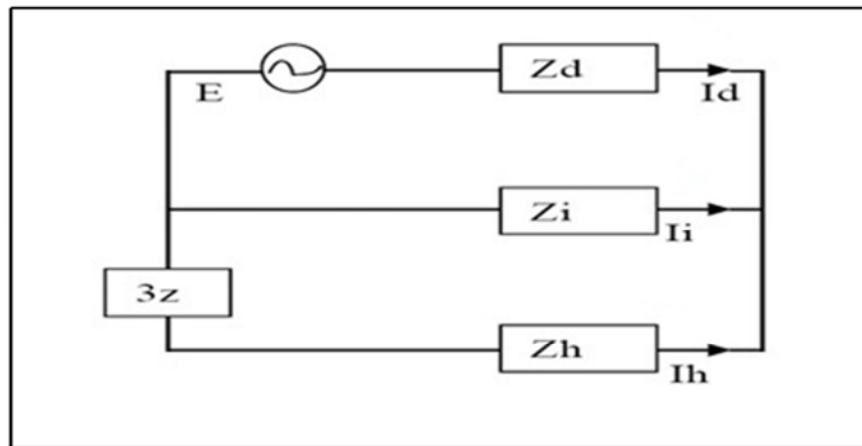
En utilisant les équations (I.2), (I.3) et (I.4), on peut déterminer les composantes symétriques des courants et tensions, on aura :

$$\left. \begin{aligned} I_d+I_i+I_h=0 \\ I_d &= \frac{(Z_i+Z_h+3Z)E}{Z_dZ_i+(Z_h+3Z)(Z_d+Z_i)} \\ I_i &= \frac{-(Z_h+3Z)E}{Z_dZ_i+(Z_h+3Z)(Z_d+Z_i)} \\ I_h &= \frac{-Z_iE}{Z_dZ_i+(Z_h+3Z)(Z_d+Z_i)} \end{aligned} \right\} \tag{I.22}$$

Ainsi pour les tensions

$$\left. \begin{aligned} V_d = V_i &= \frac{Z_i(Z_h+3Z)E}{Z_d(Z_i+Z_h+3Z)+Z_i(Z_h+3Z)} \\ V_h &= \frac{Z_iZ_hE}{Z_d(Z_i+Z_h+3Z)+Z_i(Z_h+3Z)} \end{aligned} \right\} \tag{I.23}$$

Ces différentes grandeurs complexes sont représentées sur le schéma de la fig. (I.16).



**Fig.I.16** : Représentation complexe du défaut biphasé terre.

Détermination des composantes réelles des courants et tensions :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= 0 \\ I_2 &= \frac{-j\sqrt{3}(-aZ_i + Z_h + 3Z)E}{Z_d Z_i (Z_h + 3Z)(Z_d + Z_i)} \\ I_3 &= \frac{j\sqrt{3}(-a^2 Z_i + Z_h + 3Z)E}{Z_d Z_i (Z_h + 3Z)(Z_d + Z_i)} \\ I_{\text{terre}} &= I_1 + I_2 = -\frac{j3Z_i E}{Z_d Z_i (Z_h + 3Z)(Z_d + Z_i)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.24})$$

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{3Z_i(Z_h + 2Z)E}{Z_d Z_i (Z_h + 3Z)(Z_d + Z_i)} \\ V_2 = V_3 &= \frac{-3ZZ_i E}{Z_d Z_i (Z_h + 3Z)(Z_d + Z_i)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.25})$$

- si le défaut est franc ( $Z=0$ ) le courant de défaut biphasé terre sera :

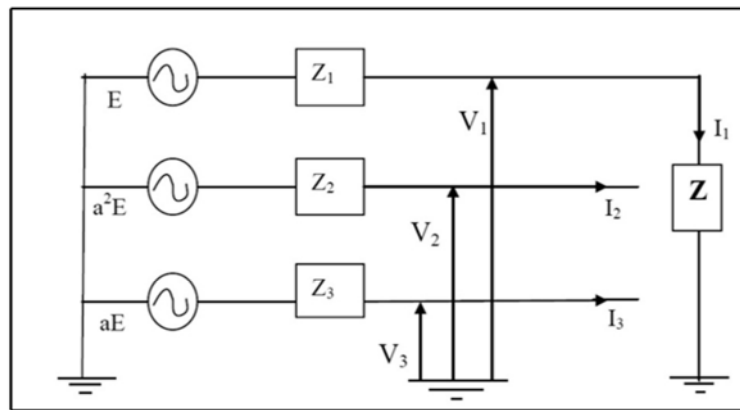
$$I_{\text{cc}} = \frac{-3Z_i E}{Z_d Z_h + Z_i Z_h + Z_d Z_i} \quad (\text{I.26})$$

- si le défaut est très résistif ( $Z \rightarrow \infty$ ) le courant de défaut sera :

$$I_2 = -I_3 = -\frac{j\sqrt{3}E}{Z_d + Z_i} \quad (\text{I.27})$$

### I.6.5. Court-circuit phase terre

Ce défaut survient lorsqu'une phase se retrouve accidentellement en contact avec une masse métallique reliée à la terre. Cette liaison à la terre peut avoir une certaine impédance que nous modéliserons par  $Z$  comme représentée sur la fig. (I.17). [5]



**Fig.I.17** : Court-circuit phase terre.

Pendant le défaut on a les équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{V_1}{Z} \\ I_2 &= 0 \\ I_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.28)$$

( $V_1 = 0$  quand  $Z=0$ )

En tenant compte des équations du système de composantes symétriques et celles des composantes réelles (I.2, I.3 ,I.4) on détermine les composantes symétrique des courants et tensions :

$$I_1=0 \text{ et } I_2=0 \Rightarrow I_h=I_i=I_d= \frac{I_1}{3} \quad (I.29)$$

$$\text{De même } I_1 = \frac{E}{Z+Z_1} \text{ avec } z_1 = \frac{Z_i+Z_h+Z_d}{3}$$

$$\text{Donc : } I_1 = \frac{3.E}{(3Z+Z_h+Z_i+Z_d)} \quad (I.30)$$

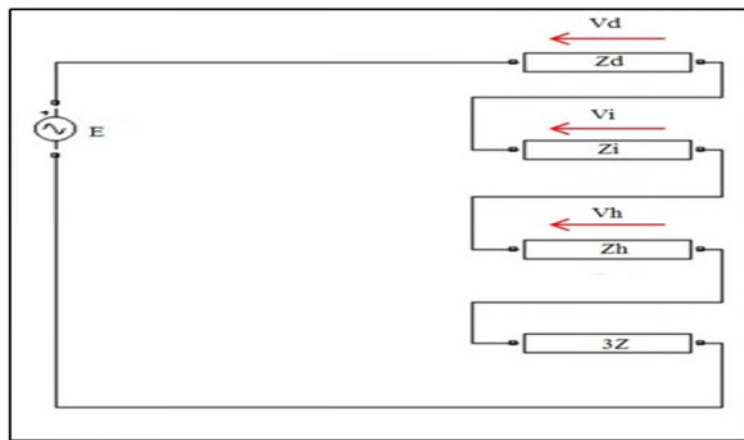
$$\text{De la relation (I.30) on déduit } I_d = I_i = I_h = \frac{E}{(3Z+Z_d+Z_i+Z_h)} \quad (I.31)$$



De l'équation (I-4) on tire les expressions des tensions  $V_d$ ,  $V_i$  et  $V_h$

$$\left. \begin{aligned} V_i &= -\frac{Z_i \cdot E}{(3Z + Z_d + Z_i + Z_h)} \\ V_h &= -\frac{Z_h \cdot E}{(3Z + Z_d + Z_i + Z_h)} \\ V_d &= \frac{(Z_i + Z_h + 3Z)E}{(3Z + Z_d + Z_i + Z_h)} \end{aligned} \right\} \quad (I.32)$$

Les résultats sont représentés sur le schéma de la fig. (I-18)



**Fig.I.18** : Représentation en composantes symétriques lors d'un défaut phase terre.

En fonction de ces expressions on déduit les valeurs réelles des courants et tensions :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{3E}{3Z + Z_d + Z_i + Z_h} \\ I_2 &= a^2 I_d + a I_i + I_h = 0 \\ I_3 &= a I_d + a^2 I_i + I_h = 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.33)$$

$$V_1 = \frac{3Z \cdot E}{3Z + Z_d + Z_i + Z_h} \quad (I.34)$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= a^2 V_d + a V_i + V_h \\
 &= E \frac{Z_i(a^2 - a) + Z_h(a^2 - 1) + 3a^2 Z}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z} \\
 V_2 &= a^2 E \left( 1 - \frac{Z_d + a^2 Z_i + a Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z} \right)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} V_2 \\ &= E \\ V_2 \end{aligned}} \right\} \quad (I.35)$$

$$\begin{aligned}
 V_3 &= a V_d + a^2 V_i + V_h \\
 &= E \frac{Z_i(a - a^2) + Z_h(a - 1) + 3aZ}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z} \\
 V_3 &= aE \left( 1 - \frac{Z_d + aZ_i + a^2 Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z} \right)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} V_3 \\ &= E \\ V_3 \end{aligned}} \right\} \quad (I.36)$$

Si le défaut est franc  $\Rightarrow Z=0$  on aura donc :

$$I_1 = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad (I.37)$$

$$V_1 = 0$$

Si le défaut est impudent  $\Rightarrow 3Z \gg (Z_d + Z_i + Z_h)$  alors

$$I_1 = \frac{E}{Z} \quad (I.38)$$

## I.7. Puissance de court-circuit

La puissance de court-circuit est trois fois le produit de la tension simple en régime sain et le courant de court-circuit. Elle est donnée comme suit :

$$S_{cc} = 3V_{1n} \cdot I_{cc} \quad (\text{VA}) \quad (I.39)$$

**I.8.Conclusion:**

Dans ce chapitre on a présenté les différents types de court-circuit et leur calcul avec la méthode des composantes symétriques.

On constate que les valeurs des courants de court-circuit dépendent des paramètres du réseau et des impédances de la terre.

En comparant les valeurs des différents types de court-circuit, on constate que le court-circuit triphasé est le plus sévère.

## Chapitre II

# INTERRUPTION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

## Introduction

L'interruption des courants électriques est une action indispensable à réaliser sur un circuit électrique afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens en cas de défaut (fonction de sécurité automatique), mais aussi pour contrôler la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique (commande volontaire). Il faut également pouvoir le rétablir dans diverses situations normales ou de défaut. Cette action est assurée par un appareil de coupure dont le choix dépend de la nature des courants à couper et du domaine d'application.

Que la coupure soit dans un circuit à courant continu ou à courant alternatif, pour les deux cas elle résulte des phénomènes électriques et des contraintes sévères sur le réseau et sur l'appareil de coupure.

Le présent chapitre explique le processus de la coupure et les phénomènes électriques liés à la coupure d'un courant électrique dans le cas d'un circuit à courant continu et dans le cas d'un circuit à courant alternatif et une attention particulière est donnée à la coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension.

### II.1.Nature du courant électrique

Il existe deux grands types de courants : le courant continu et le courant alternatif. Le premier a une forme plate alors que le second est périodique (fréquence) et a la forme sinusoïdale.

Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le réseau à courant alternatif s'est imposé dans le monde et ce pour plusieurs raisons, une efficacité bien meilleure dans la transformation des niveaux de tension (transformateurs) et une génération ainsi qu'une consommation bien plus naturelle en alternatif (roue des moulins ou des turbines) qu'en continu.

Sur les réseaux électriques actuels, le courant est donc alternatif. Il a la forme sinusoïdale dont la fréquence varie selon les pays et leurs normes en vigueur. Selon la fréquence du courant, l'appareillage présent sur les réseaux n'a pas tout à fait les mêmes caractéristiques. Par conséquent, comme ils ne sont pas soumis aux mêmes contraintes, les appareils de coupure n'auront donc pas non plus les mêmes capacités à couper un niveau de courant.

Précisons enfin qu'aujourd'hui, le courant continu revient petit à petit sur le devant de la scène avec le développement de centrales solaires par exemple.

Dans notre étude, nous nous intéresserons uniquement au phénomène d'interruption des courants alternatif à haute tension. [8]

## II.2.L'interruption des courants électriques

### II.2.1.Interruption d'un courant continu

On prend le cas le plus simple un circuit inductif (R, L) alimenté en courant continu voir la fig.(II.1).

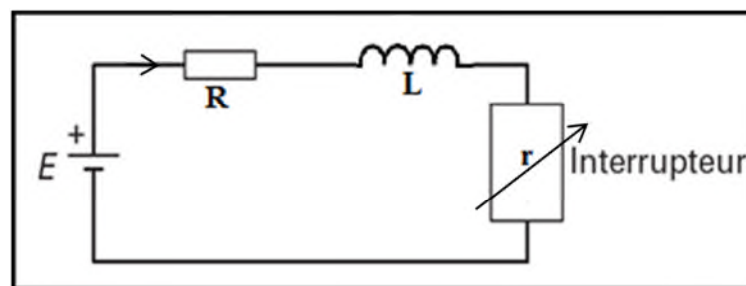


Fig.II.1: circuit LR en courant continu. [24]

- la loi d'Ohm qui régit le circuit pendant la phase transitoire est:

$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0 \quad (\text{II.1})$$

L'énergie de coupure est:

$$\int_0^T ri^2 dt = \int_0^T (E - Ri)idt - \int_i^0 Lidi \quad (\text{II.2})$$

Avec :

T: la durée de la coupure

r: la résistance de l'interrupteur (résistance variable).

E: la tension de la source

R: la résistance de circuit

L: l'inductance de circuit

i : le courant électrique

Cette énergie est constituée de deux types :

- Energie électrique qui dépend du temps de coupure:

$$\int_0^T (E - Ri)idt \quad (\text{II.3})$$

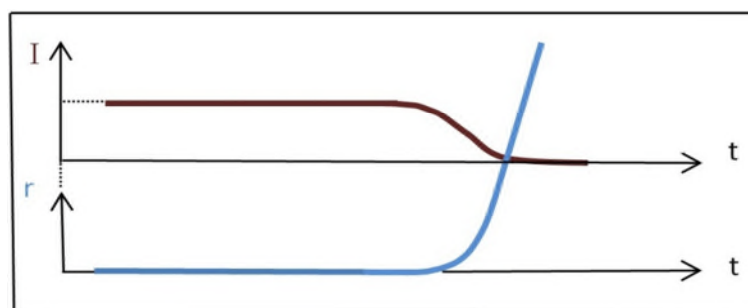
- Energie électromagnétique qui dépend du courant :

$$- \int_I^0 L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (\text{II.4})$$

Pour réaliser l'interruption du courant parcourant ce circuit, il faut que la résistance  $r$  de l'interrupteur est supposée initialement nulle, croie et devienne infinie, en d'autres termes, il faut que sa conductance diminue puis s'annule.

Lorsque cette condition unique est réalisée, l'appareil devenu isolant n'est plus traversé par aucun courant.

La variation de la résistance de l'interrupteur en fonction de l'évolution du courant de coupure est représentée sur la fig.(II.2). [24]



**Fig.II.2** : Variation des paramètres  $I, r$  en fonction de temps [24].

Cependant, même si cette variation est infiniment rapide on constate qu'il faut néanmoins dépenser dans l'interrupteur la totalité de l'énergie électromagnétique emmagasinée initialement dans l'inductance propre du circuit, soit  $\frac{1}{2} L i^2$ .

Cette constatation logique est absolument essentielle dans les problèmes d'interruption des courants continus ; un critère minimal de bon fonctionnement est donc que l'interrupteur doit pouvoir absorber sans dommage cette énergie, qui est souvent considérable.

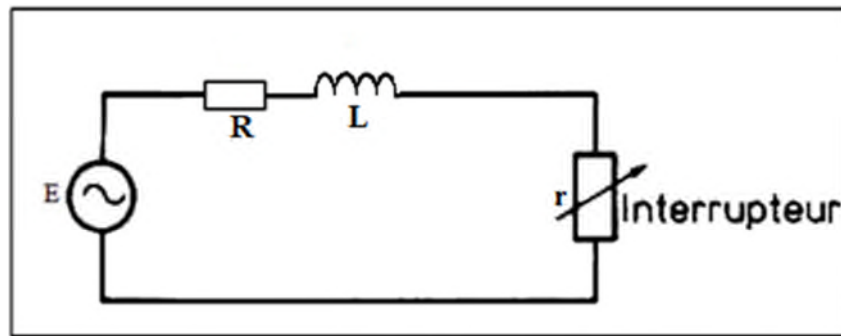
Ce critère, s'il est primordial, n'est pas le seul. il en existe au moins un autre d'importance .si en effet, la variation de résistance est infiniment rapide ,celle du courant l'également et ,en conséquence, la force électromotrice induite  $L \frac{di}{dt}$  dans l'inductance propre du circuit devient infiniment grande. cette surtension illimitée est évidemment inadmissible.

Dans la pratique, il faut donc se fixer une limite à ne pas dépasser pour la valeur de la surtension. une fois cette définie .la loi de variation de la résistance se trouve impose et le problème est théoriquement résolu. l'énergie déposée au cours de la coupure est alors supérieur à l'énergie électromagnétique du circuit sans dépasser généralement le double de cette valeur.

### II.2.2. Interruption d'un courant alternatif

On prend le cas le plus simple un circuit inductif (R, L) alimenté en courant alternatif

Comme le montre la fig.(II.3)



*Fig.II.3 : Circuit R L en courant alternatif [24].*

Un appareil de coupure idéal serait un appareil capable d'interrompre le courant instantanément, or aucun appareil mécanique n'est capable de couper le courant sans l'aide de l'arc électrique qui dissipe l'énergie électromagnétique du circuit électrique, limite les surtensions, mais retarde la coupure totale du courant.

#### II.2.2.1. Couper avec l'arc électrique

Deux raisons expliquent l'existence d'un arc :

Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro naturel de courant du fait de l'incertitude mesure commande: (pour une valeur efficace de 10 kA, le courant instantané 1 ms avant d'atteindre son zéro vaut encore 3000 A). La surtension instantanée  $L \frac{di}{dt}$  qui apparaîtrait aux bornes de l'appareil si celui-ci devenait immédiatement isolant serait infinie et entraînerait le claquage immédiat de l'espace intercontacts encore faible. [7]

La séparation des contacts doit se faire à une vitesse suffisante pour que la tenue diélectrique entre les contacts soit supérieure à la tension transitoire de rétablissement. Cela nécessite une énergie mécanique proche de l'infini qu'en pratique, aucun appareil ne peut fournir. [7]



### II.3. Les contraintes dues à l'interruption

L'action d'interruption de courant a des conséquences indésirables sur l'appareil de connexion lui-même, ce dernier est chargé de réaliser l'action d'une part et le réseau électrique d'autre part. [25, 26]

Ces conséquences donnent à l'interruption une difficulté pour la réaliser, la réussir et la maîtriser. Elles peuvent être résumés comment suit:

- les surtensions dans le réseau dues aux manœuvres ;
- les oscillations de la tension et de courant du réseau ;
- des chutes de tension supplémentaires dans le réseau ;
- des pertes de puissance dans le réseau ;
- un déséquilibre du réseau dans le cas où la coupure est réussie pour les deux phases et la troisième est fermée, ou un décalage de temps entre les manœuvres d'ouverture des trois phases ;
- la naissance d'arc électrique entre les contacts du disjoncteur ;
- la puissance dissipée dans l'arc par effet joule est importante et difficile de la refroidir ;
- l'arc donne une grande vitesse de d'ionisation du milieu de coupure ;
- la continuité de courant entre les contacts lors de la coupure, qui est assurée par l'arc.

### II.4. Localisation des défauts

#### II.4.1. Les défauts aux bornes du disjoncteur

C'est dans ces conditions que le courant de court-circuit est le plus important car il n'est limité que par les impédances situées en amont de l'appareil. Bien que ce type de défaut soit très rare, c'est celui qui est retenu pour la spécification des disjoncteurs en haute tension. [7]

#### II.4.2. Le défaut en ligne

Ce type de défaut est plus fréquent que le précédent sur les réseaux aériens, mais en haute tension, les caractéristiques d'arc des disjoncteurs et des liaisons disjoncteurs, câbles, lignes font que la contrainte est inférieure à celle provoquée par un court-circuit aux bornes.

En haute tension ce type de court-circuit nécessite des essais particuliers pour les défauts proches car les phénomènes de réflexion d'ondes provoquent des tensions transitoires de rétablissements très contraignantes. [7]

## II.5. Conditions nécessaires pour réussir la coupure

Tout le problème de coupure d'un courant alternatif va résider dans la vitesse d'extinction de l'arc naît entre les contacts, la perte de la conductance du courant entre les contacts et la reprise des propriétés initiales du milieu entre les contacts pour devenir rapidement isolant.

Pour cela, il faut assurer la vérification de quelques conditions par le dispositif d'interruption de courant alternatif.

- Choisir un appareil caractérisé par des valeurs assignées supérieures aux valeurs des contraintes exercées à l'endroit où il sera installé ;
- Minimiser l'énergie et l'intensité de l'arc au moment de la coupure, en réalisant la coupure lors d'un passage naturel du courant par zéro ;
- La coupure au passage par zéro du courant s'accompagne de surtensions au moment de l'interruption qui surviennent à cause de l'effet capacitif des circuits électriques ;
- Un milieu avec une conductivité thermique importante en particulier dans la phase d'extinction pour évacuer l'énergie thermique de l'arc (conductivité thermique) ;
- Un milieu qui retrouve ses propriétés diélectriques le plus vite possible afin d'éviter un réamorçage intempestif ;
- A température élevée, un milieu qui soit un bon conducteur électrique pour réduire la résistivité de l'arc et dissiper son énergie emmagasinée (conductivité électrique) ;
- A température faible, un milieu qui soit un bon isolant électrique pour faciliter le rétablissement de la tension ;
- Un milieu qui ne va pas engendrer des réactions indésirables, lors de la présence d'un arc électrique (développer des rayons dangereux, explosion ...). [26, 28]

## II.6. Coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau HT

La coupure se décompose en trois phases :

- une période d'attente du passage par zéro du courant,
- une période d'extinction,
- une période de rétablissement

La loi qui régit l'évolution du courant de court-circuit  $i_{cc}$  est :

$$\mathbf{E} - \mathbf{u} = \mathbf{R}i_{cc} + \mathbf{L} \frac{di_{cc}}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$\mathbf{u}$  est la tension d'arc entre les contacts du disjoncteur, elle est très faible devant la tension  $\mathbf{E}$  du générateur, dans le cas d'un disjoncteur SF<sub>6</sub> à haute tension car le milieu d'extinction qui est le

gaz SF<sub>6</sub> à une constante de désionisation très faible. Par conséquent la tension d'arc  $u$  ne modifie pas la valeur du courant de court-circuit (pas d'effet limiteur), ni le déphasage  $\varphi$  entre le courant et la tension.

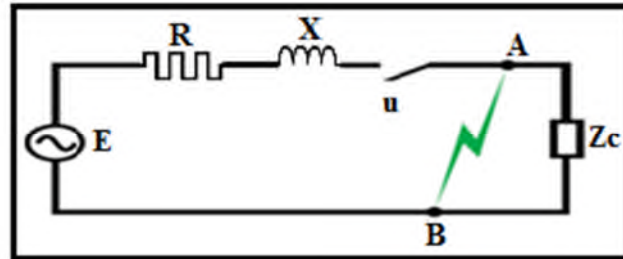


Fig.II. 4 : Schéma simplifié d'un réseau.

D'un autre côté, dans un réseau à haute tension l'inductance est prépondérante, donc la réactance  $X = L \omega$  joue le rôle principal et la résistance étant faible devant elle.

En négligeant la résistance  $R$  du circuit amont, on peut écrire:

$$u = L \frac{di_{cc}}{dt} \quad (\text{II.6})$$

La valeur crête du courant est obtenu par :

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}}{Z} \quad (\text{II.7})$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{II.8})$$

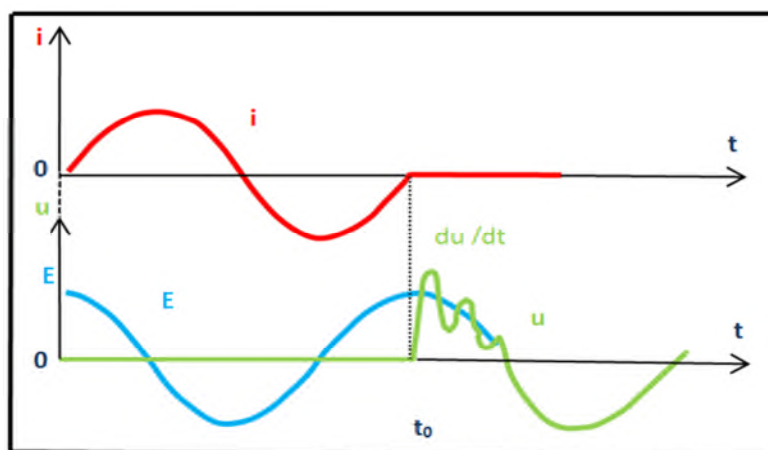
$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \approx \frac{R}{X} = \frac{R}{L\omega} \quad (\text{II.9})$$

Dans le cas d'un court-circuit le déphasage entre le courant et la tension est toujours très important ( $0,07 < \cos \varphi < 0,15$ ), car les réseaux sont essentiellement inductifs le déphasage entre le courant et la tension du générateur est voisin de  $\pi/2$ . Lorsque le courant passe par zéro la tension du réseau est à son maximum ou presque la tension s'inverse quand le courant passe par son maximum positif voir la fig (II.5).

Pour  $f=50\text{Hz}$  et  $\cos\varphi \approx 0,1$

$$\frac{L}{R} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$L/R$  est une caractéristique du réseau, c'est la constante de temps avec laquelle décroît la composante continue du courant de court-circuit.



*Fig.II.5 : Tension transitoire de rétablissement dans un circuit simple. [29]*

A l'instant de passage du courant par zéro, la résistance d'arc possède une valeur  $r_0$  (ou une conductance qu'on a noté  $g_0$  dans les chapitres III et IV).

A cet instant soit le succès ou l'échec de la coupure va dépendre fondamentalement de la tension  $u$  aux bornes de l'appareil et de la façon dont elle tend à rejoindre la f é m  $E$  du générateur.

## II.7. Les techniques de coupure en HT

Dès que l'on dépasse quelques centaines de volts et quelques dizaines d'ampères, la séparation des contacts dans l'air ne suffit pas pour couper le courant. Lorsque les contacts se séparent, le courant continu de passer à travers l'arc.

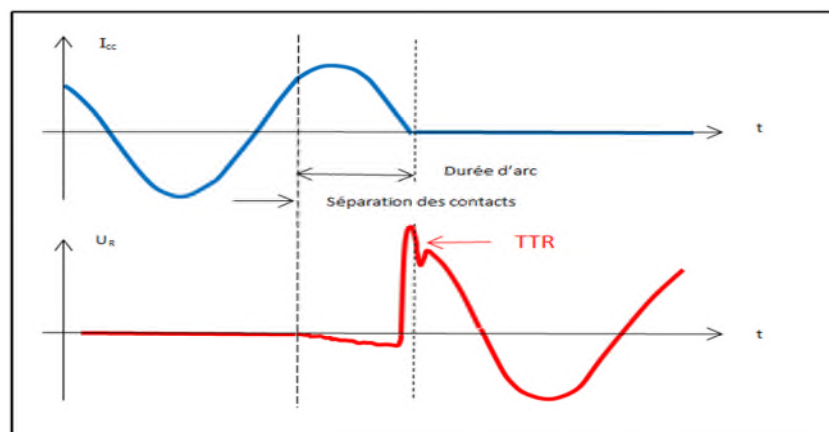
Après avoir caractérisé les courants à couper et les différentes contraintes sur un plan théorique, il faut exploiter quelques techniques, qui vont nous permettre de réussir et d'optimiser l'interruption du courant alternatif à haute tension. [27]

### II.7.1. Coupure au passage du courant par zéro

Avec la décroissance du courant, la température du noyau d'arc diminue, de ce fait, la conductivité électrique commence aussi à diminuer.

A l'approche du zéro de courant, les échanges thermiques entre la gaine de l'arc et son noyau deviennent très importants. Celui-ci disparaît entraînant la disparition de la conductivité.

Après un passage du courant par zéro l'arc sera éliminé, il faut l'empêcher de se rallumer. Pour cela, il sera obligé de renouveler continuellement le milieu isolant entre les contacts



**Fig.II.6 :** Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit [8].

Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro naturel de courant, du fait de l'incertitude d'appareil mesure-commande et il est aussi impossible d'accorder aux contacts une vitesse suffisante, pour une coupure au même moment du passage par zéro. Par conséquent la coupure est réalisable au voisinage du passage par zéro, afin de réduire l'intensité de l'arc et l'énergie de coupure.

### II.7.2. Répartition de la coupure dans des chambres en séries

Ce n'est pas économique de développer un modèle de chambre de coupure pour chaque combinaison des valeurs de tensions, de courant permanent et de courant de court-circuit. de plus, il faudrait pour vérifier leurs performances de coupure, des moyens d'essais considérables, voire irréalisables. Les constructeurs ont donc été conduits à concevoir des éléments de base et à les combiner pour répondre aux besoins.

Il est possible, en particulier, d'assembler des chambres de coupure en série dans chaque pôle à condition que :

- Leurs manœuvres soient simultanées (à quelques millisecondes près) ;
- La tension soit répartie judicieusement entre elles.

Cette technique est utilisée lorsque la capacité naturelle de la chambre de coupure est insuffisante à supporter la tension, on peut assembler des chambres de coupure en série et ajouter des condensateurs (pilotes) en parallèle avec les chambres.

## II.8. Caractéristiques assignées des disjoncteurs à haute tension

Les courts-circuits triphasés sont rares (5% des cas) mais servent de référence pour les essais car ces courants de court-circuit et la tension transitoire de rétablissement TTR sont plus élevés que pour des défauts monophasés ou biphasés.

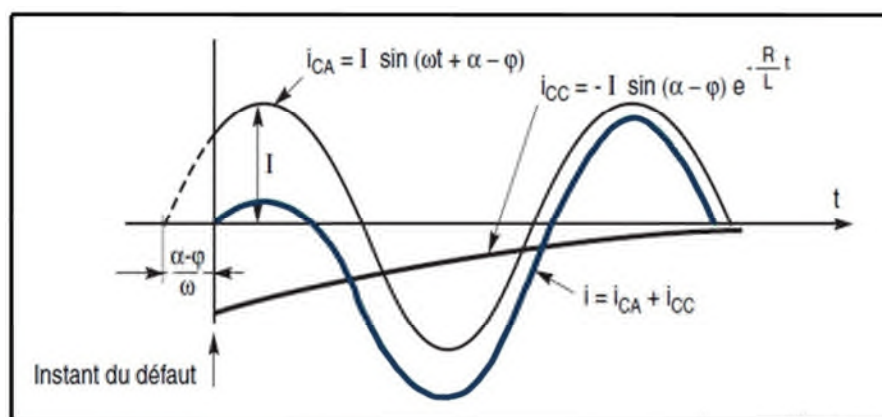
### II.8.1. Le pouvoir de coupure

Il est caractérisé par trois valeurs :

- la valeur efficace de sa composante périodique.
- le pourcentage de la composante apériodique par rapport à la composante périodique.
- la durée entre la détection du défaut et l'instant de séparation des contacts du disjoncteur. [6]

Le courant de court-circuit est la somme de deux composantes; périodique et apériodique présentées sur la fig.(II.7), il faut le couper avant de perturber le réseau.

Le pouvoir de coupure assigné est la valeur la plus élevée du courant de court-circuit (le cas court-circuit triphasé car il est le plus violent) que le disjoncteur doit être capable d'interrompre dans les conditions d'emploi et de fonctionnement fixées par la norme CEI60056.



**Fig.II.7 :** La forme du courant prise en considération pour le pouvoir de coupure.

### II.8.2. Le pouvoir de fermeture assigné

Pendant une manœuvre d'établissement sous tension, l'arc s'amorce entre contacts avant même que ces contacts se touchent.

L'arc s'interrompt au moment de l'entrée en contact. L'intervalle de temps pendant lequel un arc de pré-amorçage subsiste s'appelle la durée de pré-arc.

Lors d'une fermeture sur court-circuit, le contact mobile doit vaincre la pression des gaz chauds de l'arc de pré-amorçage, l'effort de répulsion des contacts, puis l'effort de pénétration dans les contacts fixes.

L'énergie nécessaire à l'enclenchement sur court-circuit est donc toujours supérieure à celle de l'enclenchement à vide.

Cette énergie étant en grande partie prélevée sur l'énergie cinétique des parties mobiles, cette dernière doit avoir une valeur suffisante pour que la vitesse d'entrée en contact reste suffisante. En effet, une diminution de la vitesse de fermeture entraîne une augmentation de la durée du pré-amorçage et donc de l'énergie générée par l'arc de pré-amorçage.

Le pouvoir de fermeture est égal au produit de la valeur efficace de la composante périodique du pouvoir de coupure en court-circuit par les facteurs suivants :

- 2,5 : pour une fréquence assignée de 50 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.
- 2,6 : pour une fréquence assignée de 60 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.
- 2,7 : pour toutes les valeurs de la constante de temps des applications particulières.

La norme CEI 60056 impose de vérifier le pouvoir de fermeture sur court-circuit d'un disjoncteur dans deux situations critiques qui sont censées couvrir tous les cas possibles en service :

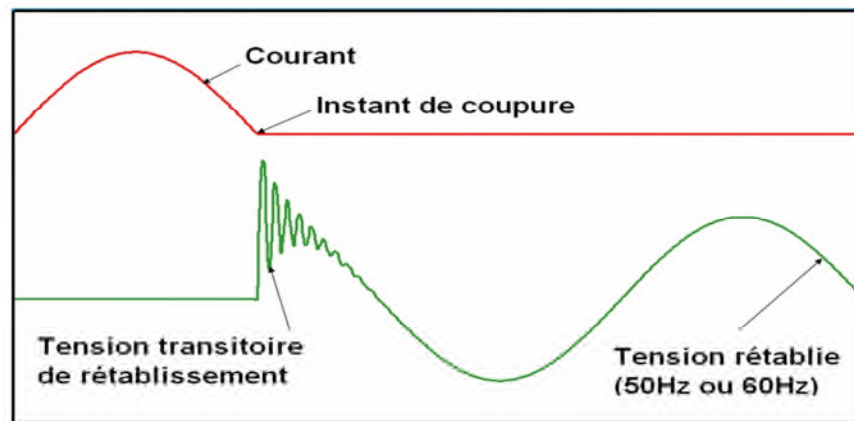
- établir un courant totalement asymétrique, c'est-à-dire lorsque l'instant d'établissement du courant s'effectue à un zéro de tension ;
- établir un courant symétrique avec une durée de pré-amorçage maximale; dans ce cas, l'établissement du courant doit se faire au voisinage d'une valeur crête de tension.

La vérification de l'établissement du courant totalement asymétrique peut se faire sous une tension réduite, soit en triphasé, soit en monophasé, en disposant un pôle en série avec les deux autres en parallèle. [6]

### II.8.3. La tension transitoire de rétablissement

La tension transitoire de rétablissement est la tension électrique qui se rétablit aux bornes d'un appareillage électrique lorsqu'il interrompt un courant alternatif. C'est un paramètre qui influe fortement sur la réussite d'une coupure de courant dans un réseau à haute tension.

Après le passage par zéro du courant, la conductance du milieu n'est pas totalement nulle et la tension aux bornes du disjoncteur varie très rapidement. Cette tension transitoire de rétablissement impose la circulation d'un très faible courant entraînant une dissipation de l'énergie par effet joule.



*Fig.II.8: tension transitoire de rétablissement.*

## II.9. Processus de coupure avec un arc électrique

En courant alternatif l'onde du courant s'inverse à chaque alternance, le processus de coupure avec un arc électrique se fait en trois périodes :

- la période d'attente,
- la période d'extinction,
- la période post-arc.

### II.9.1. La période d'attente

C'est la période entre l'ouverture des contacts et le zéro du courant. Dès la séparation des contacts, il y a rupture diélectrique du milieu intercontacts et l'apparition de l'arc électrique.



L'arc est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne reste conductrice tant que sa température est suffisamment élevée. L'arc est ainsi « entretenu » par l'énergie qu'il dissipe par effet Joule.

La tension qui apparaît entre les deux contacts du fait de la résistance de l'arc s'appelle la tension d'arc ( $u$ ).

Sa valeur, qui dépend de la nature de l'arc, est influencée par l'intensité du courant et par les échanges thermiques avec le milieu.

Ces échanges thermiques qui se font par rayonnement, convection et conduction sont caractéristiques de la puissance de refroidissement de l'appareil.

Le rôle de la tension d'arc est essentiel car elle conditionne la puissance dissipée dans l'appareil au cours de la coupure :

$$w = \int_{t_0}^{t_{arc}} u \cdot i dt \quad (\text{II.10})$$

Où

$t_0$  : est l'instant d'initiation de l'arc;

$t_{arc}$  : est l'instant de la coupure.

En moyenne tension et haute tension, elle reste toujours très inférieure aux tensions de réseau et n'a donc pas d'effet limiteur. La coupure se fait donc au voisinage du zéro « naturel » du courant alternatif. [23]

### II.9.2.La période d'extinction

Au moment de passage par zéro du courant, l'arc sera éteint, et le milieu entre les contacts commence à redevenir isolant et le courant d'arc s'annule. Cela est réalisable si la puissance de refroidissement développée par le disjoncteur et exercée sur l'arc électrique est suffisante (la puissance de refroidissement est supérieure à puissance fournie par l'arc par effet Joule).

Au voisinage du zéro de courant, la résistance de l'arc augmente selon une courbe qui dépend principalement de la constante de temps de désionisation du milieu intercontacts

Au zéro de courant, cette résistance à une valeur qui n'est pas infinie et un courant post-arc traverse encore l'appareil du fait de la tension transitoire de rétablissement qui apparaît à ses bornes.

- Si la puissance dissipée par effet joule dépasse la puissance de refroidissement caractéristique de l'appareil, le milieu ne se refroidit plus, c'est l'emballement thermique suivi d'une nouvelle rupture diélectrique : c'est un échec thermique.
- Si en revanche la croissance de la tension n'excède pas une certaine valeur critique, la résistance de l'arc peut augmenter suffisamment vite pour que la puissance dissipée dans le milieu reste inférieure à la puissance de refroidissement de l'appareil évitant ainsi l'emballement thermique.

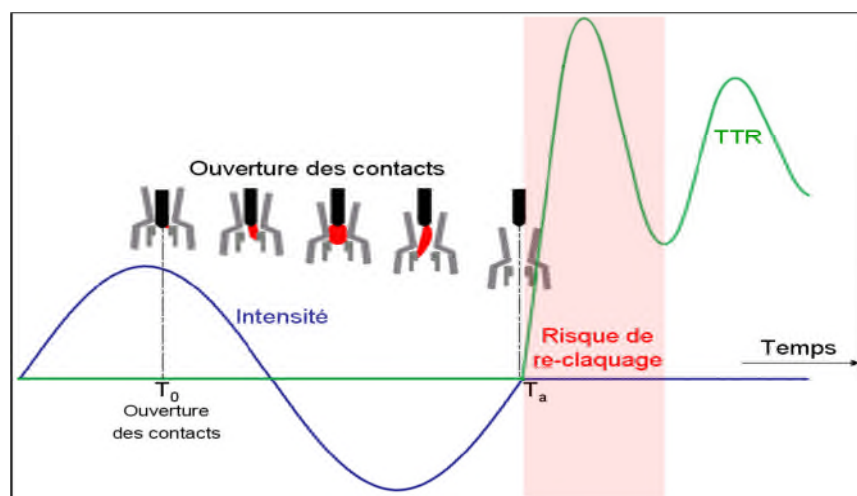
### II.9.3. La période Post-Arc

Pour que la coupure soit réussie, il faut que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que celle l'évolution de la tension transitoire de rétablissement TTR, sinon un claquage diélectrique apparaît voir la figure (II.9). [7]

A l'instant où se produit la rupture diélectrique, le milieu redevient conducteur.

Ces échecs diélectriques post-coupure sont appelés :

- réallumages, s'ils ont lieu dans le quart de période qui suit le zéro de courant,
- réamorçages, s'ils se produisent après. [23]



**Fig.II.9** : Caractéristiques de l'intensité et de la TTR lors d'une phase d'ouverture des contacts. [22]

### II.10. Importance de la constante de temps de désionisation

Si on modélise l'interrupteur et plus spécifiquement l'arc électrique dans un disjoncteur SF<sub>6</sub> haute tension par le modèle de Mayr, on peut écrire :

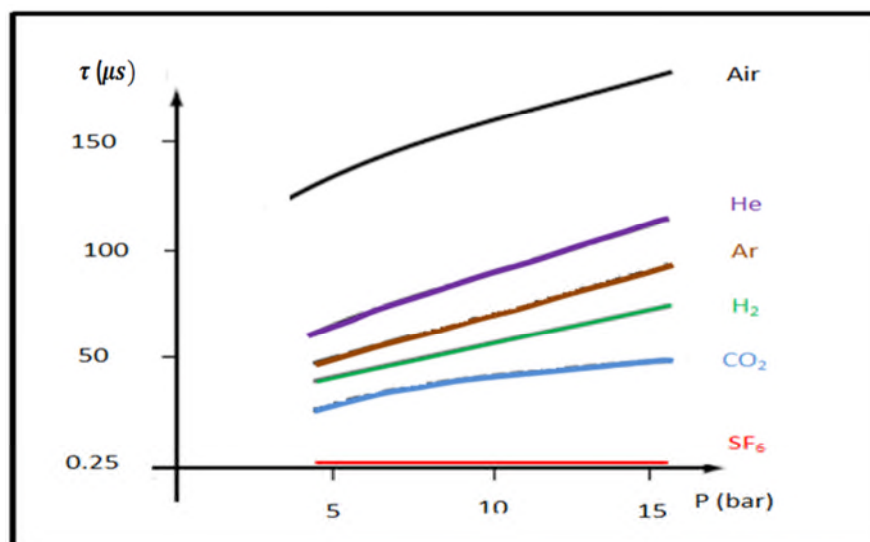
$$\frac{dr}{dt} = \frac{r}{\tau} \left( 1 - \frac{ui}{P_0} \right) \quad (\text{II.11})$$

Lorsque  $i = 0$   $\frac{dr}{dt} = \frac{r_0}{\tau}$

Plus  $\tau$  est faible, plus la variation de la résistance de l'arc est grande. la résistance augmentera plus rapidement et l'appareil pourra faire face à une plus grande vitesse de croissance de la TTR. On peut dire que plus  $\tau$  est faible dans un réseau industriel, moins on court le risque de l'échec de la coupure.

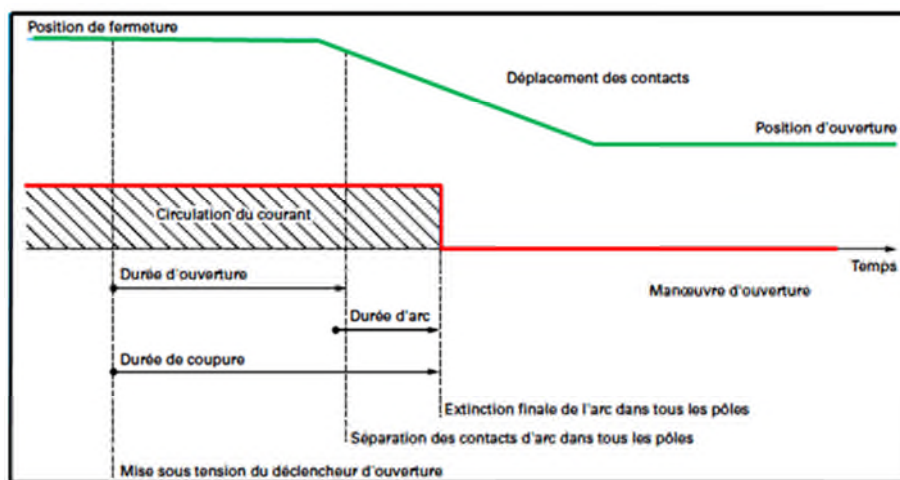
Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure utilisant divers milieux de coupure l'air, l'huile, le vide et le SF<sub>6</sub>. Si la coupure dans l'air ou l'huile a tendance à disparaître, il n'en va pas de même de la coupure dans le vide ou le SF<sub>6</sub>, généralement en haute tension la coupure s'effectue dans le SF<sub>6</sub>.

Le gaz SF<sub>6</sub> est caractérisé par une constante de désionisation la plus faible, autrement dit par une vitesse très grande de régénération du milieu de coupure. [29]



*Fig.II.10: Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz. [23]*

La figure (II.11) montre la durée de coupure d'un courant alternatif qui varie selon la fréquence de courant, elle varie entre la réception d'un signal d'ouverture des contacts et l'extinction finale de l'arc.

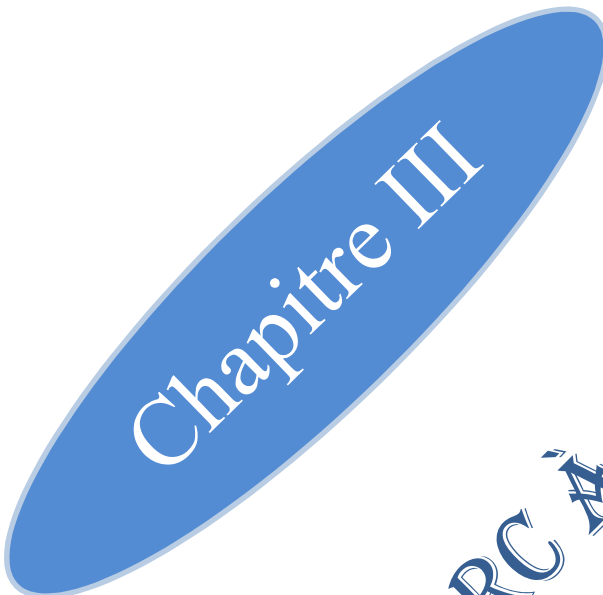


*Fig.II.11 : L'évolution et la durée de l'arc dans la phase ouverture du disjoncteur.*

## Conclusion

A travers ce chapitre on a étudié l'interruption d'un courant continu et d'un courant alternatif. On a donné une attention particulière au processus de coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension.

On conclut que la réussite ou l'échec de la coupure, dépend des contraintes électriques appliquées à l'appareil de coupure et des caractéristiques du milieu de coupure. Les disjoncteurs haute tension utilisant le gaz SF<sub>6</sub> comme milieu de coupure sont les plus fiables grâce à ses propriétés remarquables extincitives de l'arc.



Chapitre III

**LES MODÈLES D'ARC À BOITE NOIRE**

## **Introduction**

La modélisation de l'arc a été l'objet de recherche et de travail de plusieurs scientifiques, pour bien décrire le comportement dynamique de l'arc dans les disjoncteurs HT par un modèle d'équation mathématique afin de maîtriser l'interruption des courants de défauts dans les réseaux électriques à haute tension.

### **III.1. Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique**

Plusieurs hypothèses ont été supposées sur le comportement de l'arc afin de lui donner un modèle mathématique décrivant son évolution, on peut les classer en trois types :

#### **III.1.1. Les modèles diélectriques et thermiques**

Ces modèles sont basés sur la description de l'évolution de l'arc par rapport à la variation en fonction du temps de :

- ses dimensions (section, longueur) ;
- sa température ;
- la vitesse d'ionisation du milieu environ gazeux ;
- la pression et le volume du milieu environ gazeux ;
- l'influence de rayonnement lumineux émis par l'arc sur le gaz environ.

#### **III.1.2. Les modèles empiriques**

Sont des équations mathématiques qui décrivent l'évolution dynamique de l'arc sans un sens physique, ils sont basés sur une très longue expérience dans le domaine et la réalisation d'un grand nombre des essais expérimentaux.

#### **III.1.3. Les modèles à boîte noire**

Ce sont des modèles qui décrivent l'arc comme une composante électrique non linéaire variable en fonction de temps et en fonction de plusieurs paramètres tels que:

- le courant de l'arc ;
  - la tension de l'arc ;
  - la puissance électrique ;
  - la conductance et la résistance du milieu environ ;
- dans notre travail a boîte noire.

## III.2. Représentation des modèles d'arc à boîte noire

Les modèles d'arc à boîte noire sont exprimés mathématiquement par une formule de la résistance ou de la conductance variable avec le temps, en fonction du courant et de la tension de l'arc et de plusieurs paramètres.

La majorité de ces modèles sont représentés par une équation différentielle du premier ordre de la forme :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u i}{P} - 1 \right) \quad (\text{III.1})$$

$g$ : la conductance de l'arc ;

$u$  : la tension de l'arc ;

$i$  : le courant de l'arc ;

$\tau$ : la constante de temps de désionisation ;

$P$  : la puissance de refroidissement ou la puissance évacuée de l'arc.

Pour ces modèles ( $\tau$  et  $P$ ) sont décrits comme des paramètres indépendants du modèle d'arc à boîte noire.

## III.3. Les modèles de base

Historiquement les modèles d'arc à boîte noire avaient une base physique, les premières descriptions du comportement de l'arc ont été données par le modèle Cassie (1939) et par le modèle de Mayr (1943).

### III.3.1. Le modèle de Mayr

Mayr supposa que l'arc est assimilable à un cylindre de rayon constant et température variable et que l'évacuation d'énergie est due à la conduction thermique.

Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses.

#### III.3.1.1. Première hypothèse

La conductance  $g$  de l'arc est une fonction de l'énergie  $w$  de l'arc:

$$g = F(w) \quad (\text{III.2})$$

Cela signifie qu'à une valeur  $w$  de l'énergie, il ne correspond qu'une seule valeur de la conductance  $g$ . Ce n'est pas tout à fait exact mais il n'y a pas une différence fondamentale entre la réalité et cette hypothèse qui est nécessaire au traitement analytique du problème.

En dérivant les deux membres de la relation (III-2) par rapport au temps nous aurons:

$$\frac{dg}{dt} = F(w) \frac{dw}{dt} \quad (\text{III.3})$$

La puissance fournie à l'arc par effet Joule est  $Ri^2$ . La puissance cédée par l'arc au milieu environnant est (P), on l'appelle aussi puissance de refroidissement.

A chaque instant l'une et l'autre peuvent varier, la puissance accumulée dans l'arc est donc.  $(ri^2 - P)$

Pendant l'intervalle de temps  $dt$ ,  $(Ri^2 - P)$  correspond à la variation d'énergie  $dw$  dans l'arc,

$$d'où : \frac{dw}{dt} = Ri^2 - P \quad (III.4)$$

L'équation (III.3) devient:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{F'(w)}{F(w)} (Ri^2 - P) \quad (III.5)$$

### III.3.1.2. Deuxième hypothèse

$F(w)$  est supposée une fonction exponentielle:

$$F(w) = g = K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (III.6)$$

$w_0$ : coefficient constant qui représente la quantité d'énergie qu'il faut apporter à l'arc pour que sa conductance soit multipliée par  $e$  ( $e = 2,71828$ ). À l'inverse si on retire une énergie ( $w_0$ ) à l'arc, sa conductance sera divisée par  $e$ .

$K$ : exprime la valeur absolue de la conductance.

La dérivée de la relation obtenue, par rapport à l'énergie ( $w$ ) donne :

$$F'(w) = \frac{1}{w_0} K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (III.7)$$

d'où

$$\frac{F'(w)}{F(w)} = \frac{1}{w_0} \quad (III.8)$$

### III.3.1.3. Troisième hypothèse

La puissance de refroidissement est supposée constante et égale à  $P_0$  et compte tenu de la relation (3-8), la relation (3-5) devient:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{w_0} (ri^2 - P_0) = \frac{P_0}{w_0} \left( \frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) \quad (III.9)$$

$\tau = \frac{w_0}{P_0}$ , la constante de temps de d'ionisation, l'équation (III.9) sera:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (III.10)$$

C'est l'équation de Mayr, elle exprime le comportement dynamique de l'arc.



D'après la relation (III-9), il devait exister une variation linéaire de  $\left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dt}\right)$  en fonction de la puissance fournie à l'arc ( $\mathbf{u} \mathbf{i}$ ) par effet de Joule puisque  $(\boldsymbol{\tau}$  et  $\mathbf{P}_0)$  sont considérés comme des constantes, mais la réalité expérimentale est différente, car  $(\boldsymbol{\tau}$  et  $\mathbf{P}_0)$  ne restent pas constantes durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc [09].

### III.3.2. Le modèle de Cassie

Ce modèle fut apparu en 1939, Cassie supposa que le plasma de l'arc est un cylindre de rayon variable et de température constante et que les pertes d'énergie ne sont dues qu'à la convection et sont proportionnelles à la section de l'arc. Cassie a déduit l'équation suivante:

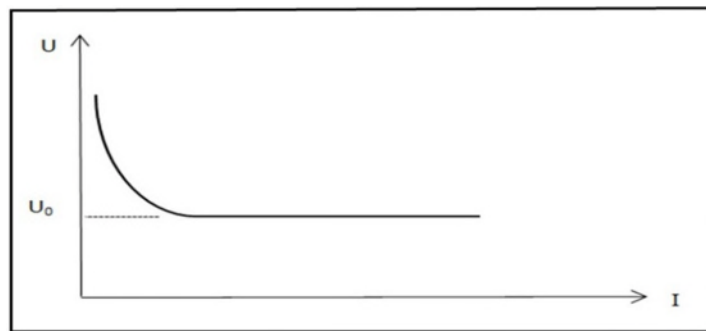
$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (\text{III.11})$$

$U_0$  : la tension statique de l'arc, elle est indépendante de l'intensité du courant Fig.(III.1)

La courbe  $\left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dt}\right)$  en fonction de  $(\mathbf{u}^2)$  devrait être une droite ( $\boldsymbol{\tau}$ ,  $\mathbf{U}_0$ ) constantes dont

l'intersection avec les axes permettrait de déterminer ( $\boldsymbol{\tau}$  et  $\mathbf{U}_0$ ).

Constantes dont l'intersection avec les axes permettrait de déterminer ( $\boldsymbol{\tau}$  et  $\mathbf{U}_0$ ).



*Fig.III.1: Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.*

Ce modèle présente des écarts assez importants avec les résultats expérimentaux, car les pertes ne sont pas uniquement dues à la convection et que l'hypothèse d'une température constante est loin d'être vérifiée. [09]

Pour des valeurs élevées du courant, la tension de l'arc reste sensiblement constante et égale à ( $\mathbf{U}_0$ ), elle prend une forme hyperbolique aux faibles courants, pour cette raison on dit que ce modèle s'applique aux régions de l'arc à fortes intensités.

### III.3.3. Comparaison des deux modèles

*Tab. III.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie.*

Les criteres	Modele de Mayr	Modele de Cassie
La conductance de l'arc	Par variation du degré des-ionisation	Par variation du diametre de l'arc
Poste de chaleur	Par conduction thermique	Par convection thermique
Expression dynamique	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u i}{P_0} - 1 \right)$	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right)$
Adaptation	Régions des faibles courants	Régions des forts courants

On peut observer que:

- Chacun des deux modèles est décrit par deux paramètres seulement ;
- Les deux modèles donnent une description qualitative du comportement de l'arc et ne peuvent pas être utilisés pour des représentations quantitatives.

Par conséquent un grand nombre de modifications de ces équations a été formulé, plus de paramètres ont été introduits dans les équations de ces modèles, leur donnant ainsi une forme plus générale et rendant les paramètres plus adaptatifs. [10]

### III.4. Les modèles d'arc améliorés

Suivant les modifications proposées, les modèles de l'arc peuvent être divisés en plusieurs groupes:

- Combinaison des équations de Cassie et de Mayr ;
- Description de l'arc par plus de deux constantes ;
- Les paramètres de l'arc sont considérés comme des fonctions ;
- Division de l'arc en plusieurs parties en série ;
- Les modèles stochastiques.

Tous ces modèles gardent l'idée de base de la description du comportement de l'arc en utilisant les paramètres  $\tau$  et  $P$  avec différentes interprétations physiques. [10]

Les modèles d'arc améliorés les plus utilisés sont les suivants :

### III.4.1. Le modèle de Mayr modifié

C'est une version très répandue de l'équation de Mayr, la puissance de refroidissement est en fonction du courant de l'arc [10, 11, 12,13].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P_0 + U_0|i|} - 1 \right) \quad (\text{III.12})$$

La puissance de refroidissement peut être trouvée aussi avec la pression de remplissage ( $p$ ) qui dépend du disjoncteur:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P(P_0 + U_0|i|)} - 1 \right) \quad (\text{III.13})$$

$g$  : la conductance de l'arc ;

$u$  : la tension de l'arc ;

$I$  : le courant de l'arc ;

$\tau$  : la constante de temps de l'arc ;

$P$  : la pression de remplissage du disjoncteur ;

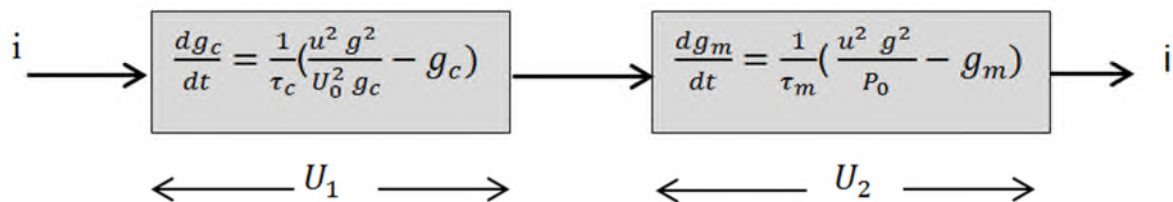
$P_0$  : la puissance de refroidissement ;

$U_0$  : le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique fig.(III.1).

Les paramètres indépendants de ce modèle sont ( $\tau$ ,  $P_0$  et  $U_0$ ).

### III.4.2. Le modèle de Habedank

L'arc est considéré comme une entité physique formée par deux composants en série, l'un est décrit par l'équation de Mayr et l'autre par l'équation de Cassie fig.(III.2). [12,13]



*Fig.III.2 : Le modèle de Habedank*

Les équations du modèle sont

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{u^2 g^2}{U_0^2 g_c} - g_c \right) \quad (\text{III.14})$$

et

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{u^2 g^2}{P_0} - g_m \right) \quad (\text{III.15})$$

Avec

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m}$$

$g$  : la conductance totale de l'arc ;

$u$  : la tension totale de l'arc ;

$i$  : le courant de l'arc ;

$U_0$  : le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique fig.(III.1) ;

$g_c$  : la conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie ;

$\tau_c$  : la constante de temps de Cassie ;

$P_0$  : la puissance de refroidissement de l'état statique de Mayr ;

$g_m$  : la conductance de l'arc décrite par l'équation de Mayr ;

$\tau_m$  : la constante de temps de Mayr.

Chaque équation contient deux paramètres, donc ce modèle à quatre paramètres indépendants à déterminer ( $\tau_c$ ,  $U_0$ ,  $\tau_m$  et  $P_0$ ).

### III.4.3. Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique. [14, 15, 16, 17]

La constante de temps et la puissance de refroidissement dépendent de la conductance de l'arc:

$$\tau = g^\alpha \tau_0 \quad , \quad P = g^\beta P_0.$$

L'équation de ce modèle est :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{g^\alpha \tau_0} \left( \frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (III.16)$$

$g$  : la conductance de l'arc ;

$u$  : la tension de l'arc ;

$i$  : le courant de l'arc ;

$\tau_0$  : la constante de temps de l'arc ;

$P$  : la puissance de refroidissement ;

$\alpha$  : le paramètre qui influe sur  $\tau$  en fonction de  $g$ .

$\beta$  : le paramètre qui influe sur  $P$  en fonction de  $g$ .

Avec ( $\alpha$  et  $\beta$ ) sont tous les deux, des paramètres expérimentaux constants.

Pour  $\alpha=0$  et  $\beta=1$  on aura le modèle de Cassie

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{ui}{g P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{u^2}{P_0} - 1 \right) \quad (III.17)$$

L'expression de la variation de ( $g$ ) en fonction de ( $u^2$ ).

Pour  $\alpha = \beta = 0$  on aura le modèle de Mayr

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (\text{III.18})$$

L'expression de la variation de ( $g$ ) en fonction de ( $u$ ) la puissance fournit à l'arc par effet de Joule.

Les quatre paramètres indépendants de ce modèle sont ( $\alpha$ ,  $\tau_0$ ,  $P_0$  et  $\beta$ ), ils varient suivant le disjoncteur et les conditions du circuit.

#### III.4.4. Le modèle de KEMA

C'est un modèle très récent constitué de trois sous-modèles en série. Les processus lents de l'arc sont représentés par un modèle hybride de Cassie-Mayr, les processus rapides sont décrits par un modèle de Mayr pur, tandis que les processus intermédiaires suivent un modèle presque Mayr. Fig.(III.3). [18, 19]

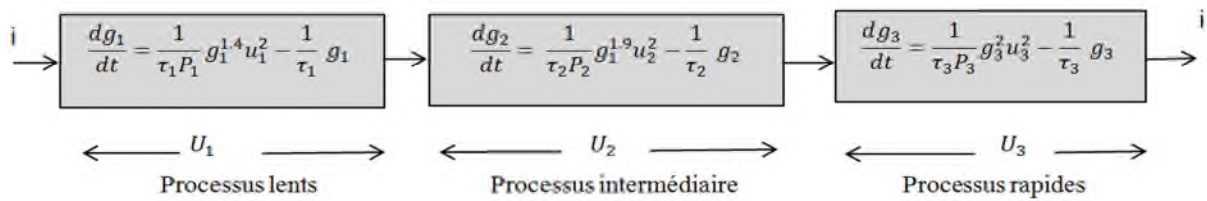


Fig.III.3 : Le modèle de KEMA.

Chaque sous-modèle est décrit par une équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{\tau_j P_j} g_j^{\lambda_j} u_j^2 - \frac{1}{\tau_j} g_j \quad (\text{III.19})$$

Pour  $j=1, 3$

$g_j$  : la conductance partielle de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc ;

$P_j$  : la puissance de refroidissement de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc ;

$\tau_j$  : la constante de temps de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc ;

$u_j$  : la tension partielle de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc ;

$i$  : le courant de l'arc ;

$\lambda_j$  : la commande Cassie-Mayr, de la  $j^{\text{ème}}$  portion de l'arc.

### III.4.4.1. Choix des sous-modèles

En se basant sur les résultats des mesures d'un grand nombre de tests :

- le premier sous-modèle a été choisi de type Cassie-Mayr ( $\lambda_1 = 1.4$ ) ;
- Le deuxième sous-modèle a été choisi presque du type Mayr ( $\lambda_2 = 1.9$ ) ;
- Le troisième sous-modèle a été choisi du type Mayr pur ( $\lambda_3 = 2$ ).

La conductance totale  $g$  de l'arc est :

$$\frac{1}{g} = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{g_j} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (\text{III.20})$$

La tension de l'arc est :

$$U = \sum_{j=1}^3 U_j = U_1 + U_2 + U_3 \quad (\text{III.21})$$

Le courant  $i$  est commun aux trois portions de l'arc :

$$i = g \cdot u = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_2 g_3 + g_1 g_3 + g_1 g_2} U \quad (\text{III.22})$$

### III.4.4.2. Les paramètres du modèle

Pour un disjoncteur donné, il existe une relation fixe entre quelques paramètres :

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{k_1} \qquad \tau_3 = \frac{\tau_2}{k_2} \qquad P_3 = \frac{P_2}{k_3}$$

( $k_1, k_2, k_3$ ) sont des paramètres constants propres à chaque disjoncteur.

Les paramètres ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) sont constants dans tous les tests.

D'où les paramètres indépendants du modèle sont ( $\tau_1, P_1, P_2$ ).

### III.4.5. Le modèle de Schavemaker

C'est le modèle le plus récent, avec le paramètre  $\tau$  constant et la puissance de refroidissement

en fonction de la puissance électrique d'entrée [16, 20, 21]

$$P = P_0 + P_1 ui \quad (\text{III.23})$$

$P_0$  : la puissance de refroidissement liée à la conception du disjoncteur ;

$P_1$  : la constante qui régularise l'influence de la puissance électrique d'entrée sur la puissance de refroidissement.

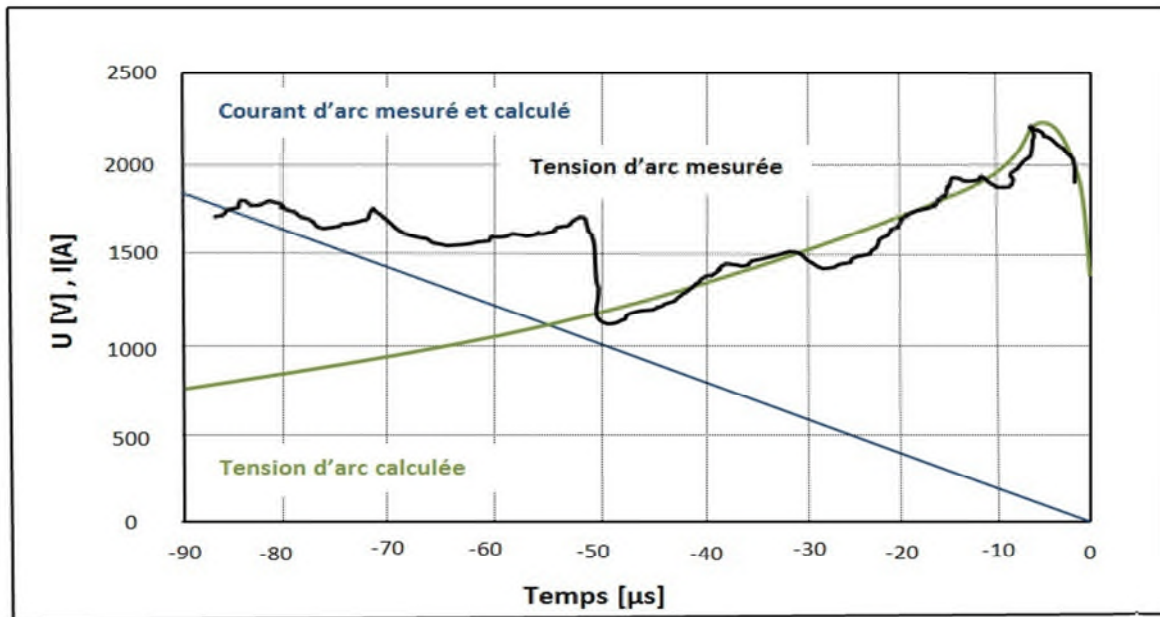
L'équation de modèle est alors :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P_0 + P_1 ui} - 1 \right) \quad (\text{III.24})$$

Les paramètres indépendants de ce modèle sont ( $\tau$ ,  $P_0$  et  $P_1$ ).

### III.4.5.1. Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts

Après avoir déterminé les paramètres du modèle décrit par l'équation (III.24), les courants et les tensions sont calculés en utilisant l'équation (III-24), puis ils sont comparés avec les tensions et les courants mesurés fig.( III.4).



**Fig.III.4 :** Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés. [20]

Le nouveau modèle d'arc reproduit bien les courants et les tensions mesurés, sauf dans le domaine des courants forts où les tensions d'arc calculées sont plus faibles que celles mesurées, cela a été amélioré de la manière suivante:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{\max(U_0|i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (\text{III.24})$$

$U_0$  la tension constante de l'arc dans le domaine des courants forts fig.( III.1).

#### ➤ Domaine des courants forts

L'équation (III-21) sera réduite à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u}{U_0} - 1 \right) \quad (\text{III.25})$$

Cette équation montre une claire conformité avec le modèle d'arc de Cassie qui a prouvé sa validité dans le domaine des courants forts.

### III.4.5.2. Domaine des courants faibles

#### III.4.5.2.1. Avant le zéro du courant

Les équations (III.22) et (III.23) seront réduites à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (\text{III.26})$$

C'est exactement le modèle de Mayr qui a prouvé sa validité dans la région du zéro du courant.

#### III.4.5.2.2. Après le zéro du courant

Le modèle de Mayr est retrouvé car on considère après l'extinction de l'arc que la constante  $P_1$  est nulle.

## III.5. Conclusion

Tous les modèles d'arc à boîte noire ont pour origine les deux modèles de base ; Cassie et Mayr. Les modèles d'arc à boîte noire améliorés cités dans ce chapitre ont prouvé relativement leur efficacité dans les domaines des courants faibles et dans les domaines des courants forts, cependant les modèles les plus récents de SCHAVEMAKER et KEMA sont une véritable innovation, ils sont appréciés par tous les chercheurs dans le domaine de la modélisation des disjoncteurs SF<sub>6</sub> haute tension, car ils expriment bien la dynamique de l'arc suite à l'introduction des paramètres indépendants propres à chaque domaine de courant d'arc.





Chapitre IV

*SIMULATION NUMERIQUE AVEC LE MODELE MAYR MODIFIE*

## Introduction

Les modèles d'arcs ont été initialement développés pour une meilleure compréhension du processus d'interruption de courant dans les disjoncteurs à haute tension et d'être en mesure de modéliser le comportement dynamique de l'arc électrique dans les chambres de coupure.

Le modèle de Mayr modifié a été développé en combinant les deux modèles de base ; le modèle de Mayr qui a prouvé son efficacité seulement dans le domaine des courants faibles et celui de Cassie qui a prouvé son efficacité seulement dans le domaine des courants forts de l'arc électrique.

Les phénomènes d'interruption d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension sont très compliqués, comme c'est décrit dans la partie théorique, la modélisation d'arc avec ce modèle et la simulation du processus de la coupure d'un courant de court-circuit nous aide à maîtriser ces phénomènes.

Dans ce travail on a choisi le modèle de Mayr modifié pour modéliser l'arc électrique dans le disjoncteur SF<sub>6</sub> haute tension.

Ce travail est constitué de trois étapes :

- La première étape est la conception d'un « interrupteur » basée sur les équations du modèle de Mayr modifié dans le Simulink de Matlab.
- la deuxième étape est la simulation du processus de la coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension en utilisant l'interrupteur qu'on a conçu.
- La troisième étape est une interprétation des résultats obtenus.

## IV.1.Conception du modèle

### IV.1.1.Description du modèle de Mayr modifié

Le modèle de Mayr modifié décrit l'évolution dynamique de l'arc par une équation mathématique donnant la variation de la conductance électrique dans le temps en fonction du courant et la tension de l'arc.

Le modèle de Mayr modifié s'exprime comme suit :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{p(P_0 + U_0|i)} - 1 \right) \quad (\text{IV.1})$$

Sachant que:

$g$  : la conductance de l'arc ;

$u$  : la tension de l'arc ;

$I$  : le courant de l'arc ;

$\tau$  : la constante de temps de l'arc ;

$p$ : la pression de remplissage du disjoncteur ;

$P_0$  : la puissance de refroidissement ;

$U_0$  : le pourcentage constant de la caractéristique u.i .

Les paramètres indépendants de ce modèle sont ( $\tau$ ,  $P_0$  et  $U_0$ )

#### IV.1.2.Mise en équation du modèle dans le Simulink

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{p(P_0+U_0|i)} - 1 \right) \quad (IV.2)$$

$$y = i = g \cdot u \quad (IV.3)$$

$$\frac{dg}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{gui}{p(P_0+U_0|i)} - g \right) \quad (IV.4)$$

$$\frac{du(3)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{u^2 g^2}{p(P_0+U_0|g \cdot u)} - g \right) \quad (IV.5)$$

$$\frac{du(3)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{u(3)^2 \cdot u(1)^2}{p(P_0+U_0|u(3) \cdot u(1))} - u(3) \right) \quad (IV.6)$$

Avec :

$$u(3) = g$$

$$y = i = u(3) \cdot u(1)$$

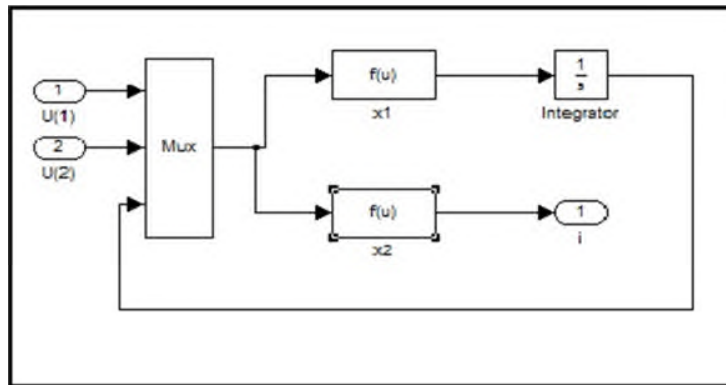
$U(3)$  : la première entrée est égale à la tension d'arc(u) ;

$U(2)$  : la deuxième entrée (états des contacts), représente la séparation des contacts de disjoncteur lorsque :

$$\begin{array}{l} u(1) = 0 \Leftrightarrow \\ u(2) = 1 \Leftrightarrow \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{les contacts sont fermés} \\ \text{les contacts sont ouverts} \end{array} \right.$$

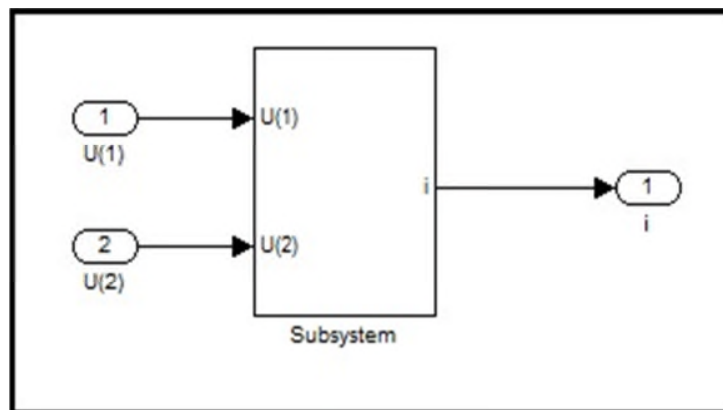
$u(3)$  : la variable d'état de l'équation différentielle de la conductance l'arc ( $g$ )

$x_0$  : la valeur initiale de la variable d'état, à savoir la valeur initiale de la conductance de l'arc  $g_0$



*Fig. IV.1 : Système d'équation modèle de Mayr Modifié.*

Puis, on crée le sous-système de ce système d'équation que montre la figure (IV.2) avec deux entrées et une sortie.



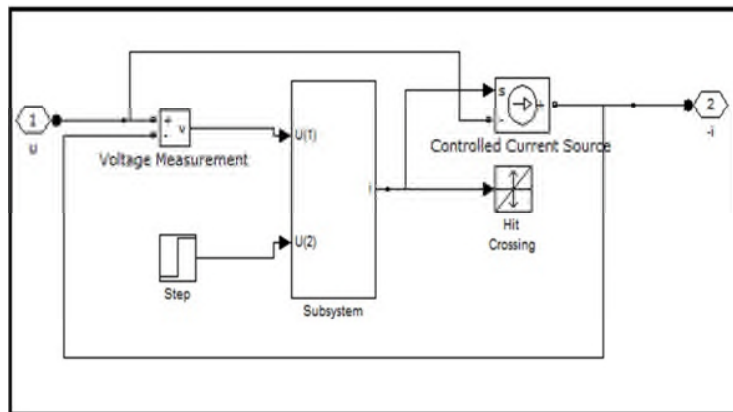
*Fig. IV.2 : Le bloc subsystem du modèle.*

### IV.1.3. Insertion du modèle dans le circuit d'essai

Pour insérer notre interrupteur dans le circuit d'essai il est nécessaire de lui ajouter les blocs de simulink comme le montre la figure (IV.3) tel que :

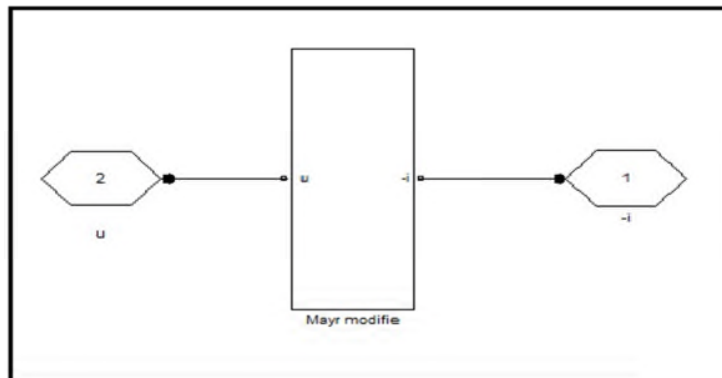
- **voltage measurement** : pour mesurer la tension de l'arc.
- **controlled current source**: Ce bloc convertit le signal d'entrée Simulink en une source de courant équivalent. Le courant généré est entraîné par le signal d'entrée du bloc.

- **Hit crossing** : Ce bloc est utilisé pour détecter le zéro du courant. ajustant le pas, le bloc assure que la simulation trouve le point de passage à zéro. Ceci est important pour la coupure, lors du passage par zéro du courant.
- **Step** : Ce bloc est utilisés pour contrôler l'état des contacts du disjoncteur, Soit les contacts sont fermés ou ouverts.



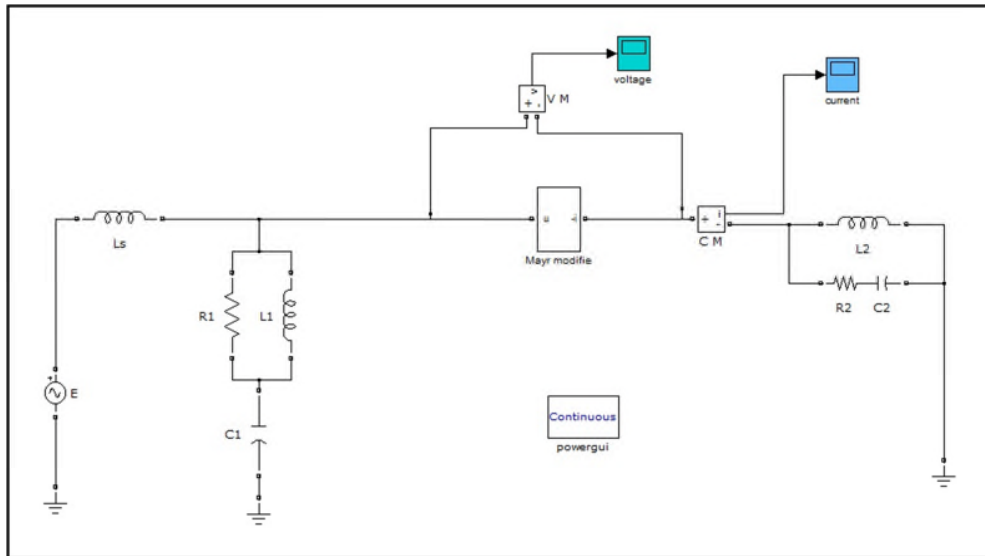
*Fig. IV.3 : Le bloc du modèle de Mayr Modifié.*

Après avoir terminé cette étape, on a créé un « subsystem » qu'on a nommé « Mayr Modifié » fig.(IV.4) et qu'on a inséré dans le circuit d'essai fig. (IV.5)



*Fig. IV.4 : Subsystem de modèle de Mayr Modifié.*

Avec **Edit Blok** on édite les paramètres de notre modèle.  
Désormais, ce dernier est prêt à effectuer des simulations.



*Fig. IV.5: Modèle de Mayr Modifié intégré dans le circuit test.*

La figure (IV.5) représente le circuit test du système électrique comportant des éléments passifs, des éléments générateurs, des signaux courants et tensions qui sont nécessaires au moment de la collecte des données graphiques.

Les paramètres du circuit d'essai sont :

$E_{\text{sys}} = 59196 \text{ V}$  (amplitudes maximales) phase  $90^\circ$ , et sa fréquence 60 Hz.

$L_s = 3.52 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ .

$R_1 = 29.8 \ \Omega$ .

$L_1 = 5.28 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ .

$C_1 = 1.98 \ \mu\text{F}$ .

$R_2 = 450 \ \Omega$ .

$L_2 = 6.256 \cdot 10^{-4} \text{ H}$ .

$C_2 = 1.93 \ \text{nF}$ .

## IV.2.Simulation avec le modèle de Mayr Modifié

On ouvre la boîte de dialogue du modèle et on introduit les paramètres du modèle de Mayr modifié comme le montre la figure (IV.6).

$$\tau = 0.6677 \text{ } [\mu\text{s}];$$

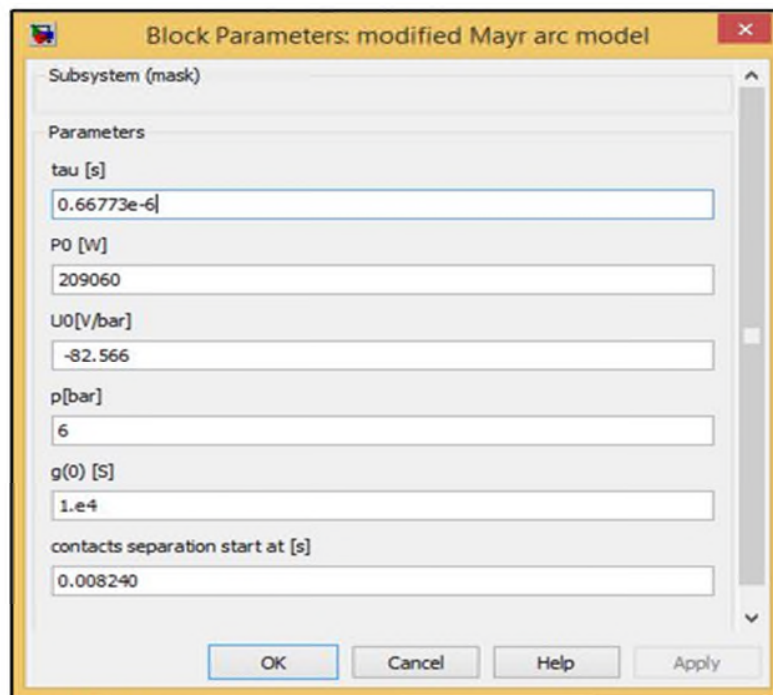
$$P_0 = 209060 \text{ } [\text{W}] ;$$

$$P = 6 \text{ } [\text{bar}] ;$$

$$U_0 = -82.566 \text{ } [\text{V}/\text{bar}].$$

Ces paramètres sont extraits des courbes mesurées de la tension et du courant de l'arc. Ajoutés aux paramètres précédents, l'instant de séparation des contacts qu'on a choisi à  $t = 0.00824[\text{s}]$  et la valeur initiale de la conductance d'arc  $g_0 = 10^4[\text{S}]$ .

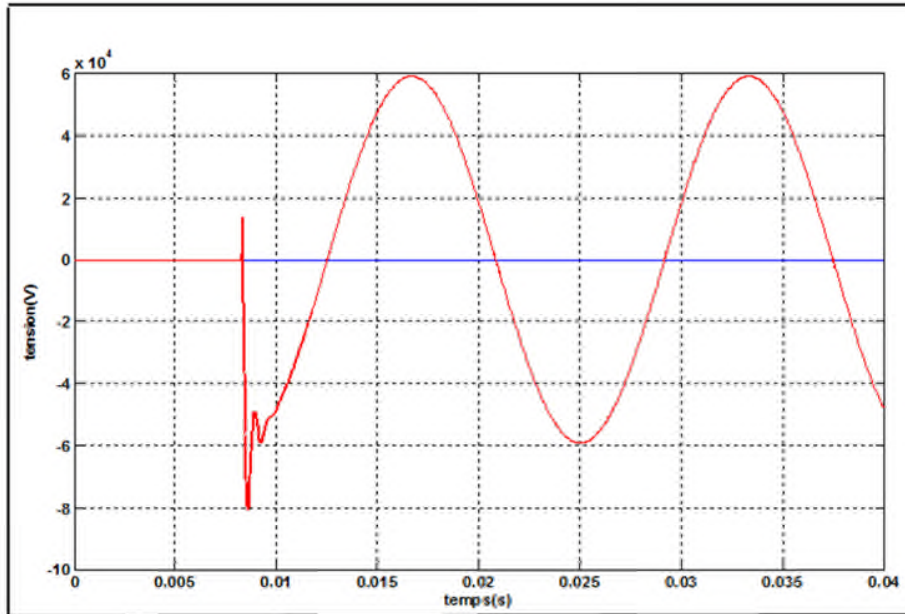
Une fois toutes les données sont introduites, on peut lancer la simulation.



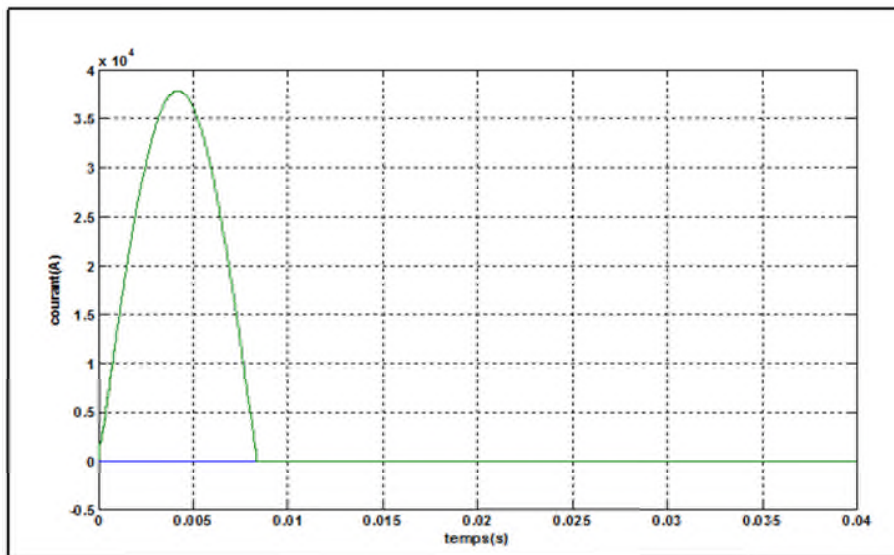
*Fig. IV.6: Boîte de dialogue du modèle Mayr Modifié.*

### IV.3. Les résultats de la simulation

Les figures (IV.7, IV.8) représentent respectivement la tension et le courant simulés de l'arc.



*Fig. IV.7: Tension simulée par le modèle de Mayr Modifié.*

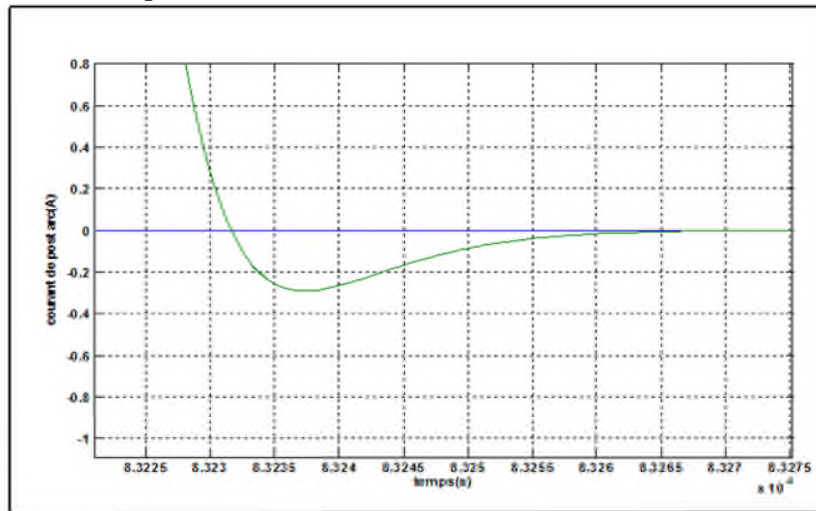


*Fig. IV.8 : Courant simulée par le modèle de Mayr Modifié.*



En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant, on observera :

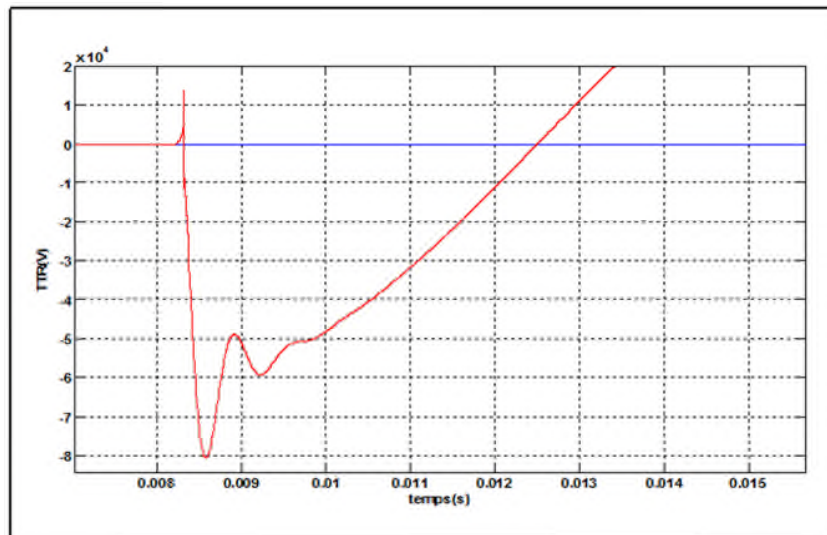
- Un faible courant poste arc de :  $-0.29 \text{ A}$



*Fig.IV.9 : Courant post arc.*

Et si on fait un zoom sur l'allure de la tension on obtient :

- Une TTR maximale de :  $-80.69 \text{ kV}$ .
- Un pic d'extinction  $13.855 \text{ kV}$ .



*Fig.IV.10 : Tension transitoire de rétablissement (TTR).*

Ce modèle donne une interruption réussie comme c'est le cas dans la réalité, car le courant s'annule après son passage par zéro et la tension transitoire de rétablissement (TTR) s'amortit. Ce modèle reproduit bien les courbes de tension et de courant mesurés. Cependant, les

nouveaux modèles, de KEMA et celui de SHAVEMAKER, sont encore meilleurs que ce modèle.

## **Conclusion**

Les phénomènes de coupures qui apparaissent lors de la coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension sont très complexes, mais doivent être maîtrisés pour améliorer la conception et la fiabilité des disjoncteurs.

La modélisation des disjoncteurs SF<sub>6</sub> haute tension, plus précisément la modélisation de l'arc dans le disjoncteur SF<sub>6</sub> haute tension, est une aide appréciable à la compréhension des phénomènes de coupure.

Dans ce contexte on a conçu « un interrupteur haute tension » à base du modèle de Mayr Modifié a été conçu puis on l'a utilisé pour reproduire le processus de la coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension. Le modèle donne des résultats conformes à la théorie, cependant les modèles de KEMA et de SCHAVEMAKER encore sont plus performants.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

### Conclusion générale

A travers ce travail on a étudié le processus de coupure d'un courant de court-circuit dans un disjoncteur  $SF_6$  haute tension.

D'abord on a commencé par l'étude et le calcul des courants de court-circuit dans le réseau haute tension en utilisant la méthode des composantes symétriques, ensuite on a mis le point sur les phénomènes d'interruption des courants alternatifs d'une manière générale et sur les phénomènes d'interruption des court-circuit dans un réseau haute tension d'une manière particulière, tout en présentant les caractéristiques assignées des disjoncteurs chargés de la coupure.

On a aussi présenté les modèles d'arc à boîte noire, les plus utilisés pour modéliser l'arc électrique dans le disjoncteur  $SF_6$  haute tension.

A la base du modèle d'arc de Mayr Modifié, on a conçu « un interrupteur » dans le Simulink de Matlab et on l'a utilisé pour reproduire le processus de coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau électrique haute tension.

Les résultats de simulation sont proches des résultats théoriques, mais des modèles plus récents ont donné des résultats meilleurs tels que les modèles de KEMA et de SCHAVEMAKER.

# ANNEXES

## 1. Les efforts électrodynamiques

Nous savons que la circulation de courants dans des conducteurs parallèles induit dans ces conducteurs des forces électromagnétiques proportionnelles au produit des courants circulant dans les deux conducteurs. En cas de court-circuit dans une configuration de ligne ou de poste en conducteurs souples, on mesure alors des surtensions mécaniques (traction et flexion) appelées efforts électrodynamiques au niveau des supports et des isolateurs d'ancrage. On observe également des mouvements de conducteurs très importants. Ces efforts pouvant être considérables comme indique la figure (1). [32]

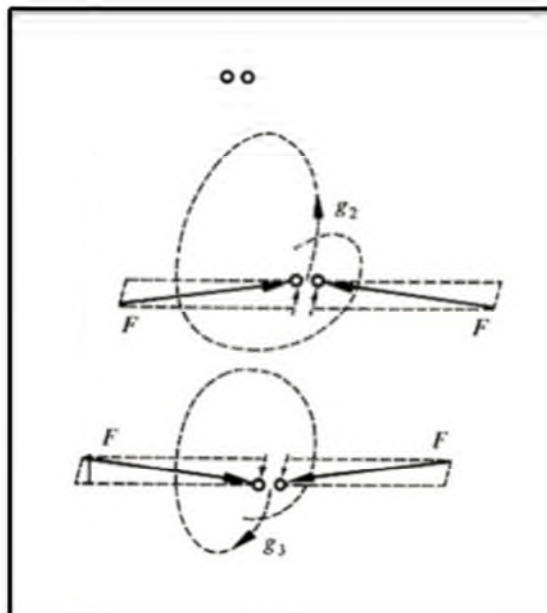
La force électrodynamique exercée sur un élément du conducteur est donnée par la relation:

$$dF = i dl B \quad (1)$$

**I** : le courant parcouru dans l'élément du conducteur.

**B** : Champ d'induction provenant d'autre courant.

**g<sub>2</sub>, g<sub>3</sub>** : galopes engendrées lors d'un défaut entre les phases.



*Fig.1 : force électrodynamique lors d'un court -circuit biphasé. [32]*

## 2. L'arc électrique

Lorsque les contacts du disjoncteur se séparent, le processus d'interruption est lancé, un arc électrique de très haute température est toujours produit et le milieu entre les contacts devient conducteur dans lequel l'interruption du courant va se produire. Avec les modernes

disjoncteurs à haute tension, l'arc est soufflé avec du gaz. L'arc électrique est un canal de plasma entre les contacts du disjoncteur formés après une décharge gazeuse dans le milieu d'extinction. [31]

Lors de la coupure, l'appareil doit absorber toute l'énergie électromagnétique stockée dans le réseau et supporter une importante surtension. Cette puissance, et la surtension qui l'accompagne, sont à l'origine de la naissance d'un arc électrique à l'endroit de la coupure. [30]

### 2.1. Le plasma

Il peut arriver sous certaines conditions que les particules d'un gaz gagnent suffisamment d'énergie pour se mettre à conduire un courant électrique. Dans ce cas, le gaz devient conducteur et les particules qui le constituent peuvent être chargées et interagir les unes avec les autres. Ces particules peuvent être de différentes natures (électrons, ions positifs ou négatifs, atomes ou molécules, et elles peuvent se trouver dans différents états (standard ou excité) : on dit alors que le gaz est ionisé.

Depuis 1928, le plasma a été défini comme le quatrième état de la matière, où le milieu est partiellement ou totalement ionisé et généralement globalement neutre. Il est constitué d'un mélange d'ions, d'électrons et d'espèces neutres, excitées ou non, où les températures sont supérieures à 300°C à la pression atmosphérique, pour ça on peut considérer le plasma conducteur d'électricité. Le plasma possède une grande viscosité et un coefficient d'échanges thermiques élevé d'électrons et qui est globalement neutre. Cette dernière propriété (neutralité du milieu) est une condition nécessaire que doit avoir un état pour pouvoir être qualifié de plasma.

Autrement dit, un mélange gazeux composé d'électrons, d'ions et d'éléments neutres, dans des états fondamentaux ou excités ne sera pas considéré comme plasma si au total, il n'a pas le même nombre de charges positives que négatives.

L'arc qui se crée dans le boîtier d'un disjoncteur est dans sa globalité un plasma thermique. Il est formé de particules provenant du gaz, de vapeurs métalliques venant des électrodes et de vapeurs plastiques venant des parois latérales du disjoncteur. Sa température est estimée expérimentalement à 15000 K [30].

### 2.2. La décharge électrique

D'habitude une décharge électrique se crée essentiellement par les collisions des électrons avec les molécules du gaz. Il s'en suit la génération de nouveaux électrons et ions dans les avalanches de Townsend qui se développe jusqu'à l'établissement d'un état de maintenance. La décharge alors devient indépendante des sources extérieures qui produisent les charges électriques libres dans le gaz. L'efficacité des électrons comme producteurs de nouveaux ions, dépend de leur énergie et donc de leur libre parcours dans le champ électrique. Et comme les électrons dans une décharge ne sont pas mono-énergétiques on doit déduire leur fonction de distribution des énergies pour une étude quantitative [33].



### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] ART.065191 Schneider Electric - Cahier technique édition février 2008.
- [02] METZ-NOBLAT Calcul des courants de court-circuit Cahier technique n° 158, édition octobre 2000.
- [03] BENHAMIDA HAKIM contribution à l'identification des courts-circuits, mémoire magister ANNABA 2007.
- [04] NADIR GHANEMI Etude de la tenue aux courants de court-circuit pour le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT, mémoire magister constantine 2008.
- [05] BENOIT DE METZ-NOBLAT Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques Cahier technique n° 18.
- [06] DENIS DUFOURNET(**Appareillage électrique d'interruption HT partie1**), dossier Techniques de l'Ingénieur d4690 Document délivré le 09/05/2012. P4-5-6-15.
- [07] SERGE THEOLEYRE «**Les techniques de coupure en MT**», Cahier technique n° 193 édition septembre 1998. P6-7-8-9---16-24-25.
- [08] DENIS DUFOURNET(**Appareillage électrique d'interruption HT partie2**) dossier Techniques de l'Ingénieur d4692 Document délivré le 09/05/2012.p 5-6.
- [09] S.VAQUIE, "L'arc électrique", CNRS éditions, Paris, 2000, pp : 188-189.
- [10] J.A. MARTINEZ-VELASCO, "Modeling of circuit breakers using the type-94 component", EEUG News February 1997, pp 55-66.
- [11] L. VAN DER SLUIS and W.R RUTGERS, "The comparison of Tests Circuits with Arc Models, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2 1994 pp 137-142.
- [12] L. VAN DER SLUIS, W.R Rutgers, C.G.A. Koreman "A physical arc model for the simulation of current zero behaviour of high-voltage circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7 Issue: 2, April 1992 pp 1016-1022.
- [13] J.A. MARTINEZ-VELASCO, "Circuit Breaker Representation for TRV Calculations", EEUG News Aug-Nov 1998, pp 77-87.
- [14] C. GUILLOUX, V. Therme, P.G. Scarpa, "Measurement of the post-arc current of HV circuit breakers: application to short circuit tests with ITRV", IEEE Trans. 1993, PWRD-8, (3), pp 1148-1153.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [15] B. BLEZ, C. GUILLOUX, "Post-arc current in high Voltage SF6 circuit-breakers when breaking at up to 63 KA", IEEE Trans, 1989, PWRD-4, (2), pp 1056-1062.
- [16] H. A DARWISH and N. ELKALASHY, "Comparison of Universal Circuit Breaker Arc Representation with EMTP Built-in Model", International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-6.
- [17] L. R ORAMA and B. R. MEDINA, "Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations", International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-5.
- [18] R.P.P SMEETS, S. NISHIWAKI, "Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers By Means of Current Zero Analysis", IEEE trans., 2002, pp 424-429.
- [19] R. P.P SMEETS and V. KERTÉSZ, "Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a validated arc model", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp: 121-125.
- [20] P. H SCHAVEMAKER and L. VAN DER SLUIS, "An improved Mayr-Type arc model based on current-zero measurement", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2, April 2000 pages: 580-584.
- [21] P. H SCHAVEMAKER and L. VAN DER SLUIS, "Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers", IEE Proc. Sei. Meas. Technol., Vol. 149 N° 4, July 2002 pp 153-157.
- [22] D. VIGOUROUX. Études d'un nouveau disjoncteur haute tension. » Mémoire de Master2, Université Joseph Fourier, Siemens – 24 Juin 2008.
- [23] SERGE THEOLEYRE Les techniques de coupure en MT Cahier technique n° 193 édition septembre 1998.
- [24] YVES PELENC « **Appareillage électrique d'interruption à haute tension** » « **Interruption des circuits alimentés en courant continu** » dossier Techniques de l'Ingénieur D4 700 Document délivré le 09/05/2012, P 14-15- 16-29-29-30-34....36.
- [25] YANN CRESSAULT « **Propriétés des appareils de coupure** » Laboratoire LAPLACE.
- [26] Mr BOUCHAHDANE Mohamed « **Etude des équipements de protection de la nouvelle ligne 400 kV en Algerie** ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister Juillet (2009), UMC.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [27] « J. PASTEAU « **Introduction à l'appareillage très haute tension** », Cahier technique n° 127 édition juin 1984 Schneider Electric, p11.
- [28] « R.P.P SMEETS et V. Kertész “**Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a valited arc model**”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp: 121-125.
- [29] YVES PELENC « **Interruption des circuits alimentés en courant continu** » DOSSIER Techniques de l'Ingénieur **D4 701** Document délivré 1998.
- [30] M<sup>me</sup> LAURE REYNARD « **Modélisation tridimensionnelle de l'amorçage de l'arc électrique dans un disjoncteur basse-tension** » Thèse doctorat à l'école centrale de Lyon. Février 2006 .
- [31] « **Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK**» International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT), Vol. 1, No.2, february 2013 ISSN (Print) 2277—7261.
- [32] L.ROBERT; LAROCCA " Personnel protection devices for us appliances" IEEE Transaction on industrie application Vol,1-2 1992
- [33] ZEGHICHI LEYLA « **Etude D'une Décharge Electrique par la Méthode de Monte Carlo** » mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de magister à l'université de Batna. Avril 2010.