

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abderrahmane Mira de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

*En vue de l'obtention du Diplôme Master en électrotechnique
Option : Réseaux Electriques*

Thème

MODELISATION D'UN ARC ELECTRIQUE DANS UN DISJONCTEUR SF6 HT

Réalisé par :

Mr. ISSAD SAID

Mr. LATIKI LOUNIS

Encadré par :

Mme. ZIDANE.F

Promotion
2015/2016

Remerciements

Tout d'abord, Nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné tant de courage, de volonté, de patience et de santé durant toutes ces années d'études.

*Nous voudrions sincèrement remercions notre promotrice Madame
ZIDANE F.*

pour sa disponibilité durant toute la réalisation de ce travail, pour ses précieux conseils, orientations et critiques.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres de jury, Mme. MERABET .S et Mr. ZEBBOUDJ.Y qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.

Nous remercions aussi tout le personnel de la SOMACOB DE REMILA et plus particulièrement Mr. AISSANI.M-L qui nous a aider et orienter pendant toute la période du stage.

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études

Enfin, A toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire.

Sans oublier nos chers parents, frères et sœurs.

SAYD & LOUMIS

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'études à :

A Ma mère

Mon père

Ma sœur

Mes frères

A tous mes amis

A mon binôme LOUNIS et toute sa famille.

SAD

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire d'études à :

A ma mère

Mon père

Ma sœur

Mes frères

A tous mes amis

A mon binôme SAJD et toute sa famille.

LOUIS

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 01 : Disjoncteur SF6 haute tension	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Les différents niveaux des tensions alternatives.....	3
1.3 Les appareils de connexion, leurs fonctions, leurs applications.....	4
1.4 Classification de L'appareillage électrique HT.....	5
1.5 Classification des disjoncteurs.....	6
1.5.1. Les milieux de coupure.....	6
1.5.2. Leurs utilisations	6
1.5.3. Leurs installations.....	7
1.6 Description générale d'un disjoncteur HT.....	7
1.6.1. Partie électrique active	8
1.6.2. Partie commande	8
1.6.3. Partie Contrôle.....	8
1.7 Rôle des disjoncteurs HT.....	8
1.8 Les caractéristiques assignées d'un disjoncteur HT.....	9
1.9 Température de service.....	10
1.10. Les disjoncteurs SF6 HT.....	10
1.10.1. Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension.....	10
1.10.2. l'hexafluorure de soufre.....	10
1.10.2.1. Propriétés et caractéristiques du gaz SF6.....	11
a. Propriétés chimiques.....	11
b. propriété de conductivité thermique.....	11
c. Propriétés diélectriques	11
d. propriété de la conductivité électrique.....	12
e. caractéristiques pression-température.....	13
f. caractéristique diélectrique-pression.....	14
1.11. Le disjoncteur 3AP1 FI 90 kV.....	16
1.11.1. Description du disjoncteur 3AP1 FI a SF6 90KV.....	17
1. Colonnes polaires.....	17

1.1. La chambre de coupure.....	18
2. Coffret d'organe de manœuvre.....	19
3. Coffret d'appareillage.....	20
4. Les câbles de liaison.....	20
5. L'organe de commande.....	20
1.11.2. Fonctionnement du disjoncteur.....	21
1.12. Dimensionnement des disjoncteurs.....	22
1.12.1. Les critères de dimensionnement.....	22
1.13. Conclusion.....	22
Chapitre 02 : La coupure d'un courant alternatif par un disjoncteur SF6 HT	
2.1. Introduction.....	23
2.2. L'interruption des courants électriques.....	23
2.2.1. Interruption d'un courant continu.....	24
2.2.2. Interruption d'un courant alternatif.....	26
2.3. La coupure grâce à l'arc.....	28
2.3.1. Les caractères électriques de l'arc.....	28
2.4. Les principaux cas de coupure par un disjoncteur HT.....	29
2.4.1. La coupure des courants normaux de charge.....	29
2.4.2. La coupure des courants de défaut.....	29
2.5. Conditions nécessaires pour réussir la coupure.....	31
2.6. Etude des courants de court-circuit dans un réseau HT.....	32
2.6.1. Courants de court-circuit	32
2.6.2. Origines.....	32
2.6.3. Caractéristiques des courts-circuits.....	33
2.6.4. Effets des courants de courts-circuits.....	33
2.6.5. Calcul des différents types de court-circuit.....	34
2.7. Les caractéristiques principales d'un disjoncteur HT	35
2.7.1 Le pouvoir de coupure assigné.....	35
2.7.2 Le pouvoir de fermeture assigné.....	37
2.7.3 Tension transitoire de rétablissement.....	38
2.8. Extinction de l'arc dans un disjoncteur SF6 HT 3PA1.....	39
2.9. Conclusion.....	40

Chapitre 03 : Les modèles d'arc à boîte noire

3.1	Introduction.....	41
3.2	Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique.....	41
3.3	Représentation des modèles d'arc à boîte noire.....	42
3.4	Les modèles de base.....	42
3.4.1	Le modèle de Mayr.....	42
3.4.2	Le modèle de Cassie	44
3.4.3	Comparaison des deux modèles.....	45
3.5	Les modèles d'arc améliorés	46
3.5.1	Le modèle de Mayr modifié.....	46
3.5.2	Le modèle de Habedank	47
3.5.3	Le modèle de Schwarz.....	48
3.5.4	Le modèle de KEMA.....	49
3.5.5	Le modèle de Schavemaker.....	51
3.6	Conclusion.....	53

Chapitre 04 : Simulation numérique par le modèle de Mayr modifié

4.1	Introduction.....	54
4.2	Méthode de calcul et programmation.....	54
4.2.1	Description du modèle de Mayr modifié.....	54
4.2.2	Les paramètres indépendants du modèle de Mayr modifié.....	55
a.	la constante de la puissance de refroidissement (P_0).....	55
b.	la constante de courant (u_0).....	55
c.	La constante de temps de désionisation (τ).....	55
d.	La pression de remplissage du disjoncteur (p).....	56
4.2.3	L'organigramme de programmation.....	56
4.2.4	Explication de la procédure d'identification des paramètres du modèle.....	57
4.2.5	Résultats obtenus à travers le programme.....	57
4.2.6	Identification des paramètres.....	59
4.3	Simulation numérique avec le logiciel MATLAB.....	60
4.3.1	Implémentation du modèle d'arc de Mayr modifié dans le Simulink de MATLAB.....	60

4.3.2 Simulation numérique.....	61
4.3.4 Les résultats de la simulation.....	62
4.3.4.1 Le voisinage du zéro du courant sous la loupe.....	63
4.3.4.2 Importation des données dans le programme et comparaison.....	64
4.4 Comparaison entre les oscillogrammes simulés et mesurés.....	65
4.5 Conclusion.....	66
Conclusion général.....	67

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1 : Les différents appareils de connexion, leurs fonctions et leurs applications

Fig. 1.2 : Évolution des techniques de coupure

Fig. 1.3 : Parties principales d'un disjoncteur HT

Fig. 1.4 : Courbe de conductivité thermique du SF₆ en fonction de la température

Fig.1.5 : Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz

Fig. 1.6 : Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF₆

Fig. 1.7 : Courbes de pression de vapeur et lignes isodenses de gaz SF₆

Fig. 1.8 : Rigidité diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes

Fig. 1.9 : Disjoncteur SF₆ HT 3AP1 FI 90 kV

Fig. 1.10 : Vue en coupe d'une colonne polaire

Fig. 1.11 : Vue en coupe d'une Chambre de coupure du disjoncteur 3AP1 FI 90 kV

Fig. 1.12 : Schéma fonctionnel de la commande à accumulation d'énergie par ressorts

Fig. 2.1: Circuit R L en courant continu

Fig. 2.2: Variation de la résistance en fonction du courant durant la coupure

Fig. 2.3: Circuit R L en courant alternatif

Fig. 2.4: Coupure au passage par le zéro du courant

Fig. 2.5: Importance de l'instant de la coupure dans l'interruption d'un circuit alimenté par un courant alternatif

Fig. 2.6: Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit

Fig. 2.7: Courant asymétrique à deux composantes

Fig. 2.8: Forme de courant à couper avec une composante apériodique

Fig. 2.9: Valeur du pourcentage de la composante apériodique du pouvoir de coupure en fonction du temps

Fig. 2.10: Représentation d'une TTR par quatre paramètres

Fig. 2.11: Représentation schématique de la manœuvre d'ouverture

Fig. 3.1: Caractéristique statique d'un arc de forte puissance

Fig. 3.2: Le modèle de Habedank

Fig. 3.3: Le modèle de KEMA

Fig. 3.4: Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés

- Fig. 4.1: L'organigramme du programme
- Fig. 4.2: Courbe du courant mesuré de l'arc
- Fig. 4.3: Courbe de la tension mesurée de l'arc
- Fig. 4.4: Conductance mesurée ($\frac{dln g}{dt}$ -mesurée) de l'arc
- Fig. 4.5: Conductance calculée ($\frac{dln g}{dt}$) du modèle
- Fig. 4.6: Comparaison des courbes calculée et mesurée de $\frac{dln g}{dt}$
- Fig. 4.7: Le bloc du modèle de Mayr modifié
- Fig. 4.8: Boite de dialogue du modèle Mayr modifié
- Fig. 4.9: Courant simulé de l'arc par le modèle de Mayr modifié
- Fig. 4.10: Tension simulée de l'arc par le modèle de Mayr modifié
- Fig. 4.11: Courant post-arc simulé
- Fig. 4.12: Tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction
- Fig. 4.13: Courant simulé de l'arc par le modèle de Mayr modifié
- Fig. 4.14 : Tension simulée de l'arc par le modèle de Mayr modifié
- Fig. 4.15: Comparaison des courbes des courants simulés et mesurés
- Fig. 4.16: Comparaison des courbes des tensions simulées et mesurées

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les courants en module dans différentes dissymétries

Tableau 3.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie

LISTE DES ABRÉVIATIONS

HT : Haute Tension

MT : moyenne Tension

BT : Basse Tension

HTB : Haute Tension catégorie B

HTA : Haute Tension catégorie A

BTB : Basse Tension catégorie B

BTA : Basse Tension catégorie A

TBT : Très Basse Tension

NFC : Normes Françaises Code

CEI : Commission électrotechnique internationale

SF6 : L'hexafluorure de soufre

TTR : Tension Transitoire de Rétablissement

HP : Haute Puissance

Introduction générale

Introduction générale

Le bon fonctionnement des réseaux électriques revient à leurs composants (générateurs, transformateurs, lignes, appareils de connexions et de protections,...) qui les constituent dans un plan de tension bien déterminé.

Les appareils de connexion et de protection sont des éléments essentiels dans un réseau électrique, leurs choix exigent la connaissance du comportement du système lors d'un défaut (agression naturel, court-circuit...).

En tout niveau de tension le disjoncteur joue un rôle très important concernant l'interruption et l'établissement du courant dans des conditions normales et anormales du fonctionnement d'un réseau. Son histoire est riche d'inventions diverses, basées sur l'amélioration de ses mécanismes de fonctionnement, ses dimensions et enfin ses principes de coupure.

La présence du disjoncteur dans un réseau électrique haute tension prend toute son importance ; il permet de reconfigurer rapidement le réseau et minimiser les dommages possibles provenant des défauts.

Cependant, pendant la phase de coupure des phénomènes énergétiques complexes surviennent. Le disjoncteur HT le plus fiable pour faire face à ces contraintes est le disjoncteur SF6 HT, grâce aux propriétés remarquables extinctrices de l'arc, du gaz SF6.

Le disjoncteur joue un rôle important dans les réseaux HT. Pour améliorer sa conception et maîtriser les contraintes liées à la coupure, il faut passer par des essais, coûteux et qui prennent beaucoup de temps dans les laboratoires HP, de ce fait, on a intérêt d'utiliser des modèles qui traduisent par simulation le comportement de l'arc dans le disjoncteur de façon similaire à la réalité.

Le but de notre travail est **la modélisation de l'arc électrique dans un disjoncteur SF6 HT**, il est partagé comme suit :

Le 1^{er} chapitre est consacré aux appareils de connexion d'une manière générale, et au disjoncteur SF6 HT en particulier.

Le 2^{ème} chapitre est consacré aux courants de courts-circuits et aux phénomènes lié à leurs interruptions.

Le 3^{ème} chapitre décrit les modèles les plus utilisés pour modéliser l'arc électrique dans un disjoncteur SF6 HT et plus particulièrement le modèle de Mayr modifié que nous allons utiliser dans notre travail.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique de l'arc électrique par le modèle de Mayr modifié et à la fin une conclusion générale achèvera notre travail.

Chapitre 01

Le disjoncteur SF6 haute tension

1.1. Introduction

Le dispositif de protection « disjoncteur » est aujourd'hui le moyen le plus efficace pour assurer la protection des personnes, des biens, des installations et des réseaux électriques, grâce à sa souplesse aux limitations et aux exclusions des conséquences de défauts ; le disjoncteur constitue l'appareil de protection par excellence doué à la fois d'intelligence et d'une totale capacité d'intervention.

Ce présent chapitre est consacré aux disjoncteurs haute tension d'une manière générale et aux disjoncteurs SF6 haute tension d'une manière particulière. Dans ce contexte on a commencé par la localisation du domaine de la haute tension, en suite donné une idée générale sur les appareils de connexion HT et les disjoncteurs HT, et on a poursuivi par une idée précise sur la constitution, la description et le fonctionnement du disjoncteur SF6 haute tension.

1.2. Les différents niveaux des tensions alternatives

Les différents niveaux des tensions sont déterminés suivant les deux normes à savoir la NF C 18-510 et la CEI 38 [1].

La nouvelle norme en vigueur en France NF C 18-510 définit les niveaux des tensions alternatives comme suit :

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV,
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV,
- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV,
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V,
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V,

Les notations de la norme CEI 38 (Commission électrotechnique internationale) seront parfois utilisées dans ce document avec les définitions suivantes :

- HT : pour une tension composée comprise entre 35 kV et 1000 kV,

Les valeurs normalisées sont : 45 kV - 66 kV - 110 kV - 132 kV - 150 kV - 220 kV.

- MT : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 35 kV,

Les valeurs normalisées sont : 3,3 kV - 6,6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV.

- BT : pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V,

Les valeurs normalisées sont : 400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz).

1.3. Les appareils de connexion, leurs fonctions, leurs applications

	■ Définition CEI ■ Fonction	Fermer			Ouvrir			Isoler
Sectionneur	<p>■ Appareil mécanique de connexion qui assure, en position d'ouverture une distance de sectionnement satisfaisant à des conditions spécifiées.</p> <p>■ Destiné à assurer l'isolement de sécurité d'un circuit, il est souvent associé à un sectionneur de terre.</p>	oui	non	oui <input type="checkbox"/>	oui	non	non	oui
Sectionneur de mise à la terre	<p>■ Sectionneur spécial conçu pour raccorder des conducteurs de phase à la terre.</p> <p>■ Destiné à la sécurité en cas d'intervention sur les circuits, il relie les conducteurs actifs hors tension à la terre.</p>	oui	non	oui <input type="checkbox"/>	oui	non	non	non
Interrupteur	<p>■ Appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit y compris éventuellement les courants de surcharge en service.</p> <p>■ Destiné à la commande (ouverture et fermeture) des circuits, il est souvent prévu pour assurer la fonction sectionnement. Sur les réseaux MT de distribution publique et privée il est fréquemment associé à des fusibles.</p>	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui <input type="checkbox"/>
Contacteur	<p>■ Appareil mécanique de connexion ayant une seule position de repos, commandé autrement qu'à la main, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit y compris les conditions de surcharge de service.</p> <p>■ Prévu pour fonctionner très fréquemment, il est principalement destiné à la commande de moteurs.</p>	oui	oui	oui	oui	oui	non	non
Disjoncteur	<p>■ Appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit et dans les conditions anormales spécifiées du circuit telles que celles du court-circuit.</p> <p>■ Appareil de connexion d'usage général. Outre la commande de circuits il assure leur protection contre les défauts électriques. Il remplace les contacteurs pour la commande des gros moteurs MT.</p>	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non

= à vide
 = en charge
 = court-circuit
 = selon les cas

Figure.1.1 : Les différents appareils de connexion, leurs fonctions et leurs applications [2].

- **Parafoudre**

Les parafoudres sont des dispositifs statiques chargés de limiter, en un point donné du réseau, l'amplitude des surtensions qui peuvent se produire. La limitation de surtension est faite en écoulant l'énergie à la terre [2].

- **Fusible**

Les fusibles permettent d'interrompre automatiquement un circuit parcouru par une surintensité pendant un intervalle de temps donné. L'interruption du courant est obtenue par la fusion d'un conducteur métallique calibré [2].

D'après le tableau précédant, on constate que le seul appareil qui a le pouvoir de coupure et de fermeture sous un court-circuit et pour un courant de charge normal est le disjoncteur.

1.4. Classification de L'appareillage électrique HT

L'appareillage électrique HT peut être classé en plusieurs catégories selon :

- sa fonction ; protection, sectionnement.....
- sa tension ; niveau de tension d'utilisation.....
- sa destination ; fonctionner dans des réseaux de répartitions, distribution
- son installation ; intérieure ou extérieure.
- le type de matériel ; matériel ouvert, sous enveloppe métallique, blindé ou hybride.
- la température de service ; normal, maximal, minimal.
- son utilisation ; selon sa fonction.
- sa technique de coupure ; air, l'huile, Sf6 [2].

Comme on a vu ci-dessus concernant la représentation, description, classification de l'appareillage électrique ; le disjoncteur joue un rôle très important.

Pendant toute son évolution aux cours des années, plusieurs modifications ont été faites dans le but d'améliorer son pouvoir de coupure et ces performances.

1.5. Classification des disjoncteurs

On peut classer les disjoncteurs selon :

1.5.1. Les milieux de coupure :

Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure, disjoncteurs notamment, utilisant divers milieux de coupure :

- l'air ;
- l'air comprimé ;
- l'huile ;
- le vide
- le SF₆ [4].

La figure 1.2 donne les milieux employés selon leurs tensions d'utilisation

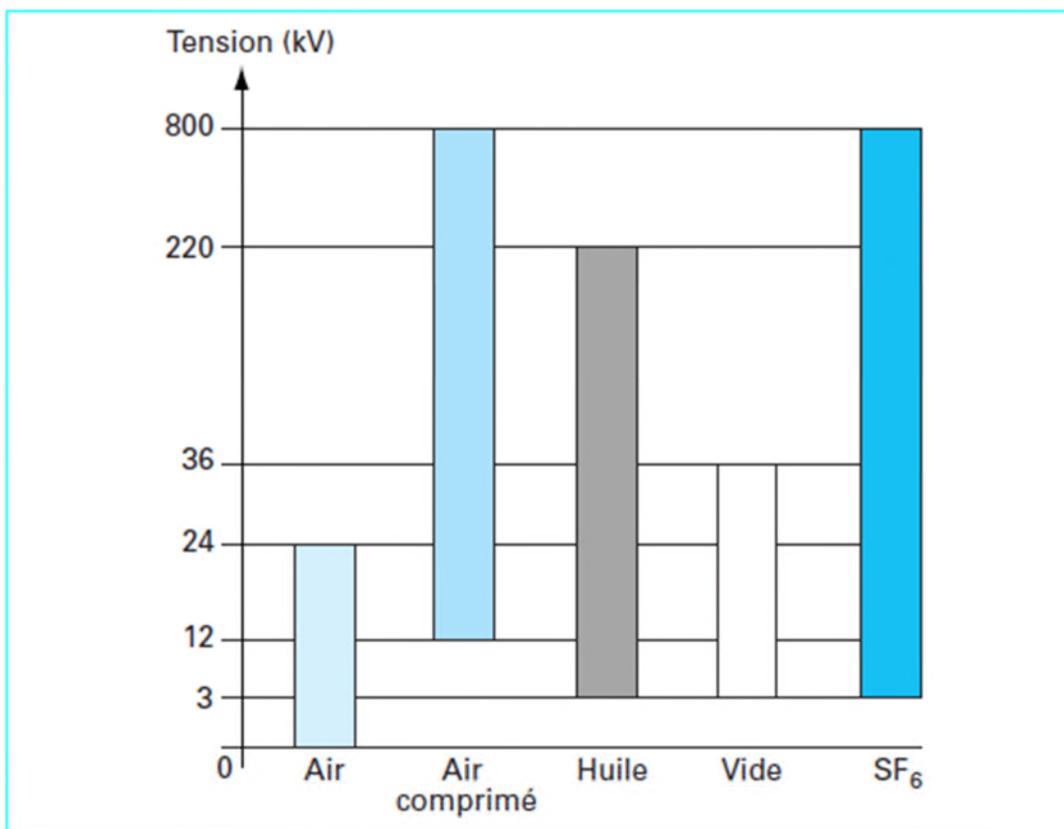


Figure.1.2 : milieux de coupure employés selon les tensions d'utilisation [5].

1.5.2. Leurs utilisations

- Disjoncteurs de lignes :

Comme leur nom l'indique, ils sont chargés de manœuvrer les lignes des réseaux à haute tension.

- Disjoncteurs de générateurs :

Ces disjoncteurs sont connectés entre un générateur et le transformateur élévateur de tension. Ils sont généralement utilisés à la sortie des générateurs de forte puissance (100 à 1 800 MVA), pour les protéger de manière sûre et rapide

- Disjoncteurs de réactances :

Ces disjoncteurs manœuvrent quotidiennement des réactances qui sont utilisées pour le réglage de la charge réactive dans une ligne. Ils doivent être capables d'effectuer ces manœuvres sans provoquer de surtensions sur le réseau [2].

1.5.3. Leurs installations

- **le disjoncteur ouvert**, dont l'isolation externe est faite dans l'air, il doit être capable de fonctionner dans des conditions climatiques et atmosphériques contraignantes.
- **le disjoncteur sous enveloppe métallique ou blindé** : il est muni d'une enveloppe métallique, reliée à la terre, qui permet d'éviter tout contact accidentel avec les pièces sous tension. Le disjoncteur fait partie d'une cellule isolée au SF6 qui comprend les différents organes nécessaires au fonctionnement du poste : disjoncteur, jeu de barres, sectionneur de jeu de barres, sectionneur de terre, transformateur de courant [2].
- **Le disjoncteur hybride** : dont l'isolation des parties actives est faite dans le SF6 à l'intérieur d'une cuve métallique et dont le raccordement au réseau est fait par l'intermédiaire de traversées isolantes. Cette disposition permet de placer les transformateurs de courant directement aux bornes du disjoncteur, en des points qui ne nécessitent pas d'isolation électrique [2].

1.6. Description générale d'un disjoncteur HT

Un disjoncteur à haute tension est composé de trois parties principales (figure1.3) :

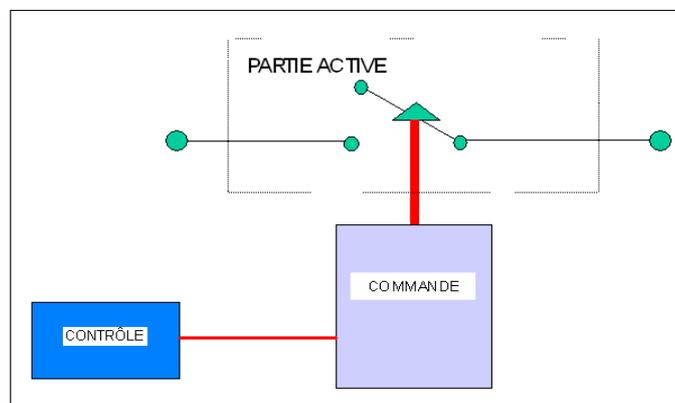


Figure.1.3 : Parties principales d'un disjoncteur HT [6].

1.6.1. Partie électrique active

C'est la partie où le courant est établi ou interrompu dans le circuit principal. Elle est constituée d'une chambre fermée contenant un contact fixe et un autre mobile dans un milieu liquide ou gazeux appelé milieu de coupure et dont l'établissement ou l'interruption du courant se réalise par la mise en contact de ces deux contacts ou leur séparation.

Pour un disjoncteur triphasé, chacune des phases possède au moins une partie active.

Pour des niveaux de tensions nominales élevées, cette partie active peut être composée de plusieurs chambres identiques connectées en série et commandées simultanément, de façon à produire un seul contact électrique, dans ce cas des condensateurs dits de répartition, sont installés en parallèle avec chaque chambre pour la répartition de la tension afin de réduire les usures excessives des contacts au détriment des autres [6].

1.6.2. Partie commande

C'est la partie où est développée l'énergie nécessaire pour réaliser le déplacement du contact mobile et réussir les opérations mécaniques tant à l'ouverture qu'à la fermeture.

La commande comporte des dispositifs à accumulation d'énergie appelés les accumulateurs d'énergie, dont le rôle est d'accumuler l'énergie nécessaire pour la coupure ou la fermeture et la maintenir prête à livrer lorsque demandée.

Trois types de commandes sont populaires dans le monde des disjoncteurs à haute tension :

- ✓ Commande pneumatique.
- ✓ Commande hydraulique.
- ✓ Commande mécanique à ressort [6].

1.6.3. Partie Contrôle

C'est la partie où les commandes d'opération sont initiées à partir d'une impulsion électrique d'une durée de fraction de seconde sur une bobine dans le mécanisme de commande. Celui-ci amplifie cet ordre en une opération du disjoncteur en libérant l'énergie nécessaire emmagasinée préalablement dans les accumulateurs d'énergie pour effectuer la coupure ou la fermeture [6].

1.7. Rôle des disjoncteurs HT

Les buts visés par ce dispositif de protection sont multiples :

- Participer à la protection des personnes contre les dangers électriques,

- Eviter les détériorations de matériel (un court-circuit triphasé sur un jeu de barres moyenne tension peut faire fondre jusqu'à 50 kg de cuivre en 1 seconde ; la température de l'arc peut dépasser en son centre 10 000 °C),
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont soumis ces matériels.
- Préserver la stabilité et la continuité de service du réseau.
- Protéger les installations voisines (par exemple, réduire les tensions induites dans les circuits proches [7]).

1.8. Les caractéristiques assignées d'un disjoncteur HT

Un disjoncteur à HT est caractérisé par les différentes caractéristiques comme les contraintes électriques où il doit fonctionner normalement sous leurs valeurs assignées [2].

- **Le pouvoir de fermeture assigné,**
- **Le pouvoir de coupure assigné,**
- **La tension transitoire de rétablissement (TTR) assignée,**
- **Tension assignée :** la tension assignée d'un disjoncteur HT est la valeur maximale de la tension du réseau dans lequel il peut être installé,
- **Niveaux d'isolement assignés :** le niveau d'isolement d'un appareil est défini par les valeurs qui caractérisent les contraintes diélectriques auxquelles il est susceptible d'être soumis en service et qu'il est capable de supporter avec une très grande probabilité de réussite.
- **Fréquence assignée :** est la valeur nominale de la fréquence du réseau où le disjoncteur HT est destiné à fonctionner.
- **Courant assigné en service continu :** le courant assigné en service continu correspond au courant dans lequel le disjoncteur HT peut supporter indéfiniment et en permanence les conditions normales de service.
- **Courant d'une courte durée admissible et assigné :** le courant de courte durée admissible caractérise la capacité d'un appareil à supporter
 - un courant de court-circuit donné pendant un temps donné.
 - une amplitude maximale du courant lors de ce court-circuit.
- **La séquence des manœuvres assignée :** une séquence de manœuvre est une succession de manœuvres spécifiées d'un disjoncteur à des intervalles de temps donnés [8].

1.9. Température de service

Les disjoncteurs HT (comme tout l'appareillage HT) sont prévus pour fonctionner avec les températures normales des services suivantes :

- la température **maximale** de l'air ambiant n'excède pas 40°C et sa valeur moyenne, mesurée pendant une période de 24 h, n'excède pas 35°C.
- la température **minimale** de l'air ambiant n'est pas inférieure à -25°C ou -40°C selon la norme CEI 60694.

D'autres valeurs de température minimale peuvent être exigées dans des cas particuliers telles que -30°C par des normes appliquées en Amérique du Nord, ou -50°C dans certaines régions froides du Canada. Ces conditions de service ont une incidence importante sur la conception, le dimensionnement et parfois la technique de coupure utilisée pour les disjoncteurs :

- Le fonctionnement à très basse température entraîne, par exemple, une limitation de la pression de remplissage des disjoncteurs SF6 pour éviter tout risque de liquéfaction du gaz.
- Le fonctionnement à haute température ambiante nécessite de s'assurer que la température et l'échauffement des composants n'excèdent pas les limites admissibles [2].

1.10. Les disjoncteurs SF6 HT

Le développement des réseaux de transport et des réseaux industriels Place les disjoncteurs haute tension dans des conditions de fonctionnement sévères [9].

1.10.1. Les raisons favorisant le disjoncteur SF6 HT

Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension sont les propriétés remarquables, extinctrices de l'arc, du gaz SF6 et les caractéristiques techniques de ce disjoncteur.

1.10.2. L'hexafluorure de soufre :

L'hexafluorure de soufre (SF6), est un gaz apprécié pour ses nombreuses qualités chimiques et diélectriques. La technique de coupure dans ce gaz a été développée dans les années 70 comme celle du vide, grâce également aux avantages qu'elle apporte en terme :

- de sécurité ;
- de dimension ;
- de maintenance et de longue durée de vie [8].

1.10.2.1. Propriétés et caractéristiques du gaz SF6

a. Propriétés chimiques

Le SF6 est un gaz non polluant, incolore, inodore, non inflammable et non toxique à l'état pur ; il est insoluble dans l'eau.

Il est chimiquement inerte : sa molécule a toutes ses liaisons chimiques saturées et une énergie de dissociation élevée (+ 1 096 kJ/mol), ainsi qu'une grande capacité d'évacuation de la chaleur produite par l'arc (enthalpie élevée).

Pendant la période d'arc, sous l'effet de la température qui peut atteindre 15 000 à 20 000 K, le SF6 se décompose. Cette décomposition est quasi réversible : quand le courant diminue, la température diminue, les ions et les électrons se recombinaient alors pour reconstituer la molécule de SF6 [8].

b. propriété de conductivité thermique

La conductivité thermique du SF6 est équivalente à celle de l'air, mais l'étude de la courbe de conductivité thermique du SF6 à des hautes températures révèle un pic à la température de dissociation du SF6 (naissance de plasma) [3].

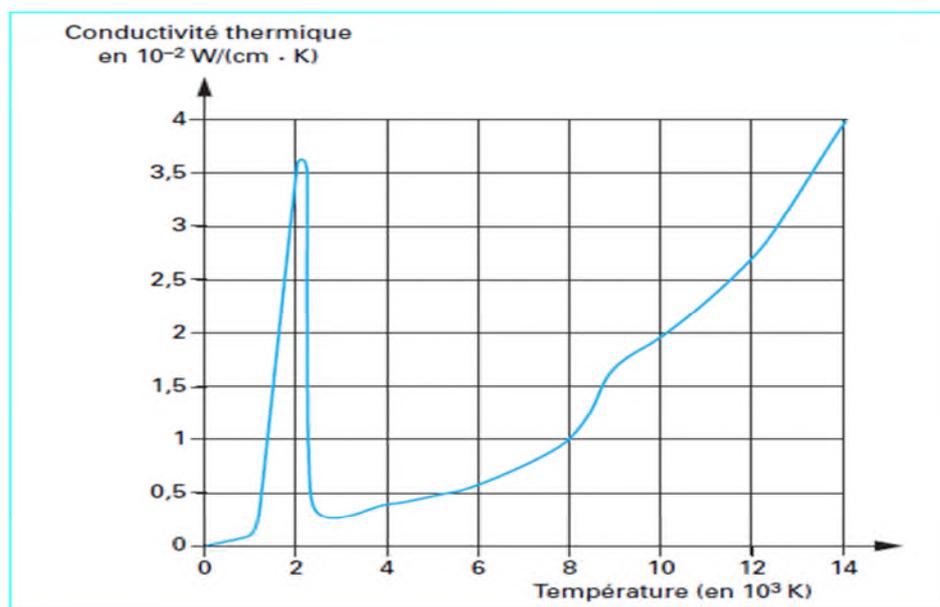


Figure. 1.4 : Courbe de conductivité thermique du SF6 en fonction de la température [8].

c. Propriétés diélectriques

Le SF6 a une rigidité diélectrique très élevée, grâce aux propriétés très électronégatives du fluor :

- La durée de vie de ses électrons libres reste très faible et ils se combinent avec les molécules de SF6 pour former des ions lourds à faible mobilité ;

- La probabilité de rupture diélectrique par avalanche est ainsi retardée ;
- Il confère à son milieu une constante de temps de désionisation extrêmement faible par rapport aux autres milieux utilisés, elle est de l'ordre de $0,25 \mu\text{s}$ (fig1.5).
- La « grande » dimension de sa molécule qui lui permet de ralentir les électrons par collision.
- À la pression atmosphérique, la rigidité diélectrique du SF6 est 2,4 fois supérieure à celle de l'air [10].

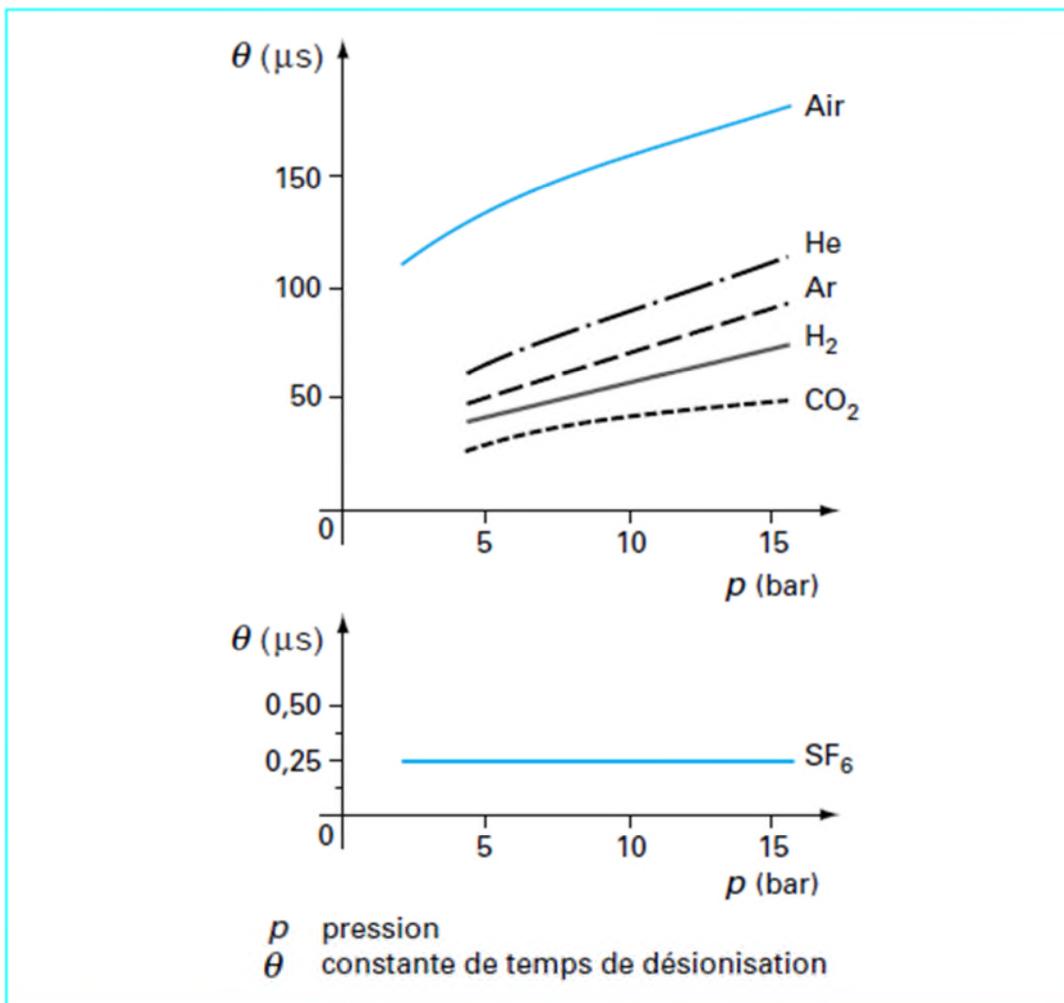


Figure.1.5 : Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz [8].

d. propriété de la conductivité électrique

Suivant des études thermiques sur le gaz SF₆ à une température très élevée (Proche de 2000°C), il y aura naissance d'un plasma de forme cylindrique où le SF₆ est dissocié, le noyau du plasma présente un milieu de bonne conductivité électrique.

Donc à très haute température le SF₆ est conducteur électrique [3].

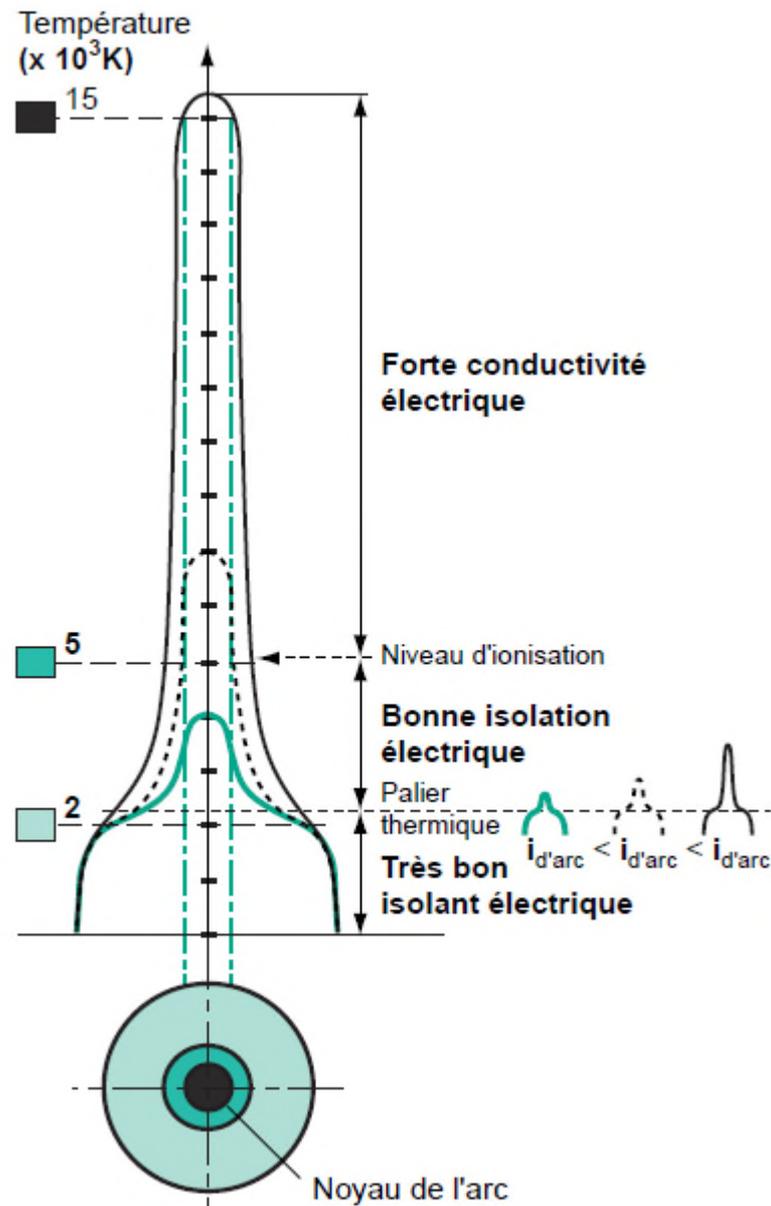


Figure. 1.6 : Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF6 [3].

e. caractéristiques pression-température

- La variation de la pression en fonction de la température est linéaire.
- Relativement faible dans la gamme des températures de service (- 25 à + 50 °C).
- Pour des températures élevées correspond une forte augmentation de pression.

Dans le cas d'une chambre à volume constant, cette forte augmentation de pression peut être exploitée pour donner naissance à une force pneumatique [11].

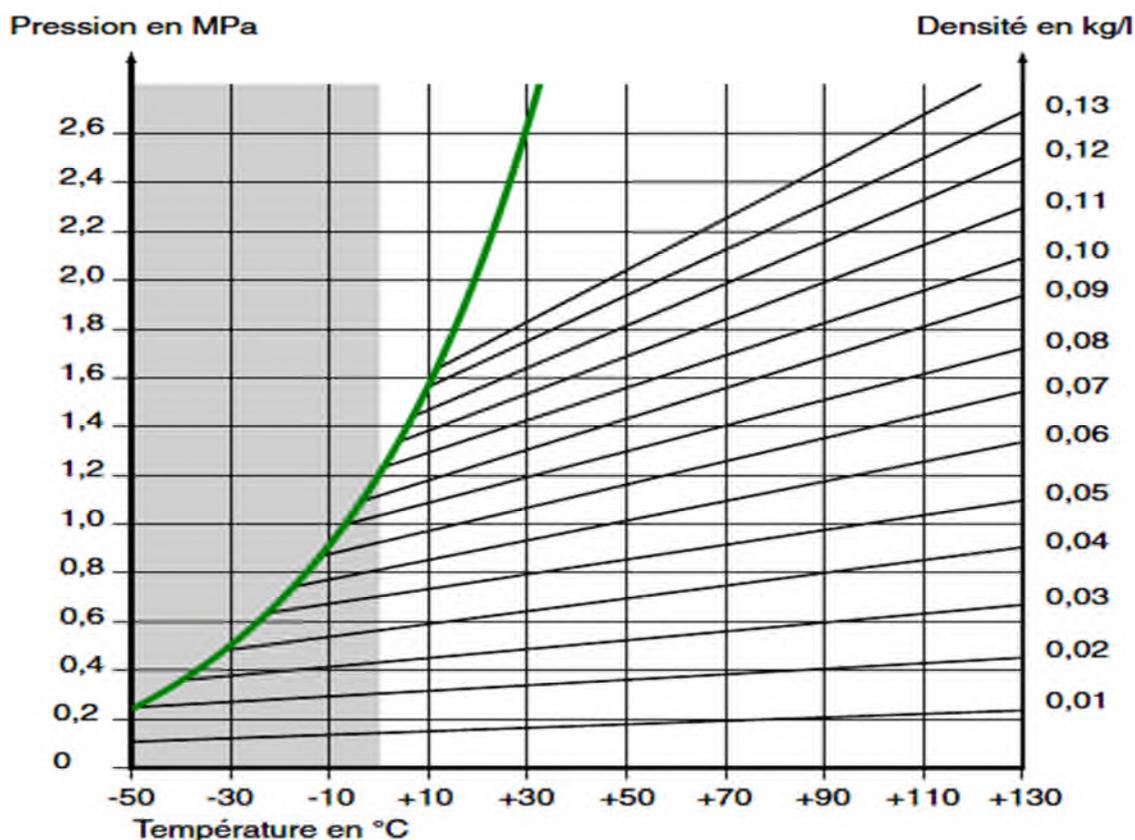


Figure. 1.7 : Courbes de pression de vapeur et lignes de même densité de gaz SF6 [11].

f. caractéristique diélectrique-pression

La rigidité diélectrique du SF6 est 2 à 3 fois supérieure à celle de l'air à pression identique, ceci étant dû à sa forte aptitude à capter des électrons libres pour former des ions lourds de faible mobilité, ce qui permet de ralentir par collision les quelques électrons libres subsistant dans le gaz, ce qui va les empêcher d'être trop rapidement accélérés sous l'action du champ électrique et va ainsi retarder la formation des électrons germes de la décharge.

La rigidité diélectrique du SF6 augmente en fonction de la pression, par comparaison entre la variation de la rigidité à (1bar) et à (5bar).

La rigidité diélectrique à (5bar) peut atteindre jusqu'à 240 (kV/cm).

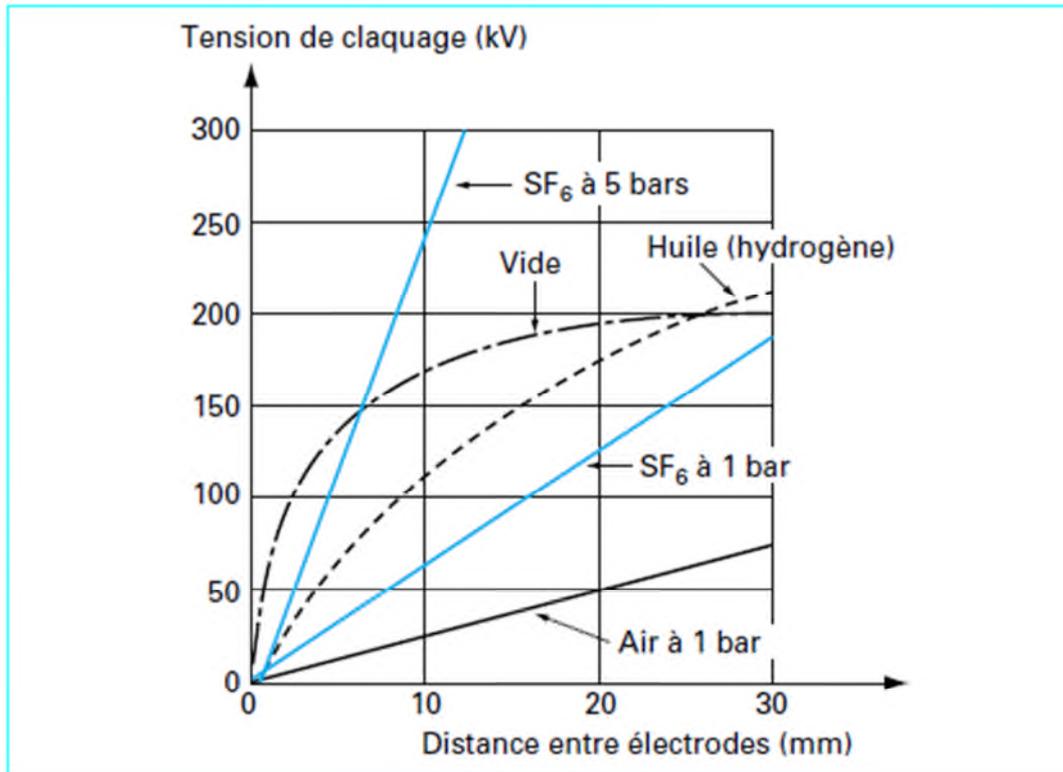


Figure. 1.8 : Rigidité diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes [3].

❖ Le SF6 est l'environnement

Le SF6 ne contribue pas de façon significative à l'appauvrissement en ozone stratosphérique, car il ne contient pas de chlore, qui est le principal agent responsable de la catalyse de l'ozone, ni à l'effet de serre en raison des très faibles quantités présentes dans l'atmosphère [11].

❖ Historique

Bien que les excellentes qualités diélectriques du SF6 étaient connues dès 1938, la révélation des propriétés exceptionnelles du SF6 pour l'interruption d'un courant a été faite dans le brevet de H.J. Lingal, T.E. Browne et A.P. Storm déposé aux États-Unis le 19 Juillet 1951. La première réalisation d'un disjoncteur SF6 à haute tension a été faite en 1956 par Westinghouse mais le pouvoir de coupure était alors limité à 5 kA sous 115 kV et cet appareil comportait 6 chambres de coupure en série par pôle. Dans le même temps, en 1957, les Ateliers de Constructions électriques de Delle ont réalisé un disjoncteur 23 kV, de type FRUR, pour cellules de distribution, puis un disjoncteur Dead Tank pour locomotive 25 kV, auto pneumatique à buse isolante. Il faut attendre 1959 pour voir la production par Westinghouse du premier disjoncteur SF6 à grand pouvoir de

coupure 41,8 kA sous 138 kV et 37,6 kA sous 230 kV. Ce disjoncteur tripolaire du type Dead Tank comprenait 3 chambres de coupure en série par pôle et fonctionnait avec une pression relative de SF6 de 13,5 bars pour le soufflage et de 3 bars pour assurer la tenue diélectrique.

- Dans ce qui suit on va présenter un disjoncteur SF6 HT 90 kV à une chambre de coupure de type 3AP1 FI dont le numéro de fabrication est : 35078731...734.

1.11. Le disjoncteur 3AP1 FI 90 kV

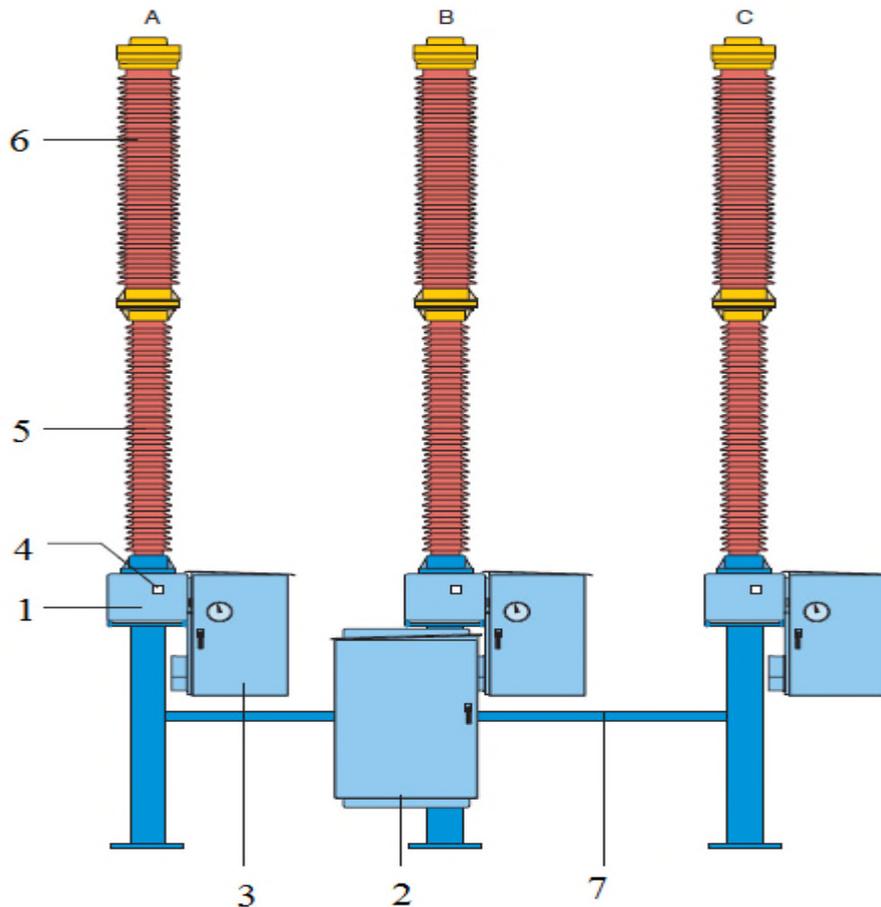


Figure. 1.9 : Disjoncteur SF6 HT 3AP1 FI 90 kV [12].

1. châssis, 2.coffret d'appareillage, 3.coffret de commande, 4.indication de position de commutation, 5.support isolant, 6.élément de coupure, 7.goulotte, (A, B, C) colonnes polaires.

1.11.1 Description du disjoncteur SF6 3AP1 FI 90KV

Le disjoncteur 3AP1 FI est un disjoncteur à trois pôles à auto-compression pour installation extérieure. Le gaz d'isolation et d'extinction utilisé est le SF6. Le disjoncteur est équipé d'une commande à accumulation d'énergie par ressorts pour chaque phase, ce qui permet la refermeture rapide uni- et tripolaire [12].

1. Colonnes polaires

Les colonnes polaires du disjoncteur sont identiques. La (Figure.1.10) représente une colonne polaire en coupe.

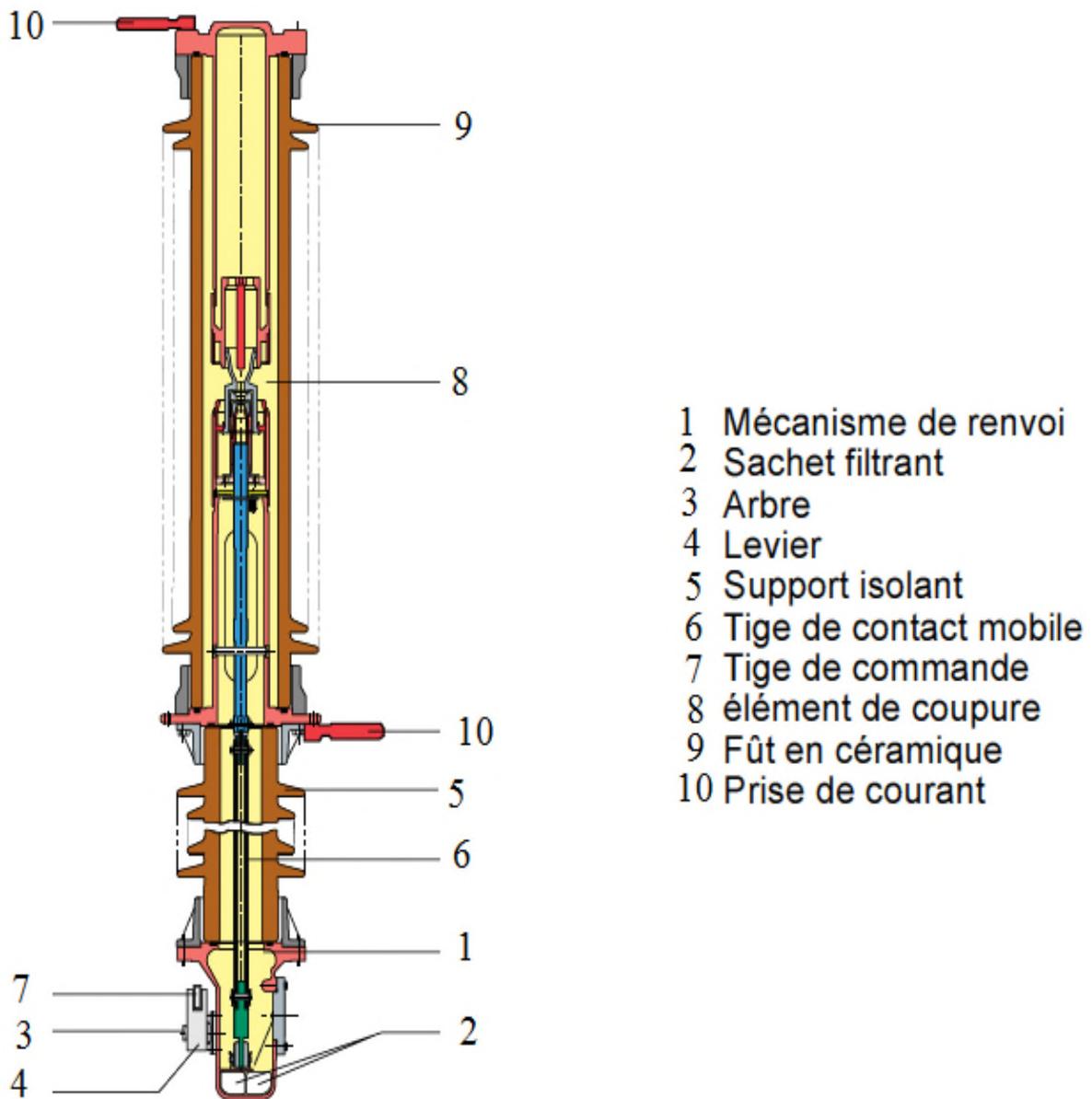


Figure.1.10 : vue en coupe d'une colonne polaire [12].

La chambre de coupure (8) est disposée sur le support (5) qui l'isole par rapport à la terre. Chaque colonne polaire est remplie par le gaz SF6 et équipée d'une surveillance de densité et de pression du gaz par un contrôleur [12].

1.1.La chambre de coupure

La chambre de coupure est située à l'intérieur de chaque colonne polaire des trois phases, elle a le rôle d'interrompre le passage du courant électrique ou de le rétablir (ouverture ou fermeture du circuit électrique). Elle est constituée principalement de deux éléments qui assurent la connexion et la déconnexion des contacts du disjoncteur sous l'influence de la force mécanique et la force pneumatique qui est créée grâce à la propriété thermique du gaz SF6 en donnant naissance à un soufflage dans la buse. [12].

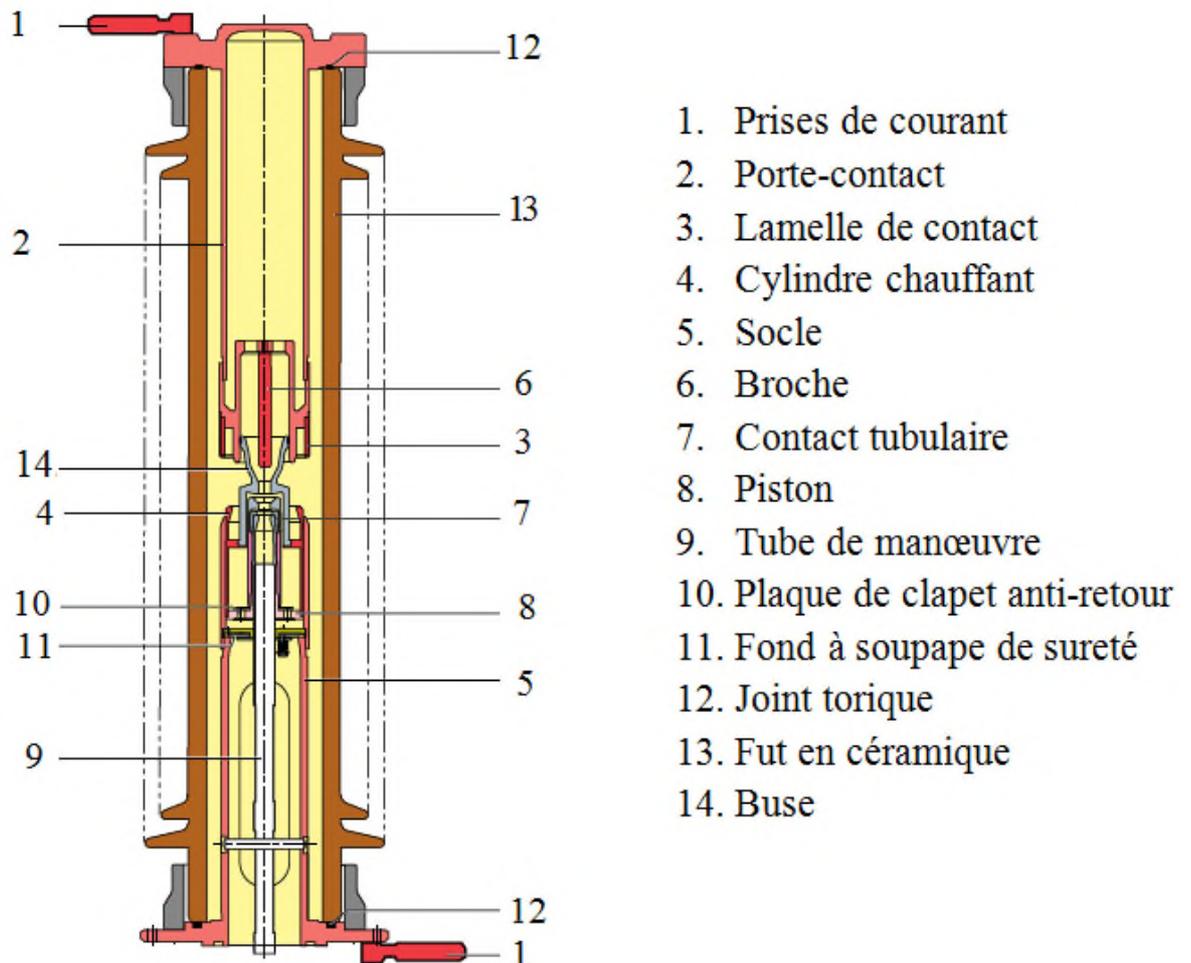


Figure.1.11 : Vue en coupe d'une Chambre de coupure du disjoncteur 3AP1 FI 90 kV [12].

➤ **Constitution**

Le circuit principal est constitué par la prise de courant supérieure (1), le porte-contact (2), les doigts de contact (3) disposés en couronne dans le porte-contact, le cylindre chauffant (4), le socle (5) et la prise de courant inférieure (1).

Les lamelles de contact (3) comportent à leurs deux extrémités un ressort hélicoïdal qui les repousse vers l'intérieur pour créer la pression de contact nécessaire, respectivement sur le cylindre chauffant (4) et sur le porte-contact (2).

Le circuit principal est doublé en parallèle par le circuit d'arc constitué par la broche (6) solidaire du porte-contact (2) et par le contact tubulaire mobile (7) disposé dans le cylindre chauffant (4).

La broche (6) et le contact tubulaire mobile (7) sont réalisés dans un matériau présentant une haute résistance à l'érosion par l'arc.

Le contact tubulaire (7), le piston (8) et le cylindre chauffant (4) sont mécaniquement solidaires ; ils sont attelés au tube de manœuvre (9) pour former l'équipage mobile de l'élément de coupure.

Le piston (8) avec la plaque de clapet anti-retour (10) forme, en combinaison avec le fond à soupape de sûreté (11), le dispositif de compression pour l'extinction de l'arc.

La chambre de coupure est remplie par le gaz SF6 qui joue le rôle du milieu extincteur, en s'appuyant sur ses propriétés extinctrices de l'arc [12].

2. Coffret d'organe de manœuvre

Le fonctionnement des disjoncteurs est assuré par des organes de manœuvre ou « commandes » qui fournissent l'énergie nécessaire pour effectuer soit des opérations d'ouverture et de fermeture, soit des cycles de manœuvre tels que fermeture-ouverture ou la séquence de manœuvre assignée.

Dans ce coffret se trouve les moyens qui permettent de commander et de manœuvrer le disjoncteur manuellement ou automatiquement, grâce au levier de manœuvre et à l'énergie potentielle nécessaire, au mécanisme, pour manœuvrer le contact d'un pôle, cette énergie est accumulée dans les ressorts de fermeture et d'ouverture [12].

3. Coffret d'appareillage

Il contient tous les dispositifs nécessaires pour commander, surveiller et contrôler le disjoncteur. Dans ce coffret se trouvent des contacteurs reliés aux dispositifs de protection et aux dispositifs de commande à distance basés sur la télécommunication [12].

4. Les câbles de liaison

Ils servent au couplage électrique entre la commande et le mécanisme [12].

5. L'organe de commande

L'organe de commande doit être capable d'assurer le cycle complet de l'appareil dans toutes les conditions normales de fonctionnement :

- en coupure ou fermeture de courants de court-circuit ;
- à haute et à basse température.

Une commande en position déclenchée, avec le ressort d'enclenchement tendu et celui de déclenchement détendu. Un moteur électrique très démultiplié et de faible consommation permet de comprimer le ressort d'enclenchement après une manœuvre de fermeture.

Enfin de compression, le moteur est maintenu sous tension à l'aide de l'accrochage d'enclenchement.

La libération de l'accrochage provoque la détente du ressort d'enclenchement, la fermeture du disjoncteur et l'armement du ressort de déclenchement. Il est alors possible d'effectuer un déclenchement du disjoncteur en libérant l'accrochage, puis d'effectuer un nouveau cycle de fermeture-ouverture.

- Les commandes à ressorts équipent maintenant les disjoncteurs à haute tension jusqu'à 550 kV pour les raisons suivantes :
 - La mise au point de nouveaux principes de coupure à faible énergie de manœuvre.
 - La réduction des masses mobiles des disjoncteurs.
 - L'optimisation de la chaîne cinématique qui relie la chambre de coupure à l'organe de manœuvre.
 - Une faible perte d'énergie interne.
 - Un nombre réduit de composants.
 - Un fonctionnement plus souple, avec un impact réduit sur la structure du disjoncteur [12].

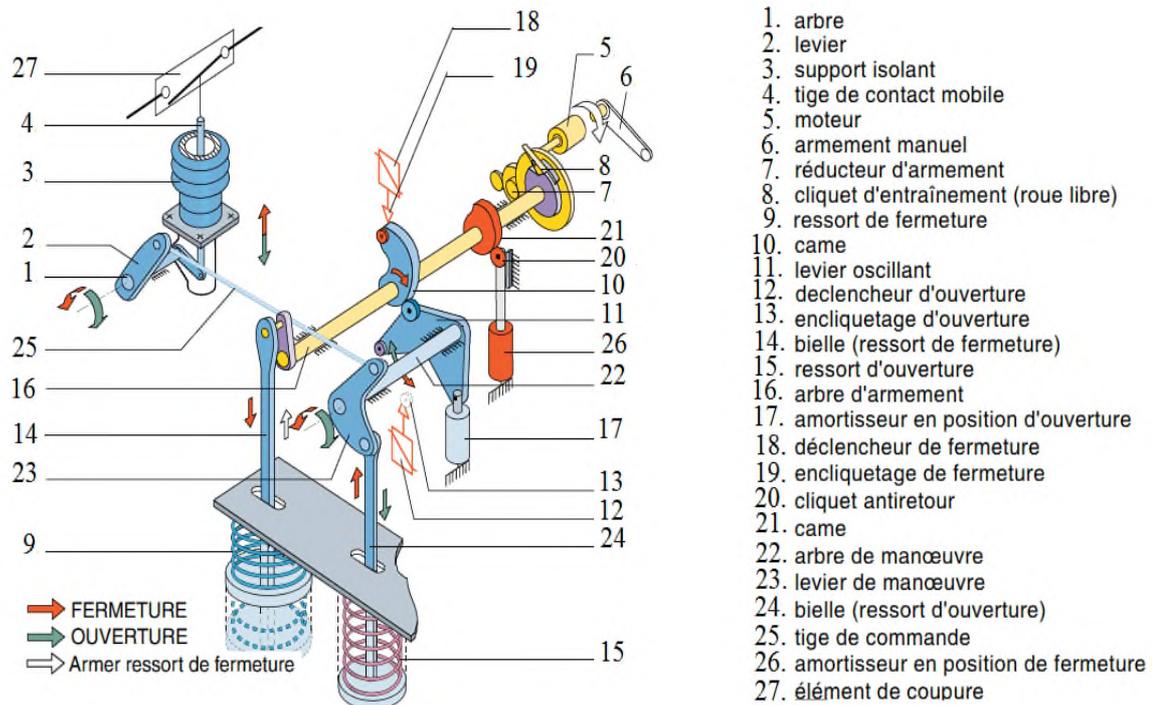


Figure.1.12 : Schéma fonctionnel de la commande à accumulation d'énergie par ressorts [12].

1.11.2 Fonctionnement du disjoncteur

Le disjoncteur fonctionne automatiquement, suite à la présence un court-circuit dans le réseau électrique, ce dernier sera détecté par la protection située dans le coffret d'appareillage et il va émettre un signal qui sera transmis au coffret du mécanisme de commande via un câble de liaison.

Le mécanisme de la commande va réceptionner le signal et manœuvrer le contact du disjoncteur, par un cycle de manœuvre ouverture-fermeture.

Si le défaut n'est pas éliminé, d'autres cycles seront effectués (2 à 5 cycles) selon la capacité de l'énergie accumulée dans le mécanisme.

Dans le cas où le court-circuit n'est pas fugitif, il s'agit d'un court-circuit permanent, le disjoncteur reste ouvert et un signal sera transmis par l'opérateur du réseau électrique, via le dispositif de télécommunication situé dans le coffret d'appareillage à l'aide des capteurs de surveillance.

L'opérateur du réseau électrique élimine le défaut par une intervention de maintenance et il manœuvre le disjoncteur à l'aide d'une télécommande à distance et de dispositif de télécommunication et de mécanisme de commande, la manœuvre dans ce cas sera ouverture ou fermeture.

Le disjoncteur peut fonctionner automatiquement par la protection ou volontairement à l'aide d'une télécommande [12,13].

1.12. Dimensionnement des disjoncteurs

Le dimensionnement des disjoncteurs se fait en se basant sur plusieurs critères.

1.12.1. Les critères de dimensionnement

- Détermination et calculs des courants de courts-circuits en tout point du réseau
- La modélisation d'arc électrique.
- La tension maximale à ne pas dépasser pour assurer la tenue diélectrique.
- La température limite de gaz lors de l'extinction de l'arc dans la chambre de coupure.
- Des règles empiriques obtenues en combinant des connaissances sur la physique de l'arc.
- Des règles de dimensionnement des pièces conductrices du courant permettant de ne pas dépasser les limites d'échauffement admissibles.
- Une valeur d'énergie maximale pouvant être dissipée dans la résistance lors de la fermeture.
- Déterminer la valeur de la capacité shuntée en parallèle avec la chambre de coupure pour améliorer la tenue diélectrique [13].

Dans ce domaine, comme dans d'autres domaines techniques, il n'y a pas toujours unicité de point de vue quant à la validité des critères. En fin de compte, c'est la comparaison avec les résultats expérimentaux qui permet de valider les critères de dimensionnement [13].

1.13. Conclusion

À travers ce chapitre, une description des disjoncteurs haute tension d'une manière générale et des disjoncteurs SF6 haute tension d'une manière particulière ont été données.

Le disjoncteur HT dans un réseau électrique est chargé d'interrompre et de rétablir la continuité du passage d'un courant électrique, cette fonction engendre des phénomènes électriques sévères.

Chapitre 02

*La coupure d'un courant
alternatif par un disjoncteur
SF6 HT*

2.1. Introduction

La protection des réseaux électriques est l'ensemble des dispositions destinées à la détection et l'élimination des défauts ou toutes autres situations anormales.

Tout défaut doit être identifié immédiatement afin d'isoler le plus rapidement possible les parties ou les réseaux touchés, cependant, aucun isolement ne peut être effectué sans l'interruption du courant électrique. Ce rôle est dédié principalement au disjoncteur.

L'interruption d'un courant électrique par un disjoncteur HT, cette action qui paraît simple, cache tout un ensemble de phénomènes physiques délicats et très complexes qui décident de la réussite ou de l'échec de la coupure.

Dans ce contexte, le présent chapitre traite les phénomènes de coupure d'un courant électrique d'une manière générale et les phénomènes de coupure liés à l'interruption d'un courant alternatif par un disjoncteur SF6 HT d'une manière particulière.

2.2. L'interruption des courants électriques

Il est indispensable de pouvoir couper le courant en tout point du réseau pour des raisons d'exploitation et de maintenance ou pour la protection des personnes et des biens en cas de défaut.

Pour cela on emploie des appareils de connexion tels que les disjoncteurs dont le choix dépend de la nature des courants à couper et du domaine d'application.

Lors de la coupure ; il en résulte des phénomènes électriques et des contraintes sévères sur le réseau électrique et sur l'appareil de coupure.

Pour expliquer quelques phénomènes liés à la coupure des courants électriques comme la naissance d'arc, variation de sa résistance et échauffement thermique apparaissant dans l'appareil de coupure ; on va étudier la coupure des courants continus et des courants alternatifs.

2.2.1. Interruption d'un courant continu

On prend le cas le plus simple ; un circuit inductif (R, L) alimenté en courant continu (Fig. 2-1).

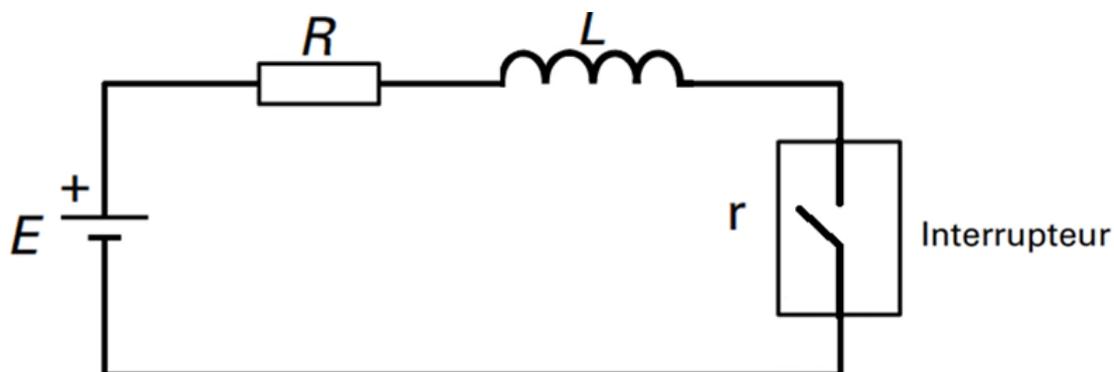


Figure. 2.1 : Circuit (R, L) en courant continu.

Lorsque l'interrupteur est fermé un courant continu d'intensité I circule dans le circuit.

Pour réaliser l'interruption du courant parcourant ce circuit, on ouvre l'interrupteur. Une résistance r apparaît entre les contacts de l'interrupteur qu'on a appelé résistance de l'interrupteur. Il faut que la résistance r de l'interrupteur supposée initialement nulle, croisse et devienne infinie. 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 dans la (Fig. 2.2) [14].

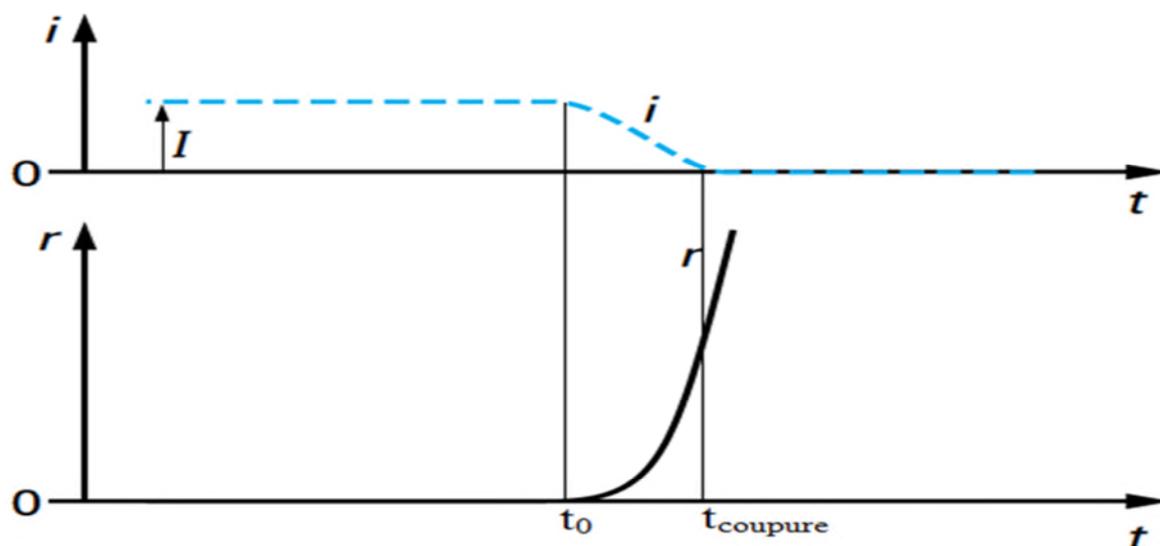


Figure. 2.2 : Variation de la résistance en fonction du courant durant la coupure [14].

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

$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0$$

- L'énergie de coupure est:

$$\int_{t_0}^{t_c} ri^2 dt = \int_{t_0}^{t_c} (E - Ri)idt - \int_I^0 Lidi$$

Avec :

t_0 : instant initial de séparation des contacts

t_c : instant de coupure

r : la résistance apparue lors de la coupure

E : la tension de la source

R : la résistance de circuit

L : l'inductance de circuit

I : valeur du courant avant la coupure

i : le courant qui circule dans le circuit pendant la phase transitoire entre t_0 et t_c

Cette énergie est constituée de deux types :

- Energie électrique qui dépend du temps :

$$\int_{t_0}^{t_c} (E - Ri)idt$$

- Energie électromagnétique qui dépend de courant :

$$- \int_I^0 Lidi = \frac{1}{2} LI^2$$

- d'après les relations ci-dessus le calcul montre que l'énergie dépensé par effet joule dans l'interrupteur au cours de la coupure est d'autant plus faible que la variation de la résistance de ce dernier est plus rapide, donc on intérêt à agir dans ce sens.
- D'un autre coté on constate que même si la variation de cette résistance est très rapide ; l'interrupteur doit absorber sans dommage la totalité de l'énergie électromagnétique emmagasiné dans l'inductance propre du circuit.
- Il faut prendre en considération la surtension induite par la bobine, elle est d'autant plus grande que la variation de la résistance est plus rapide [5].

Donc pour la réussite de la coupure :

- il faut fixer une limite à ne pas dépasser pour la valeur de la surtension et une fois cette limite est définie, la loi de la variation de la résistance se trouve imposée
- il faut choisir un interrupteur d'une résistance qui peut absorber sans dommage la totalité de l'énergie électromagnétique emmagasinée dans l'inductance propre du circuit.

2.2.2. Interruption d'un courant alternatif

On prend le cas le plus simple ; un circuit inductif (R, L) alimenté en courant alternatif (figure 2.3).

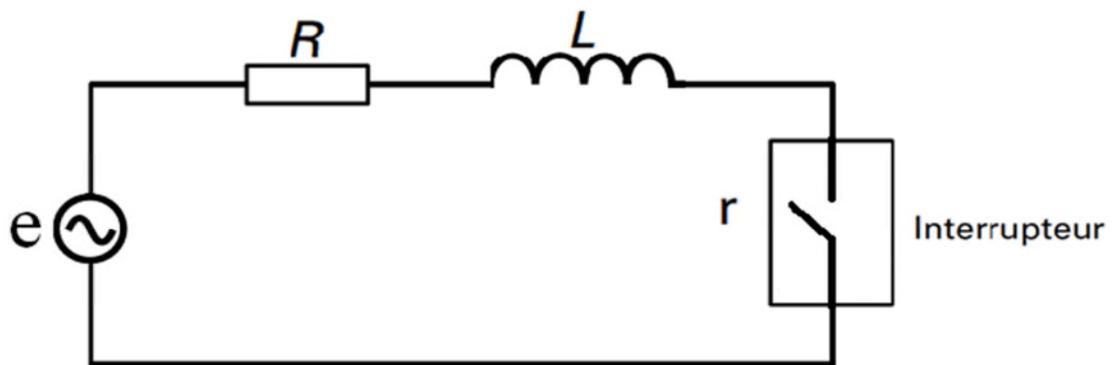


Figure. 2.3 : Circuit R L en courant alternatif.

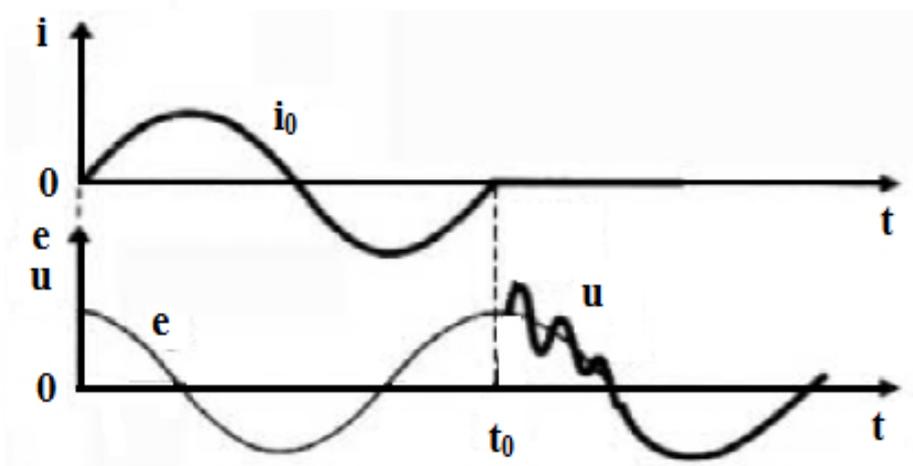


Figure. 2.4 : Coupure au passage par le zéro du courant [3].

Pour l'interruption d'un courant alternatif, l'appareil de coupure va subir les mêmes phénomènes et contraintes que celle d'un courant continu, qui seront plus importants et sévères, mais avec la possibilité de prendre des précautions afin de les optimiser.

L'instant initial de coupure dans le courant alternatif est très important pour l'optimisation des contraintes et phénomènes survenant durant l'interruption. Autrement dit :

Si l'instant initial de coupure commence à un instant quelconque de l'onde de courant et par coïncidence son départ passe par la valeur crête du courant (courbe i_1 figure.2.5), l'énergie de coupure atteindra sa valeur maximale.

A l'inverse, Si l'instant initial de coupure commence lorsque le courant est très faible (courbe i_2 figure.2.5), l'énergie de coupure pourra être très réduite.

Donc en courant alternatif, il existe une possibilité de coupure sans aucune dépense d'énergie, si la coupure se produit à l'instant précis du passage à zéro du courant [5].

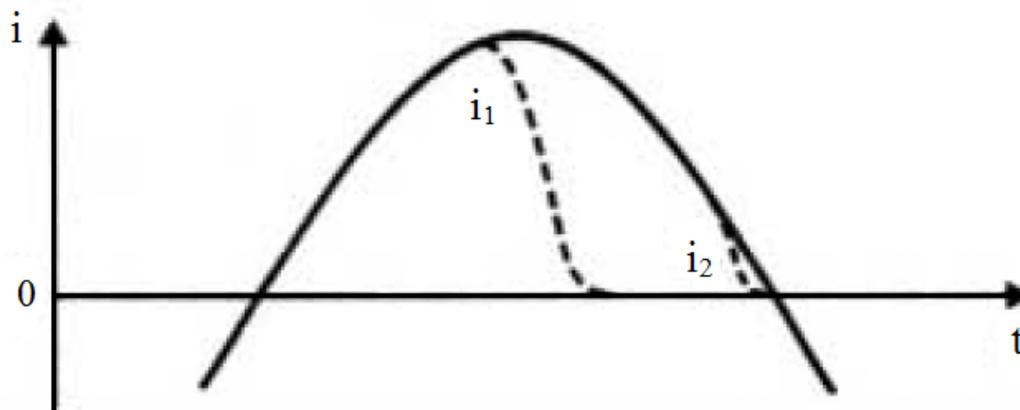


Figure.2.5 : Importance de l'instant de la coupure dans l'interruption d'un circuit alimenté par un courant alternatif [5].

- ❖ Les choses sont bien différentes de ce qui se passe en courant continu, où l'instant initial de coupure est sans influence, où l'on n'échappe pas à une certaine dépense d'énergie dans l'interrupteur.

2.3. La coupure grâce à l'arc électrique

Deux raisons expliquent l'existence d'un arc :

- Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro de du courant, du fait de l'incertitude mesure-commande.
- 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.

L'arc électrique permet de dissiper de l'énergie par effet joule dans le milieu inter contacts lors d'interruption de courant [3].

2.3.1 Les caractères électriques de l'arc

L'arc électrique est caractérisé par [3]:

- une résistance ou conductance électrique variable en fonction du temps et de l'intensité du courant
- une intensité de courant très élevée.
- une tension croissante en fonction de l'évolution de l'arc et ce à partir de zéro au moment de sa naissance jusqu'à un pic lors de son extinction.
- Energie de l'arc

$$W_{arc} = \int_{t_0}^{t_{arc}} U_{arc} * I_{arc} * dt$$

❖ Le processus de coupure avec un arc se fait en trois phases :

a. La phase d'attente

Avant le zéro de courant, les deux contacts se séparent provoquant la rupture diélectrique du milieu inter contacts. Un arc électrique apparait, le milieu inter contact devient conducteur, la continuité du courant est entretenu par l'énergie dissipée par l'arc. La coupure se fait donc au voisinage du zéro « naturel » du courant alternatif [3].

b. La phase d'extinction

L'interruption du courant qui correspond à l'extinction de l'arc se fait au zéro du courant à condition que le milieu redevienne rapidement isolant. Pour cela, le canal de molécules ionisées doit être cassé. 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 inter contacts. Au zéro de courant, cette résistance à une valeur qui n'est pas infinie et un courant post-arc traverse encore l'appareil [3].

c. La phase post-arc

Pour que la coupure soit réussie, il faut que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que l'évolution de la tension transitoire de rétablissement TTR, sinon il aura un réallumage ou réamorçage de l'arc [3].

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

2.4. Les principaux cas de coupure par un disjoncteur HT

Les disjoncteurs des réseaux HT peuvent avoir à manœuvrer dans des circonstances très variées :

- La coupure d'un courant de charge normale comme tout interrupteur,
- La coupure de courant de court-circuit

2.4.1. La coupure des courants normaux de charge

Un disjoncteur peut avoir coupé un courant de charge inductive ou capacitive de quelques ampères à quelques centaines d'ampères est faible par rapport au courant de défaut, qui sera coupé sous tension et en charge, pour un fonctionnement normal. Dans de telles conditions, la coupure se fait sans difficulté puisque l'appareil est dimensionné pour couper des courants plus élevés [3].

2.4.2. La coupure des courants de défaut

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. Lorsque le courant passe par zéro la tension du réseau est à son maximum ou presque.

Le processus de la coupure se fait comme décrit précédemment en trois phases

(figure. 2.6) :

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

La tension « u » entre les bornes du disjoncteur rejoint cette tension en suivant un régime transitoire appelé « TTR » qui dépend des paramètres du réseau et que fixent les normes.

Le pouvoir de coupure « assigné » aux disjoncteurs varie de 15 à 60 kA environ.

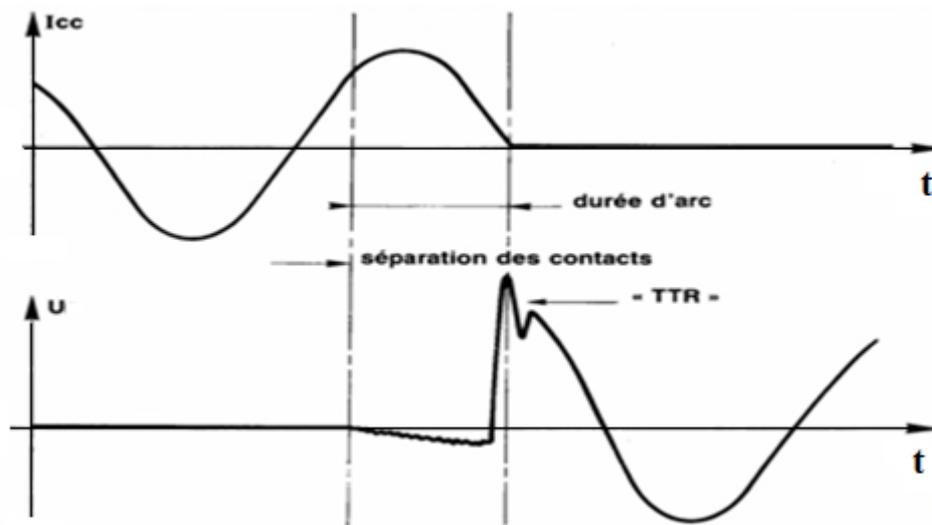


Figure. 2.6 : Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit [4].

❖ Cas de coupure difficiles

- Un courant apériodique peut s'ajouter au courant sinusoïdal au début du court-circuit, de sorte que les amplitudes dans une polarité sont plus grandes que dans l'autre (fig.2. 7). On dit que le courant est « asymétrique ».

L'énergie dissipée dans l'arc est alors plus grande et la coupure plus difficile ;

- lorsque le défaut se situe à une faible distance du disjoncteur, le régime transitoire de la tension qui apparaît aux bornes de celui-ci, peut rendre la coupure plus difficile. On parle de « défaut en ligne » ou de « défaut kilométrique » [4];

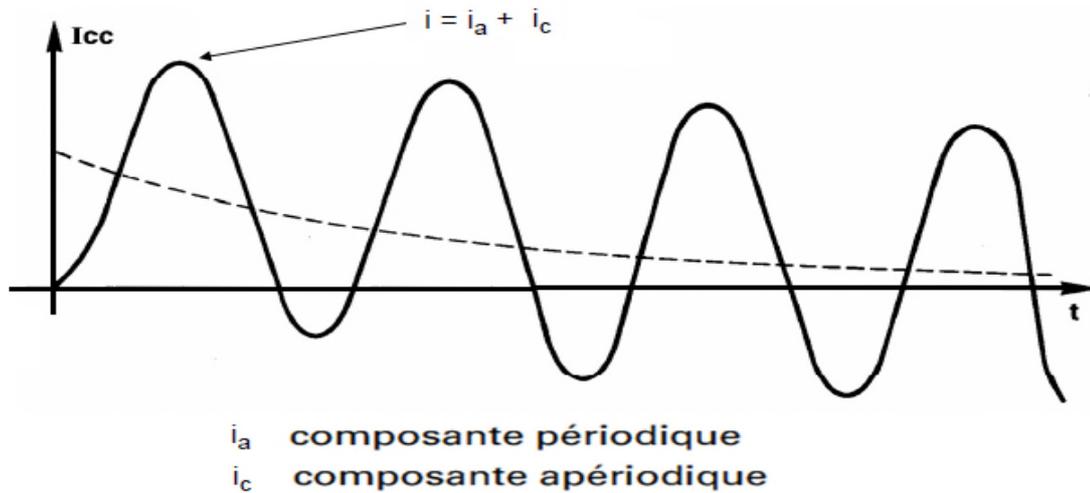


Figure.2.7 : courant asymétrique à deux composantes [4].

2.5. Conditions nécessaires pour réussir la coupure

Tout le problème de coupure d'un courant alternatif réside dans la vitesse d'extinction de l'arc électrique qui naît entre les contacts, cet arc assure la continuité de passage du courant entre les contacts et aussi la reprise des propriétés diélectriques du milieu entre les contacts pour devenir rapidement isolant [3,5].

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 du courant d'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 engendre une surtension pic au moment de l'extinction de l'arc.
- Un milieu avec une conductivité thermique importante en particulier après la phase de naissance d'arc pour évacuer et transporter le flux concentré d'énergie de l'arc loin des contacts.
- 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 (émission de gaz toxique, développer des rayons dangereux, explosion ...).
- ❖ Dans le domaine de la haute tension le disjoncteur répondant à ces critères est le disjoncteur à SF6 grâce aux propriétés remarquables du gaz SF6 utilisé comme milieu de coupure (voir chapitre 1).

2.6. Etude des courants de court-circuit dans un réseau HT

2.6.1 Courants de court-circuit

Le court-circuit est l'un des incidents majeurs qui peuvent affecter les réseaux électriques en obligeant les disjoncteurs à réagir.

2.6.2. Origines

Les différents composants des réseaux sont conçus, construits et entretenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Ce risque n'est donc pas nul et des incidents ou défauts d'origine [15] :

1. extérieur tel que :

- Perturbation atmosphérique comme la foudre, tempête, vent...etc. sur les lignes aériennes
- Agression extérieur du a l'activité humaine comme l'effet des engins de terrassement sur les câbles souterrains.

2. intérieur tel que :

- Les matériels de réseaux et postes électriques qui comportent des isolants (solides, liquides ou gaz) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre parties sous tension et masse. Les isolants peuvent subir des dégradations conduisant à des défauts d'isolement qui se traduisent par des courts-circuits.

2.6.3. Caractéristiques des courts-circuits

Les courts-circuits sont caractérisés par leurs types, leurs durées et leurs intensités.

a. types de court-circuit

Un court-circuit dans les réseaux électriques peut être :

- **Monophasé** : entre une phase et la terre ou une phase et une masse : 80% des cas ;

- **Biphasé** : entre deux phases raccordées ensemble, peut être un court-circuit biphasé mis à la terre ou biphasé isolé : 15% des cas ;
- **Triphasés** : entre trois phases de la ligne ou trois phases et la terre : 5 % seulement des cas, ce sont les plus sévères dont ils représentent les circuits d'essais pour les disjoncteurs dans le but de déterminer leurs pouvoirs de coupure.

b. Nature des courts-circuits

- **Courts-circuits auto-extincteurs** : la durée du défaut est trop courte pour déclencher la protection.
- **Court-circuits fugitifs** : sont des courts-circuits de courte durée éliminés après déclenchement et réenclenchement de la protection [3,7].
- **Court-circuit semi permanents** : Ces courts-circuits exigent pour disparaître une ou plusieurs coupures relativement longues du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dizaines de secondes) sans nécessiter d'intervention du personnel d'exploitation [16].
- **Courts-circuits permanents** : comme leur nom l'indique, le déclenchement de la protection ne provoque aucune disparition du défaut. Ce genre de défaut exige une intervention du personnel [7].

c. Intensité des courts-circuits

L'intensité du courant de court-circuit est une caractéristique importante ; elle détermine la sévérité de la contrainte appliquée au réseau et à l'appareil de coupure. Elle dépend de la forme des courts-circuits et, pour ceux impliquant la terre, du mode de mise à la terre du point neutre [15].

2.6.4. Effets des courants de courts-circuits

Les courts-circuits dans les réseaux électriques ont des effets néfastes :

- le court-circuit perturbe l'environnement du réseau autour du point de défaut par le creux de tension brutal qu'il entraîne.
- il contraint à mettre hors service, par le jeu des protections appropriées, une partie souvent importante du réseau, tous le matériel et liaisons (câbles, lignes) traversés par le court-circuit subissent une forte contrainte mécanique (efforts électrodynamiques) qui peut entraîner des ruptures des liaisons, une contrainte thermique pouvant entraîner la fusion des conducteurs et la destruction des isolants,

- Au point de défaut se manifeste le plus souvent un arc électrique de forte énergie, dont les effets destructeurs sont très importants, et qui peut se propager très rapidement [7].
- De plus l'arc électrique, consécutif à un court-circuit, met en jeu un important dégagement local d'énergie pouvant provoquer d'importants dégâts au matériel et être dangereux pour le personnel travaillant à proximité [16].

2.6.5. Calcul des différents types de court-circuit

Le tableau.2.1, donne les formules permettant de calculer le courant initial des différents types de court-circuit en se basant sur la méthode des composantes symétriques.

Type de dissymétrie	Dissymétrie impédante	Dissymétrie franche (Z = 0 et/ou Zc = 0)
Court-circuit monophasé	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o + 3Z }$	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o }$
Court-circuit biphasé terre (Zc = 0)	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3} Z_i }{ Z_d \times Z_i (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z) }$	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3} Z_i }{ Z_d \times Z_i + Z_i \times Z_o + Z_d \times Z_o }$
Court-circuit biphasé isolé (Z = m)	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_i + Z_c }$	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_i }$
Court-circuit triphasé (Z quelconque)	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_c \sqrt{3}}$	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d \sqrt{3}}$

Tableau 2.1 : Le tableau ci-dessous récapitule les courants en module dans différentes dissymétries [17].

U : tension efficace composée du réseau triphasé

V : tension efficace simple du réseau triphasé

I_{cc} : le module du courant de court-circuit.

I_{terre} : courant de défaut terre en module

Z_d, Z_i, Z_o : impédances symétriques directe, inverse, homopolaire

Z_c : impédance de court-circuit

Z : impédance de terre

2.7. Les caractéristiques principales d'un disjoncteur HT

2.7.1. Le pouvoir de coupure assigné

Le pouvoir de coupure assigné est la valeur la plus élevée du courant de court-circuit que le disjoncteur doit être capable d'interrompre dans les conditions d'emploi et de fonctionnement fixées par la norme CEI60056[2].

Le courant de court-circuit est caractérisé par la somme de deux composantes (fig.2.8).

- La composante périodique
- La composante apériodique

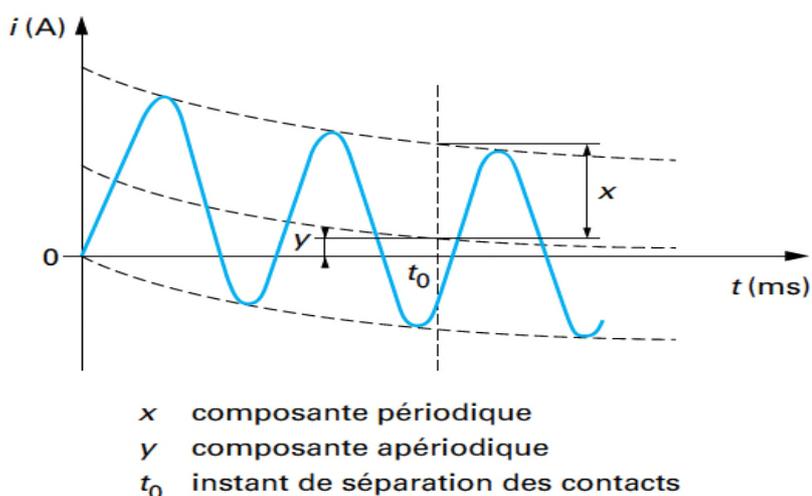


Figure. 2.8 : forme de courant à couper avec une composante apériodique [2].

❖ Le pouvoir de coupure assigné en court-circuit est caractérisé par deux valeurs :

1. la valeur efficace de sa composante périodique.

Les valeurs normales de la composante périodique du pouvoir de coupure assignée en court-circuit sont choisies dans la série de Renard R10 comme suit :

12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 kA.

2. le pourcentage de la composante apériodique par rapport à la composante périodique.

La valeur du pourcentage de la composante apériodique (figure.2.9) est basée sur l'intervalle de temps ($t_{op} + t_r$) et la constante de temps 'taux' utilisés dans la formule ci dessous :

$$\frac{i_{ap}}{i_p} (\%) = 100e^{-(t_{op}+t_r)/\tau}$$

La formule ci-dessus peut être déduite de la (figure.2.9).

($t_{op} + t_r$) : la durée entre la détection du défaut et l'instant de séparation des contacts du disjoncteur.

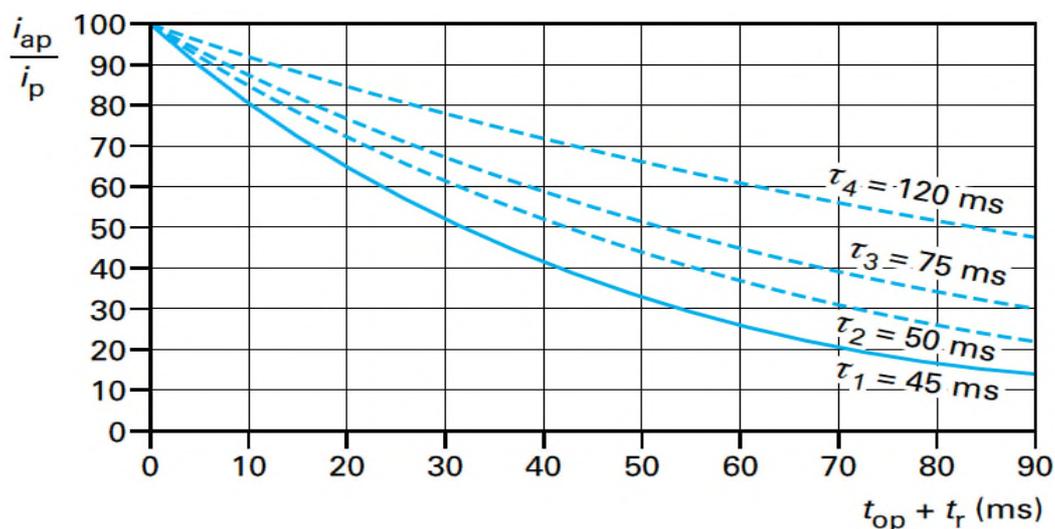
t_{op} : la durée d'ouverture minimale du premier pôle du disjoncteur

t_r : « temps relais », correspond à la durée nécessaire pour que l'ordre soit transmis au disjoncteur après détection du défaut.

Taux : constante de temps

i_{ap} : composante aperiodique du courant de court-circuit

i_p : la valeur crête de la composante périodique.



$$\frac{i_{ap}}{i_p} = \frac{\text{composante aperiodique}}{\text{valeur crête de la composante periodique}}$$

Figure.2.9 : valeur du pourcentage de la composante aperiodique du pouvoir de coupure en fonction du temps.

La valeur du pourcentage de la composante aperiodique « i_{ap} », par rapport à la valeur de crête de la composante periodique « i_p », doit être déterminée comme suit :

- ❖ pour un disjoncteur à déclenchement autonome, le pourcentage de la composante aperiodique doit correspondre à un intervalle de temps égal à la durée d'ouverture minimale du premier pôle « t_{op} » du disjoncteur ; le temps « t_r » dans la formule précédente est égal à 0 ms ;

- ❖ pour un disjoncteur qui ne peut être déclenché que par une forme quelconque d'énergie auxiliaire, le pourcentage de la composante apériodique doit correspondre à un intervalle de temps égal à la durée d'ouverture minimale du premier pôle « t_{op} » du disjoncteur à laquelle on ajoute une demi-période (valeur normalisée) de la fréquence assignée « t_r ». La durée « t_r », appelé « temps relais », correspond à la durée nécessaire pour que l'ordre soit transmis au disjoncteur après détection du défaut.
- ❖ Les courbes de la composante apériodique en fonction du temps, indiquée sur la figure ci-dessus, sont basées sur :
 - a. une constante de temps normalisée de 45 ms ;
 - b. des constantes de temps pour des applications particulières,

Suivant la tension assignée du disjoncteur :

- 120 ms pour les tensions assignées inférieures à 72,5 kV ;
- 60 ms pour les tensions assignées à partir de 72,5 kV inférieures ou égales à 420 kV ;
- 75 ms pour les tensions assignées supérieures à 420 kV [2].

2.7.2. 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 préamorçage 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 préamorçage, 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 qui est nécessaire pour 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 préamorçage et donc de l'énergie générée par l'arc de préamorçage.

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 [2].

2.7.3. Tension transitoire de rétablissement

La coupure d'un courant de court-circuit dépend des caractéristiques du rétablissement de tension qui se produit entre contacts après l'interruption du courant. On convient de distinguer deux phases :

- 1. La tension transitoire de rétablissement (TTR)** est appliquée aux bornes de l'appareil dès la première microseconde qui suit l'interruption du courant et dure plusieurs centaines de microsecondes.
 - La TTR est en général oscillatoire à simple ou double fréquence.
 - La TTR est associée au pouvoir de coupure assigné en court-circuit. C'est la tension de référence qui constitue la limite de la tension transitoire de rétablissement présumée de circuits que le disjoncteur doit pouvoir couper lors d'un court-circuit à ses bornes [2].
- 2. La tension de rétablissement à fréquence industrielle** (50 ou 60 Hz) subsiste après disparition du régime transitoire sur tous les pôles. Elle s'exprime en valeur efficace. Lors des essais, elle doit être maintenue pendant au moins 100 ms afin de bien tester la tenue diélectrique de l'appareil pendant toute la phase de rétablissement de tension[2].

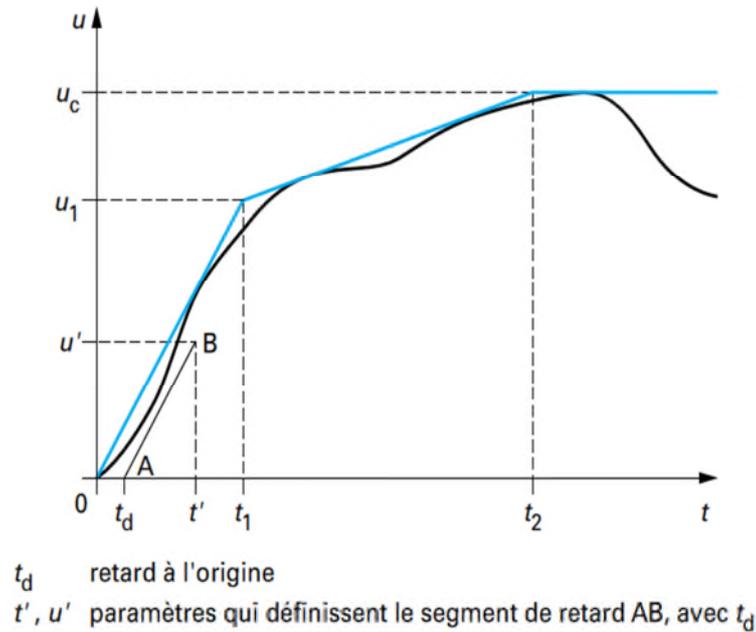


Figure. 2.10 : Représentation d'une TTR par quatre paramètres [2].

Le tracé par quatre paramètres « t_1, u_1, t_2, u_c » décrit la TTR pour deux zones principales en caractérisant :

- La partie initiale de la TTR où des réamorçages thermiques sont possibles.
- La zone proche de la crête de tension « u_c » réamorçages diélectriques peuvent se produire.

2.8. Extinction de l'arc dans le disjoncteur SF6 HT 3AP1 FI 90 kV

Lors de la coupure, le contact principal existant entre les lamelles de contact et le cylindre chauffant est d'abord ouvert (Fig. 2.11, Position « b »). Le contact d'arc électrique, se composant de la broche et du contact tubulaire, est encore fermé, de manière à ce que le courant commute sur le contact d'arc électrique. Le mouvement continue par l'ouverture du contact d'arc, ce qui donne naissance à un arc (Fig. 2.11 position « c »). En se déplaçant vers le bas, le cylindre chauffant comprime le gaz d'extinction emprisonné entre le piston et le fond. De ce fait, le gaz s'écoule dans le sens opposé au sens de déplacement de l'équipage mobile à travers le clapet anti-retour pour parvenir dans le cylindre chauffant et s'échapper à travers l'interstice entre le contact tubulaire et la buse d'extinction, provoquant ainsi l'extinction de l'arc.

En présence de courants de court-circuit de forte intensité, le gaz d'extinction se trouvant dans la chambre d'extinction autour de la broche est fortement chauffé par l'énergie développée dans l'arc et est propulsé sous haute pression dans le cylindre chauffant. Au voisinage du passage par zéro du courant, le gaz s'échappe à nouveau du cylindre chauffant et traverse la buse, provoquant ainsi l'extinction de l'arc. Au cours de cette opération, le clapet anti-retour dans le cylindre chauffant empêche le gaz sous haute pression de s'échapper dans la chambre de compression entre le piston et la soupape de remplissage [12].

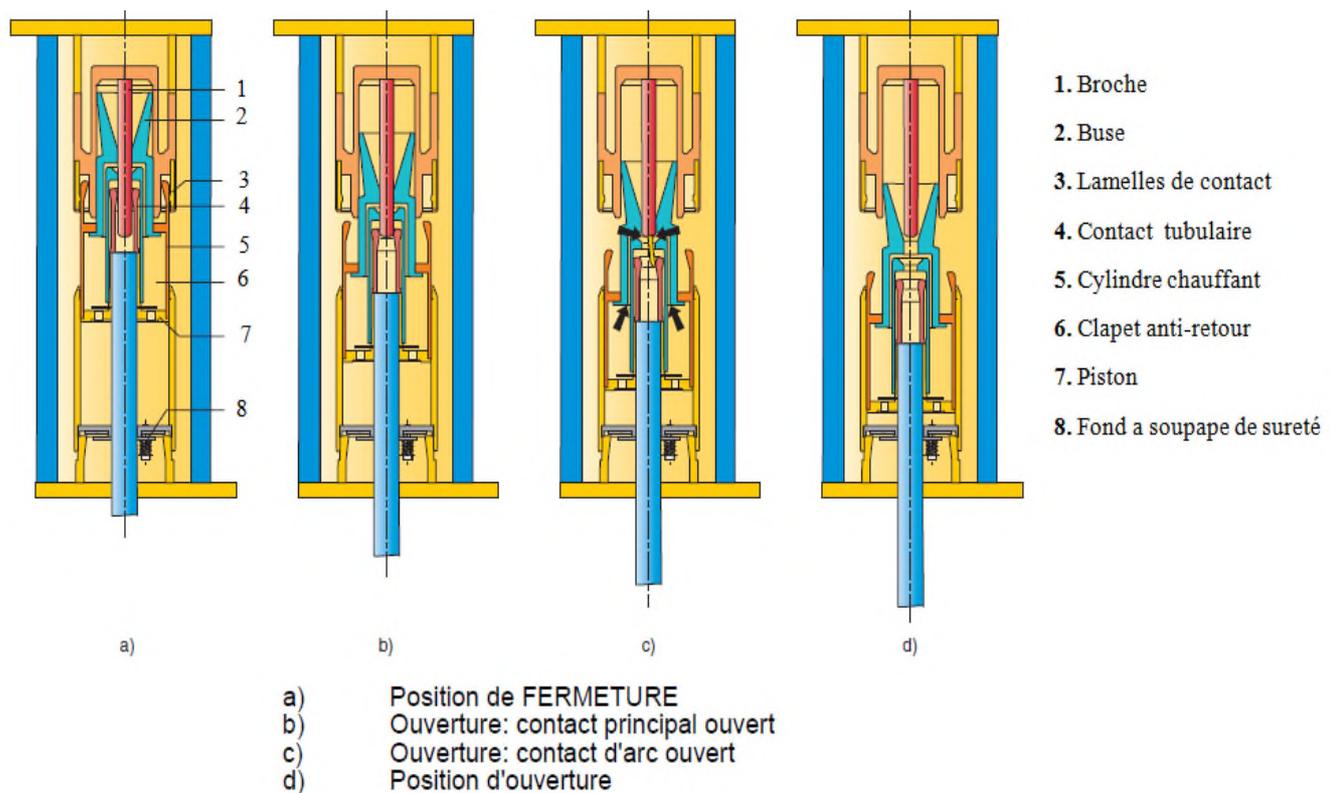


Figure.2.11 : Représentation schématique de la manœuvre d'ouverture [12]

2.9. Conclusion

Pour réussir l'interruption d'un courant et améliorer les performances de fonctionnement d'un disjoncteur, il faut maîtriser les phénomènes électriques liés à la coupure du courant électrique.

Les tâches les plus difficiles à maîtriser sont l'extinction de l'arc électrique et le rétablissement de la tenue diélectrique entre les contacts.

Chapitre 03

Les modèles d'arc à boîte noire

3.1. Introduction

La réussite de l'interruption d'un courant par le disjoncteur SF6 HT réside principalement dans la capacité du disjoncteur à éteindre l'arc électrique développé lors de l'interruption d'un courant et sa capacité à inhiber son apparition après l'extinction.

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.

3.2. 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 par phénomène physique, qu'on peut les classer en trois types :

➤ **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 environnant gazeux.
- la pression et le volume du milieu environ gazeux.
- l'influence de rayonnement lumineux émit par l'arc sur le gaz environ.

➤ **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.

➤ **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.

3.3. 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 :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) \quad (3-1)$$

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.

3.4. 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).

3.4.1. Le modèle de Mayr

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

Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses.

➤ Première hypothèse

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

$$g = F(w) \quad (3-2)$$

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 de différence

fondamentale entre la réalité et cette hypothèse qui est nécessaire au traitement analytique du problème.

En dérivant les deux membres de la relation (3-2) par rapport au temps nous aurons:

$$\frac{dg}{dt} = F \cdot (w) \cdot \frac{dw}{dt} \quad (3-3)$$

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 , $(ri^2 - P)dt$ correspond à la variation d'énergie dw dans l'arc, d'où:

$$\frac{dw}{dt} = ri^2 - P \quad (3-4)$$

L'équation (3-3) devient:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{F(w)}{F(w)} (ri^2 - P) \quad (3-5)$$

➤ Deuxième hypothèse

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

$$F(w) = g = K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (3-6)$$

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 ($e=2,71828$).

A 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 :

$$F(w)' = \frac{1}{w_0} K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (3-7)$$

D'où

$$\frac{F'(w)}{F(w)} = \frac{1}{w_0} \quad (3-8)$$

➤ 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:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{w_0} \left(ri^2 - P_0 \right) = \frac{P_0}{w_0} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3-9)$$

Soit $\tau = \frac{w_0}{P_0}$, la constante de temps de désionisation, l'équation (3-9) sera:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-10)$$

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

D'après la relation (3-9), il devait exister une variation linéaire de $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} \right)$ en fonction de la puissance fournie à l'arc (ui) par effet de Joule puisque (τ et P_0) sont considérés comme des constantes, mais la réalité expérimentale est différente, car (τ et P_0) ne restent pas constantes durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc [18].

3.4.2. 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:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (3-11)$$

U_0 : la tension statique de l'arc, elle est indépendante de l'intensité du courant (Fig. 3.1)

La courbe $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt}\right)$ en fonction de (u^2) devrait être une droite (Tau, U_0)

constantes dont l'intersection avec les axes permettrait de déterminer (Tau et U_0).

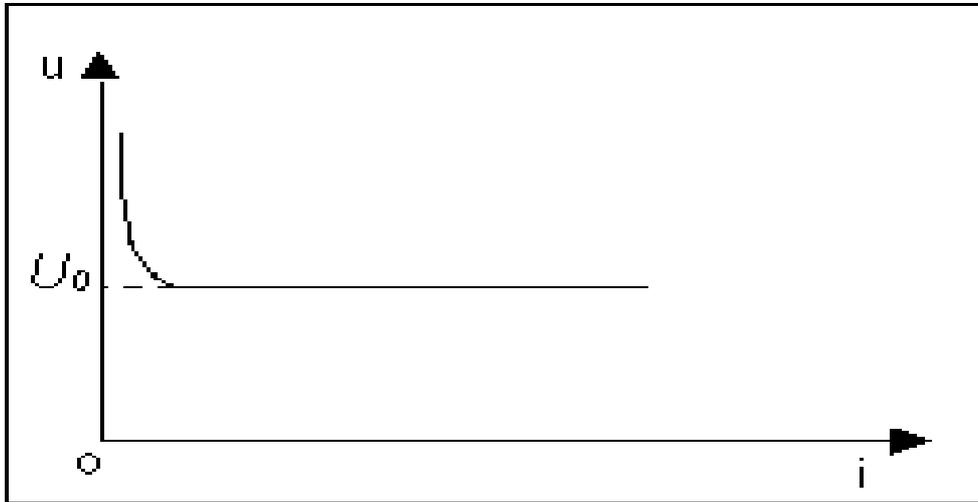


Fig. 3.1 : Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.

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 [18].

Pour des valeurs élevées du courant, la tension de l'arc reste sensiblement constante et égale à (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.

3.4.3. Comparaison des deux modèles

Les critères	Modèle de Mayr	Modèle de Cassie
Conductance de l'arc	Par variation du degré d'ionisation	Par variation du diamètre de l'arc
Pertes de chaleur	Par conduction thermique	Par convection thermique
Expression dynamique	$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau} \left(\frac{ui}{Po} - 1 \right)$	$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right)$
Adaptation	Régions des courants faibles	Régions des courants forts

Tableau 3.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie.

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 [19].

3.5. 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 [19]. Les modèles d'arc améliorés les plus utilisés sont les suivants :

3.5.1. Le modèle de Mayr modifié

C'est une version très répandue de l'équation de Mayr modifiée, la puissance de refroidissement est en fonction du courant de l'arc [19,20, 21, 22].

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0 + U_o |i|} - 1 \right) \quad (3-12)$$

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{p(P_0 + U_o |i|)} - 1 \right) \quad (2-13)$$

- g la conductance de l'arc.
 u la tension de l'arc.
 i le courant de l'arc.
 τ 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 (Figure 3.1).

Les paramètres indépendants de ce modèle sont (τ , P_0 et U_0).

3.5.2. 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. 3.2) [23, 24].

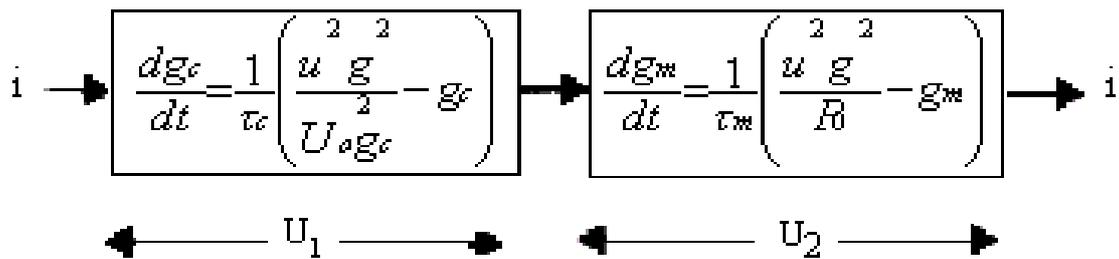


Fig. 3.2 : Le modèle de Habedank

Les équations du modèle sont :

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{g^2} - g_c \right) \quad (3-14)$$

Et

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2}{P_0} - g_m \right) \quad (3-15)$$

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
 U₀ le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique (Fig. 3.1).
 g_c la conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie.
 Tau_c la constante de temps de Cassie.
 P₀ 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, U₀, Tau_m et P₀).

3.5.3. Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique [25, 26, 27,28]. La constante de temps et la puissance de refroidissement dépendent de la conductance de l'arc:

$$Tau = Tau_0 \cdot g^\alpha$$

$$P = P_0 \cdot g^\beta$$

L'équation de ce modèle est :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{Tau_0 g^\alpha} \left(\frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (3-16)$$

- g la conductance de l'arc
 u la tension de l'arc
 i le courant de l'arc.
 Tau₀ la constante de temps de l'arc
 P la puissance de refroidissement
 α le paramètre qui influe sur τ en fonction de g
 β le paramètre qui influe sur P en fonction de g .

Avec (α et β) sont tous les deux, des paramètres expérimentaux constants.

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{ui}{P_0 \cdot g} - 1 \right) = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{u^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3-17)$$

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

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-18)$$

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

Les quatre paramètres indépendants de ce modèle sont (Tau_0 , α , P_0 et β), ils varient suivant le disjoncteur et les conditions du circuit.

3.5.4. 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. (Figure 3-3) [29, 30].

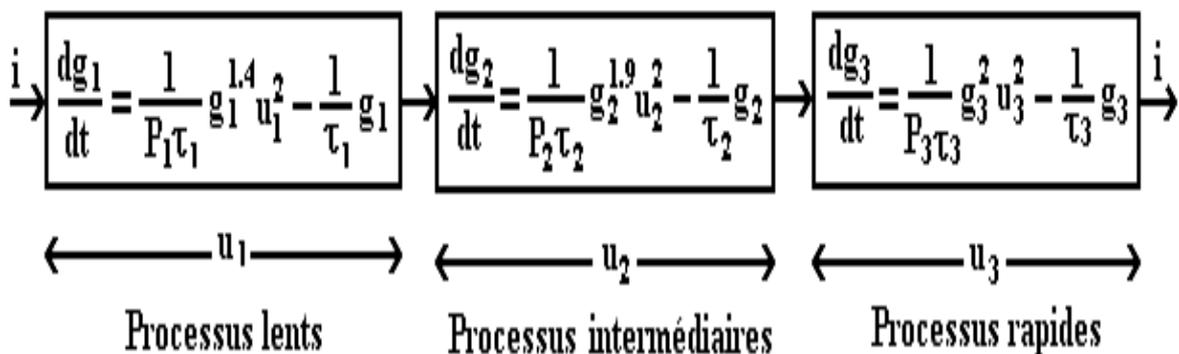


Fig. 3.3 : Le modèle de KEMA

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

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{P_j \text{Tau}_j} \cdot g_j^{\lambda_j} u_j^2 - \frac{1}{\text{Tau}_j} \cdot g_j \quad (3-19)$$

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

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 :

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

La tension u de l'arc est :

$$u = \sum_{j=1}^3 u_j = u_1 + u_2 + u_3 \quad (3-21)$$

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

$$i = gu = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_2 g_3 + g_1 g_3 + g_1 g_2} \cdot u \quad (3-22)$$

➤ Les paramètres du modèle

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

$$\text{Tau}_2 = \frac{\text{Tau}_1}{k_1} ; \quad \text{Tau}_3 = \frac{\text{Tau}_2}{k_2} ; \quad P_3 = \frac{P_2}{k_3}$$

(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 $(\text{Tau}_1, P_1 \text{ et } P_2)$.

3.5.5. 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 [27, 31, 32]:

$$P = P_0 + P_1 ui$$

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 du modèle est alors:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0 + P_1 ui} - 1 \right) \quad (3-23)$$

Les paramètres indépendants de ce modèle sont (Tau, P_0 et P_1).

❖ Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts

Après avoir déterminé les paramètres du modèle décrit par l'équation (3-23), les courants et les tensions sont calculés en utilisant l'équation (3-23), puis ils sont comparés avec les tensions et les courants mesurés (Fig. 3.4).

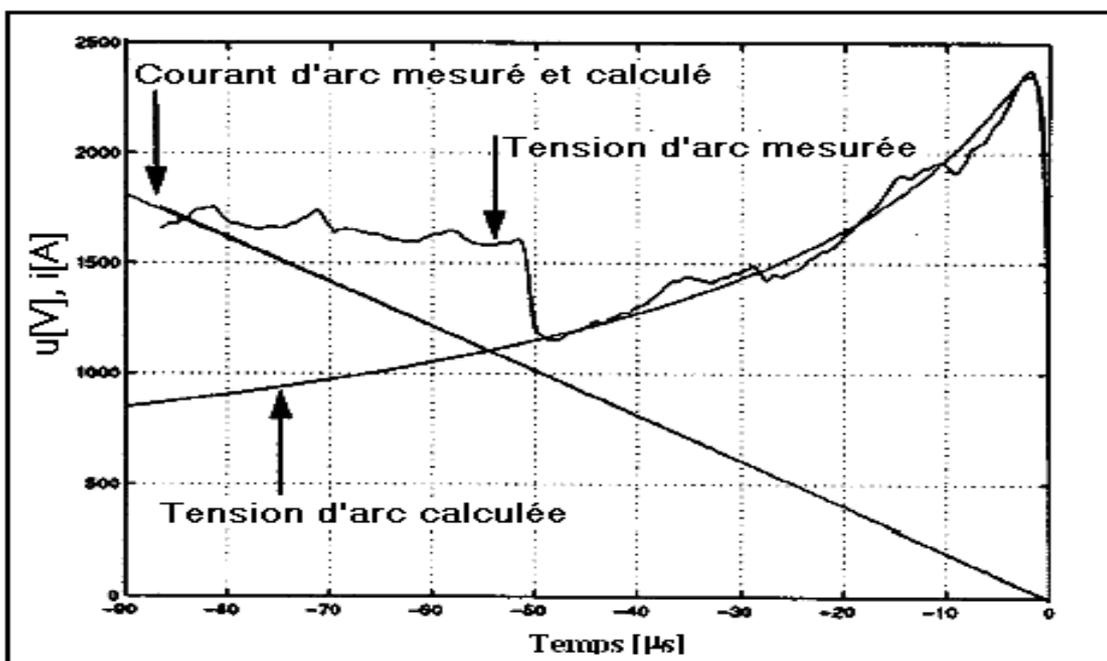


Fig. 3.4 : Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés [31].

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:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{\max(U_0 |i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (3-24)$$

U_0 la tension constante de l'arc dans le domaine des courants forts (Fig. 3-1).

➤ **Domaine des courants forts**

L'équation (3-21) sera réduite à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{u}{U_0} - 1 \right) \quad (3-25)$$

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

➤ **Domaine des courants faibles**

• **Avant le zéro du courant**

Les équations (3-22) et (3-23) seront réduites à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-26)$$

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

• **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.

3.6. Conclusion

Tous les modèles d'arc à boîte noire ont pour origine de deux modèles de base de Cassie et de 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 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 SF6 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 04

*Simulation numérique par le
modèle de Mayr modifié*

4.1. Introduction

Le disjoncteur joue un rôle important dans les réseaux HT. Pour améliorer sa conception et maîtriser les contraintes liées à la coupure, il faut passer par des essais, coûteux et qui prennent beaucoup de temps dans les laboratoires HP, de ce fait, on a intérêt d'utiliser des modèles qui traduisent par simulation le comportement de l'arc dans le disjoncteur de façon similaire à la réalité.

Dans ce contexte, dans ce présent chapitre, on va modéliser le comportement dynamique de l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT avec le modèle de Mayr modifié cité dans le chapitre précédent.

Ce travail est constitué de trois étapes :

La première étape est l'identification des paramètres du modèle qu'on a choisi, à partir des courbes de tension et de courant de l'arc mesurés dans un laboratoire HP. Dans ce but, on a écrit un programme dans MATLAB, en utilisant la méthode des moindres carrés non linéaire et la fonction d'optimisation `fminsearch` de Matlab.

La deuxième étape est la simulation du comportement dynamique de l'arc dans le disjoncteur HT par le Simulink de MATLAB en introduisant les paramètres qu'on a identifiés.

La troisième étape est la comparaison des courbes de tension et de courant mesurées et simulées suivie d'une interprétation des résultats.

4.2. Méthode de calcul et programmation

4.2.1. 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 de courant et de la tension de l'arc:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{p(P_0 + U_0|i|)} - 1 \right) \quad (4-1)$$

Les paramètres indépendants du modèle sont : $(\tau, p_0 \text{ et } u_0)$.

Au domaine des courants forts $U_0|i| \gg P_0$

L'équation (4-1) devient :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{pU_0|i|} - 1 \right) \quad (4-2)$$

On remplace $i = ug$ dans l'équation (4-2) :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2 g}{p U_0 |u| |g|} - 1 \right) \quad (4-3)$$

$$g > 0 \text{ d'où } |g| = g$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{p U_0 |u|} - 1 \right) \quad (4-4)$$

Dans le domaine des courants forts, la tension est presque constante d'après l'hypothèse de Cassie, donc on peut écrire:

$$P|u| = U_0$$

L'équation (4-4) devient:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (4-5)$$

Cette équation correspond au modèle de Cassie, qui est adapté au domaine des courants forts (§3.4.3).

Au domaine des courants faibles $P_0 \gg U_0 |i|$

L'équation (4-1) devient :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (4-6)$$

Cette équation correspond au modèle de Mayr, qui est adapté au domaine des courants faibles (§3.4.3).

4.2.2. Les paramètres indépendants du modèle de Mayr modifié

a. la constante de la puissance de refroidissement (P_0)

La puissance de refroidissement de l'appareil dépend directement de la valeur du courant de court-circuit, Elle est liée au type du milieu de coupure, à la conception et à la classe du disjoncteur, elle est exprimée en Watt [33].

b. Le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique (u_0).

Est appelé aussi la caractéristique statique de l'arc elle exprime la tension de l'arc à l'état statique en (volts)

c. La constante de temps de désionisation (τ)

Elle correspond à une constante de temps liée au du milieu de coupure de disjoncteur et exprimée en microseconde (μs).

d. La pression de remplissage du disjoncteur (p)

Pression de remplissage assigné en SF6 à 20 degrés Celsius elle est exprimée en (bars) [12].

4.2.3. L'organigramme de programmation

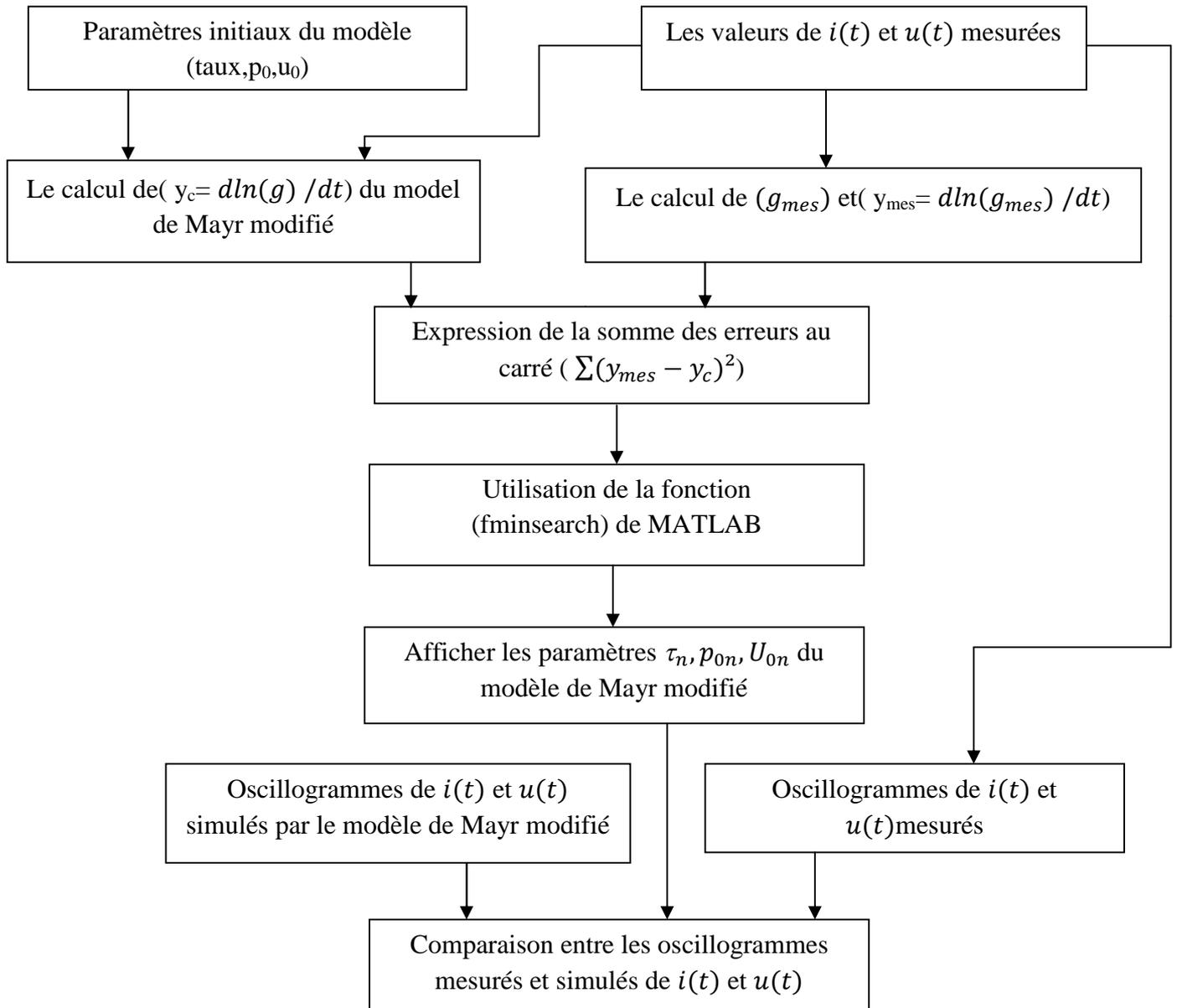


Figure.4.1 : l'organigramme du programme.

4.2.4. Explication de la procédure d'identification des paramètres du modèle

1/ Introduction des données mesurées de courant et de tension de l'arc en fonction du temps.

2/ Calcul de la conductance « g » mesurée puis de la différentielle du logarithme népérien de la conductance mesurée par rapport au temps.

3/ Calcul de la différentielle du logarithme népérien de la conductance en utilisant l'équation de modèle d'arc de Mayr modifié (y_c) :

$$y_c = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_{\text{mes}}}{p(p_0 + u_0 |i|)} - 1 \right) \quad (4-9)$$

Avec

$u_{\text{mes}}[\text{W}]$: la puissance mesurée de l'arc

4/ Application de la méthode des moindres carrés non linéaire pour donner l'expression de la somme des erreurs au carré.

5/ On donne une estimation initiale des paramètres (τ , P_0 et U_0)

6/ Utilisation de la fonction d'optimisation `fminsearch` de MATLAB qui identifie, en commençant par l'estimation initiale des paramètres.

7/ Introduction des paramètres obtenus dans le modèle de Mayr modifié implanté dans le Simulink de MATLAB pour obtenir les courbes de tension et de courant simulées.

8/ Comparaison des courbes de tension et de courant de l'arc, mesurées et simulées.

4.2.5. Résultats obtenus à travers le programme

La coupure du courant se fait au voisinage du zéro du courant, c'est pourquoi on va s'intéresser à l'intervalle de temps au voisinage du zéro du courant.

➤ **Le programme donne les courbes mesurées suivantes :**

- le courant mesuré de l'arc (Fig. 4.2).
- la tension mesurée de l'arc (Fig. 4.3).
- $\frac{d \ln g}{dt}$ mesurée (Fig. 4.4).

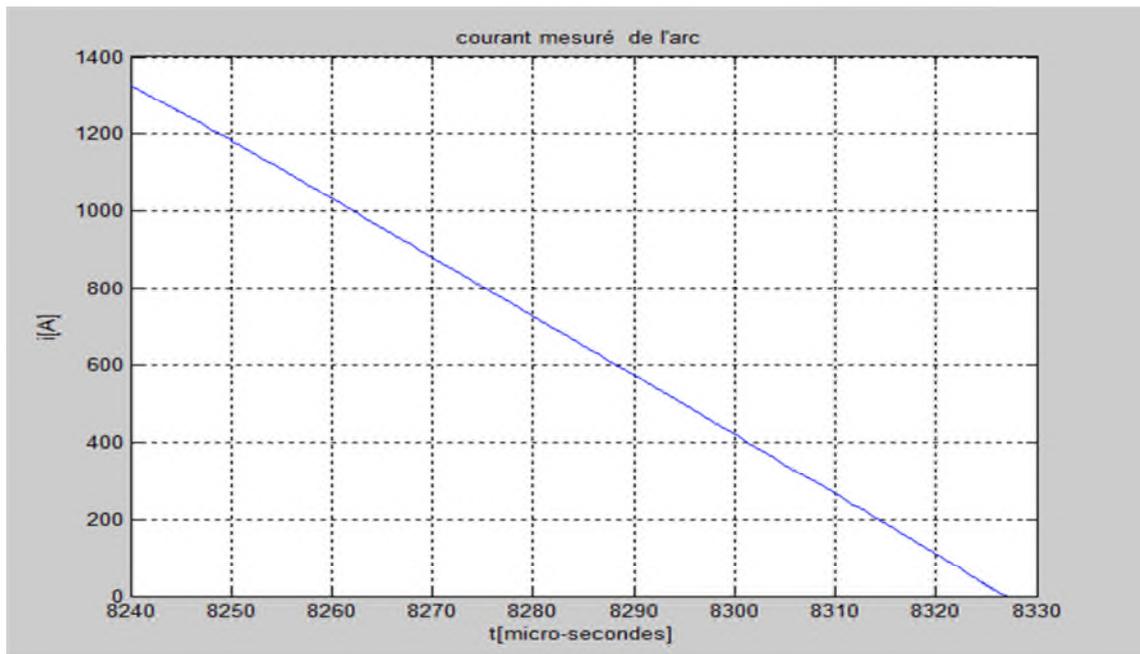


Figure. 4.2 : courbe du courant mesuré de l'arc.

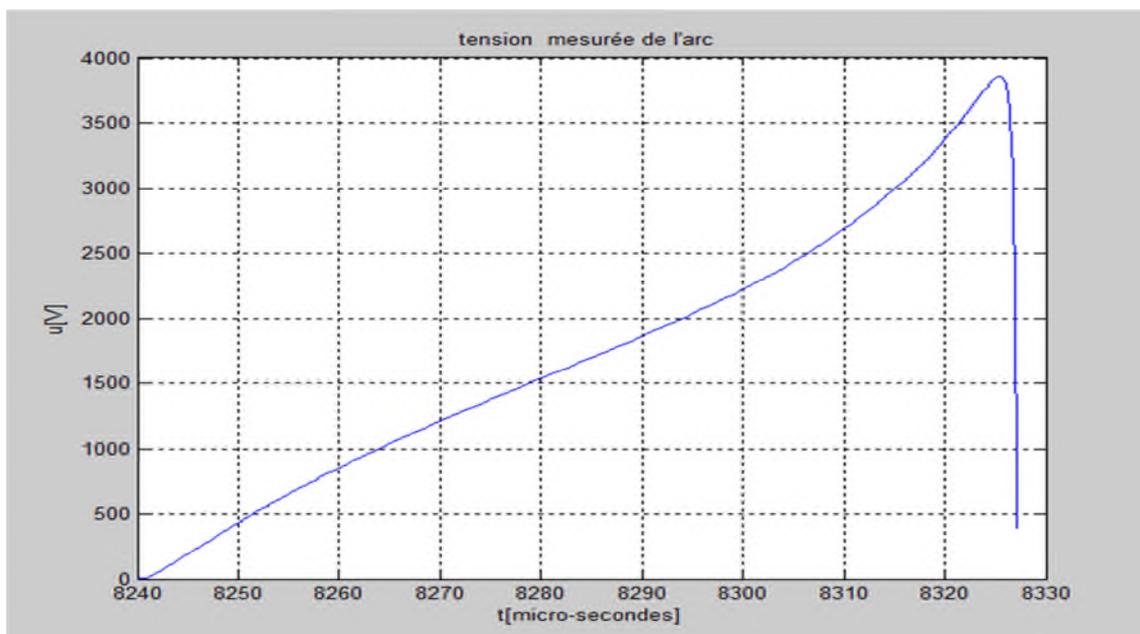


Figure. 4.3 : courbe de la tension mesurée de l'arc.

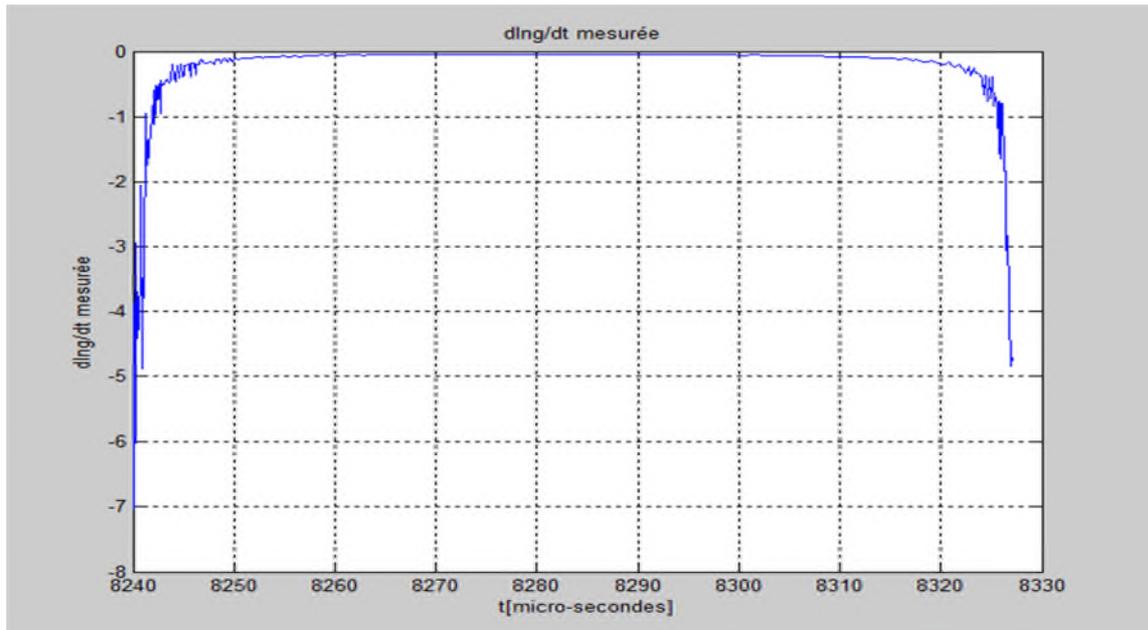


Figure. 4.4 : conductance mesurée ($\frac{d \ln g}{dt}$ mesurée) de l'arc.

4.2.6. Identification des paramètres

Afin d'identifier les paramètres relatifs à ce modèle, on fait varier les paramètres initiaux pour minimiser le plus possible l'écart entre $(d \ln(g))/dt$ mesurée et $(d \ln(g))/dt$ calculée.

➤ Les paramètres obtenus sont les suivants :

$$\text{Tau} = 0.6677 \mu\text{s}$$

$$P_0 = 209060 \text{ W}$$

$$U_0 = -82.5660 \text{ V}$$

La figure (Fig. 4.5) représente la conductance non linéaire calculée par le modèle de Mayr modifié.

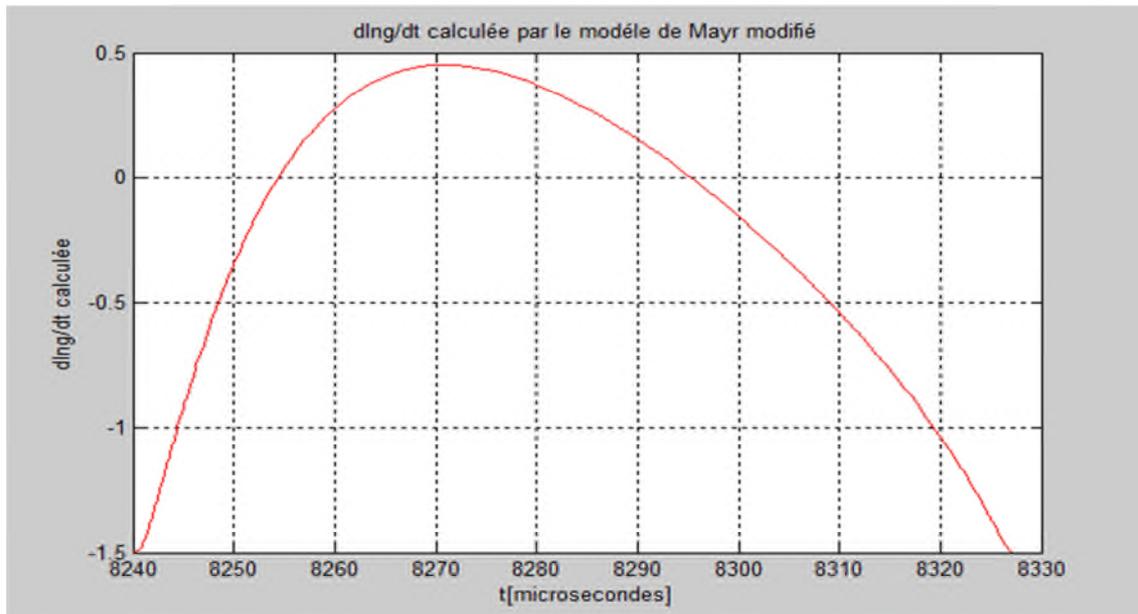


Figure. 4.5 : conductance calculée ($\frac{d \ln g}{dt}$) du modèle

La Figure (Fig. 4.6) représente la Comparaison des courbes calculée et mesurée de $\frac{d \ln g}{dt}$

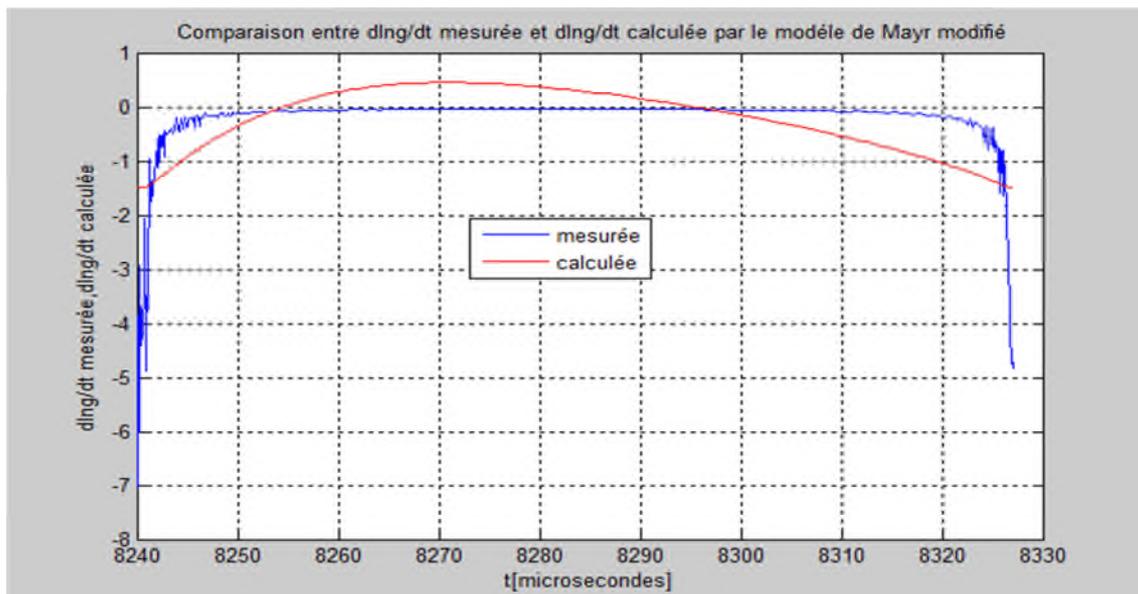


Figure. 4.6 : Comparaison des courbes calculée et mesurée de $\frac{d \ln g}{dt}$.

4.3. Simulation numérique avec le logiciel MATLAB

4.3.1. Implémentation du modèle d'arc de Mayr modifié dans le Simulink de MATLAB

Le modèle de Mayr modifié est construit par des différents éléments de la bibliothèque Simulink de MATLAB, comme il est montré dans la figure 4.7.

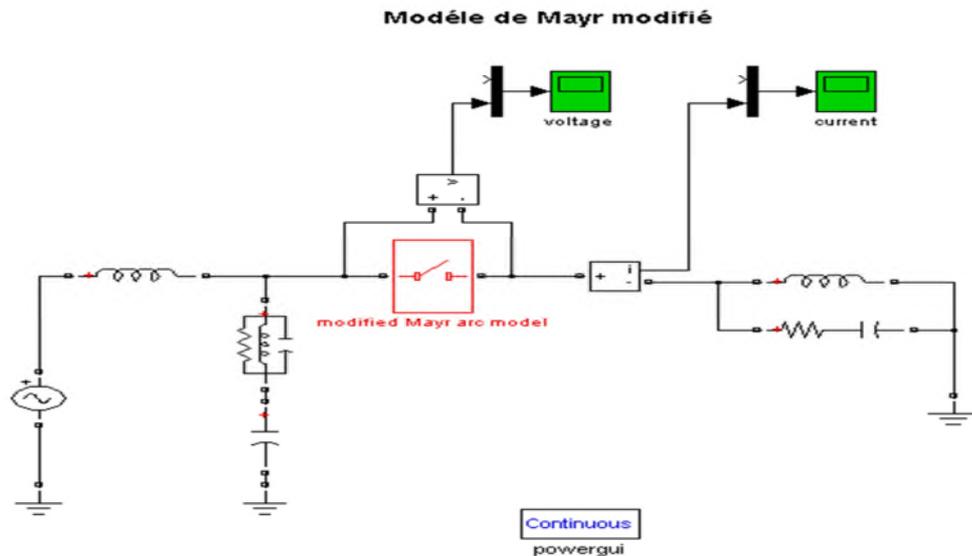


Figure .4.7 : le bloc du modèle de Mayr modifié

4.3.2. Simulations numériques

On ouvre la boîte de dialogue du bloc (fig.4.8) et on introduit les paramètres du modèle de Mayr modifié déterminés dans la première partie $\tau = 0.6677$ [us], $P_0 = 209060$ [W], $U_0 = -82.5660$ [V], ainsi que l'instant de séparation de contact qu'on a choisi égale à une demi période avant zéro du courant (puisque'on a choisi une fréquence du réseau de 60 Hz, la période est 16.66 ms, donc la durée d'arc est 8.33 ms).

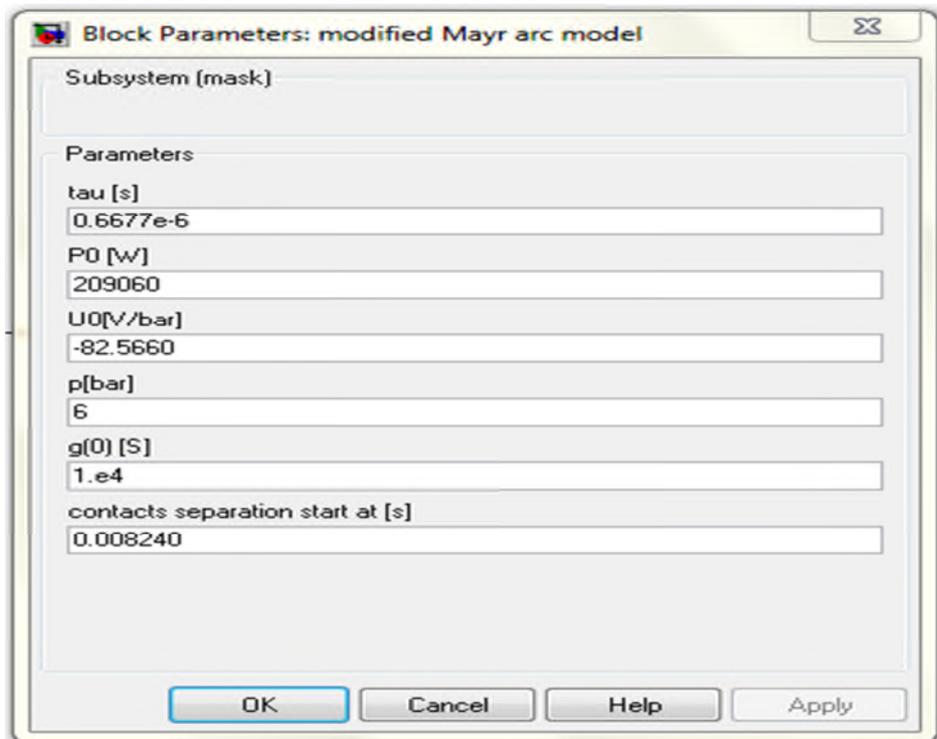


Figure.4.8 : Boîte de dialogue du modèle Mayr modifié.

➤ On lance la simulation et on interprète les résultats.

4.3.3. Les résultats de la simulation

Les figures (Fig. 4.9) et (Fig. 4.10) représentent respectivement le courant et la tension simulés par le modèle de Mayr modifié. On observe une interruption réussie car le courant s'annule après le passage par zéro et la TTR (tension transitoire de rétablissement) s'amortie.

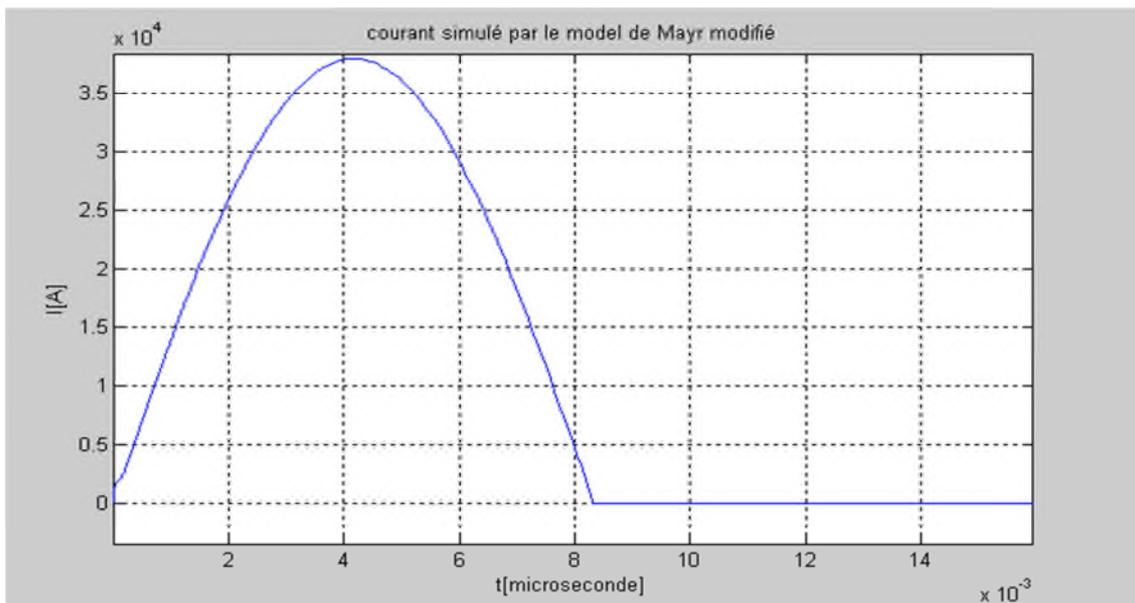


Figure.4.9 : courant simulé de l'arc par le modèle de Mayr modifié.

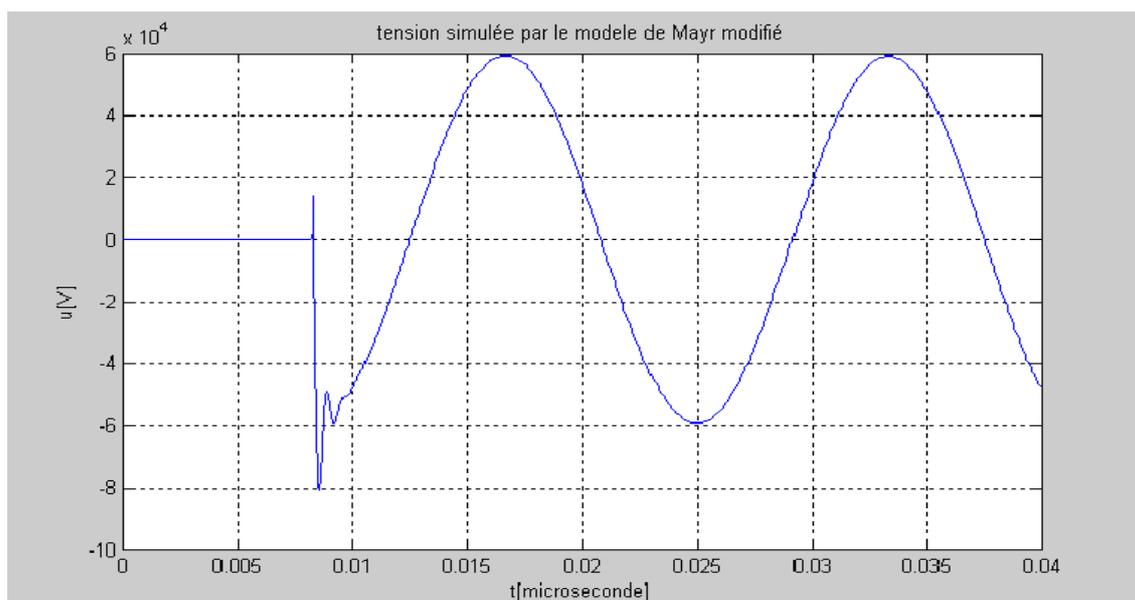


Figure.4.10 : tension simulée par le modèle de Mayr modifié.

4.3.3.1. Le voisinage du zéro du courant sous la loupe

En faisant un zoom au voisinage du zéro (Fig. 4.11 et Fig. 4.12), on remarquera :

- un faible courant post-arc de -0.2901A .
- une TTR maximale de $-80\,691\text{ V}$.
- un pic d'extinction de 13856 V .

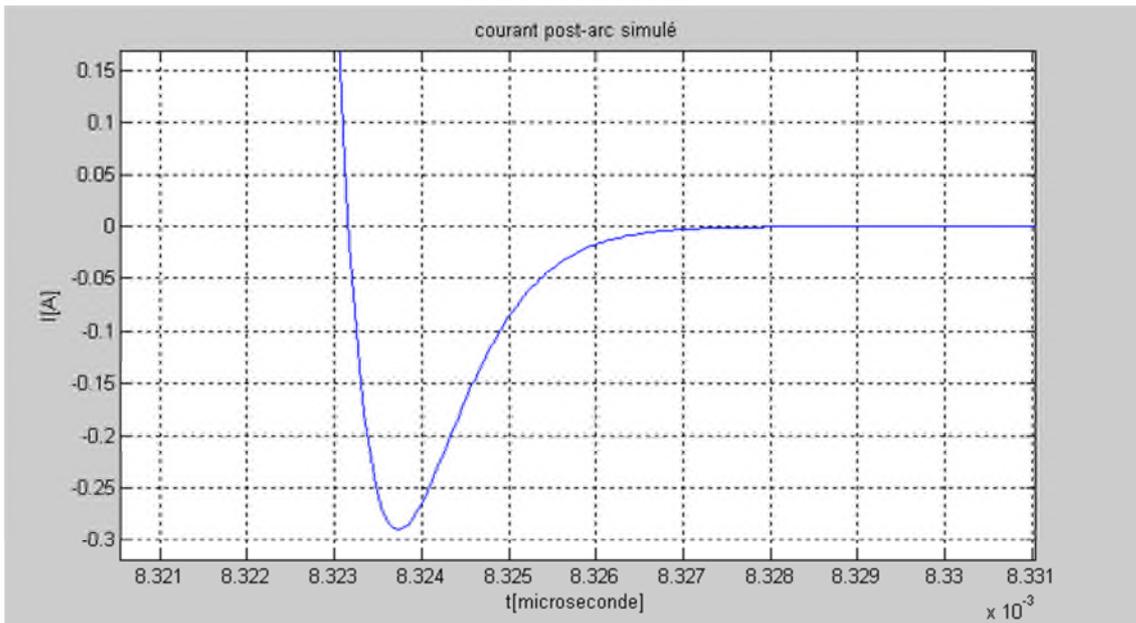


Figure. 4.11 : courant post-arc simulé

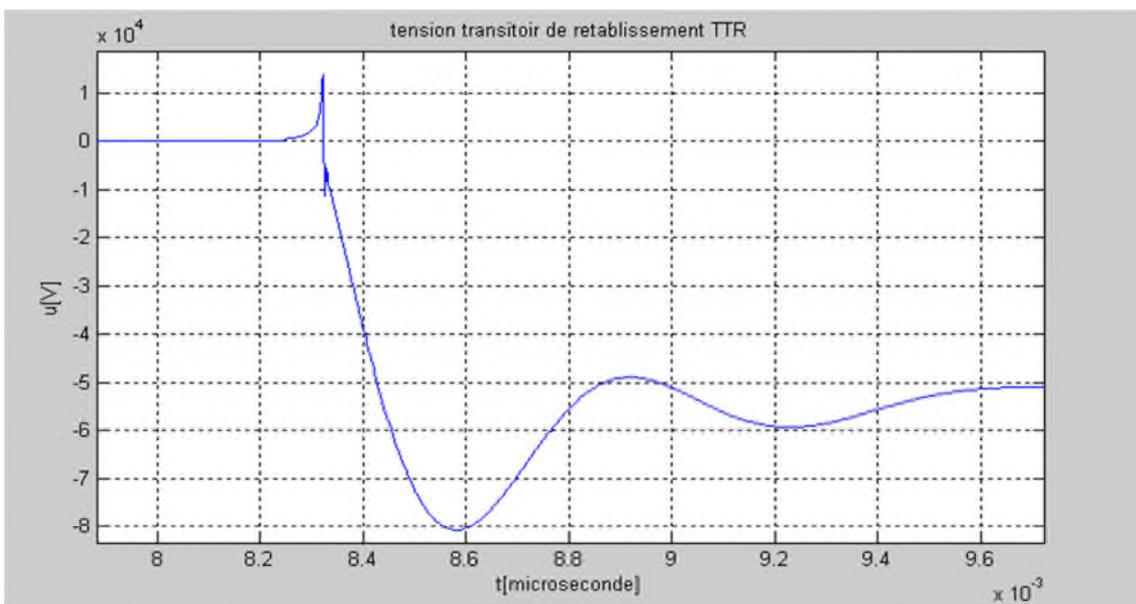


Figure. 4.12 : tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction.

4.3.3.2. Importation des données dans le programme et comparaison

On importe les données (résultats des simulations) de Simulink dans le programme à l'aide du bloc (Simout To WorkSpace), pour tracer les courbes de la tension et de courant simulés afin de faire une comparaison entre les courbes mesurées et les courbes simulées de tension et de courant de l'arc.

Les figures (fig.4.13) et (fig.4.14) représentent les courbes de courant et de tension simulées au voisinage du zéro du courant.

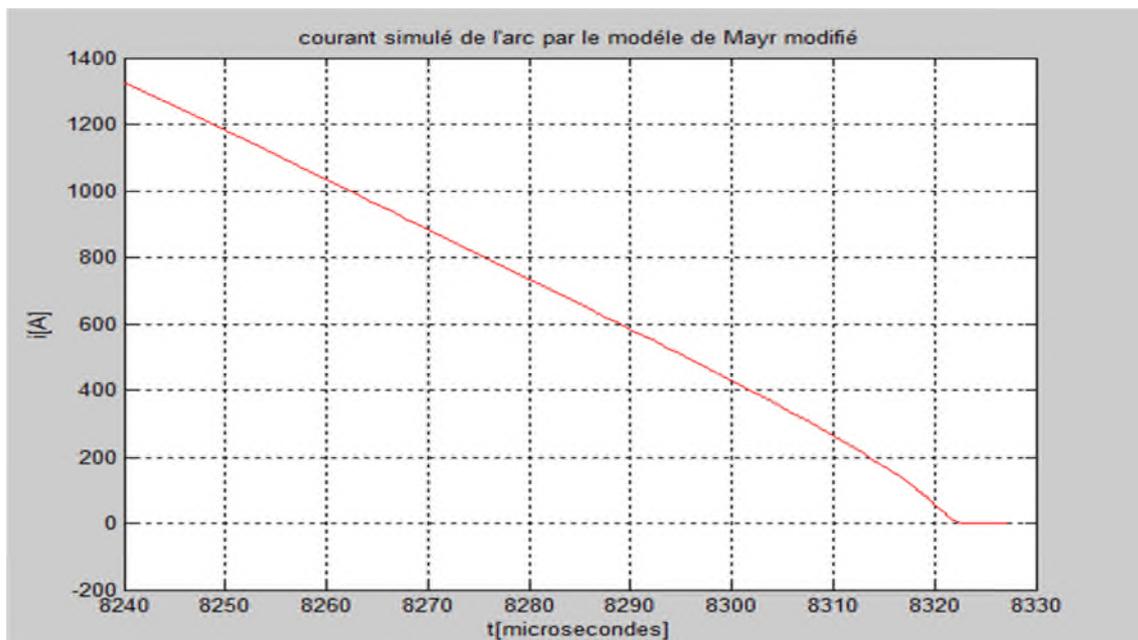


Figure.4.13 : courant simulé de l'arc par le modèle de Mayr modifié.

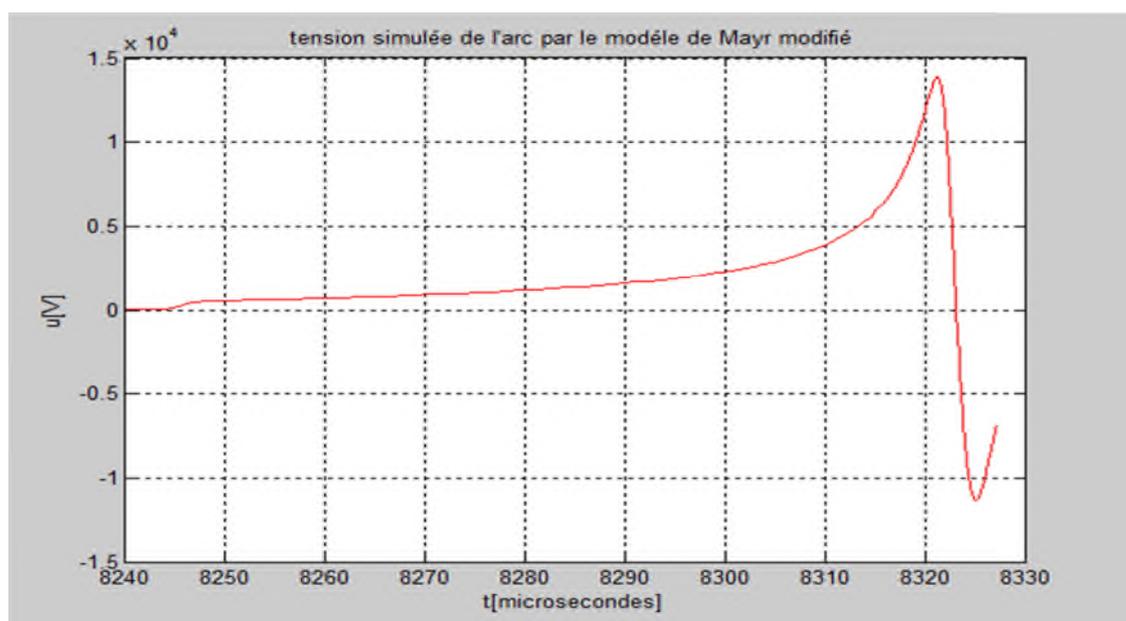


Figure.4.15 : tension simulée de l'arc par le modèle de Mayr modifié.

4.4. Comparaison entre les oscillogrammes simulés et mesurés

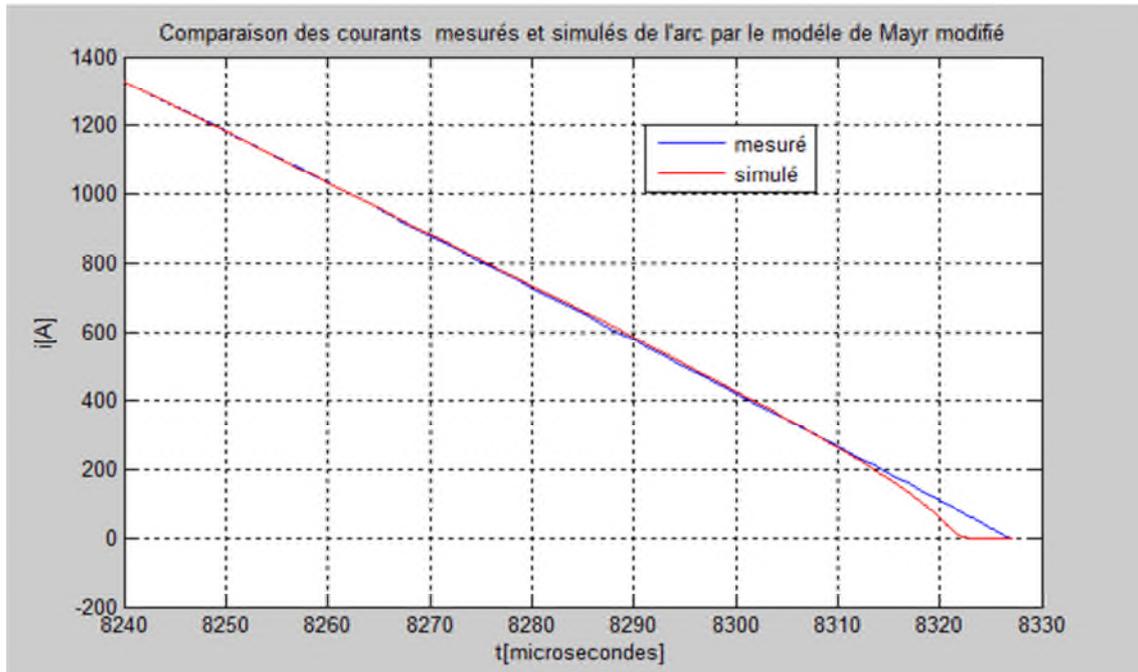


Figure. 4.16 : comparaison des courbes des courants simulés et mesurés.

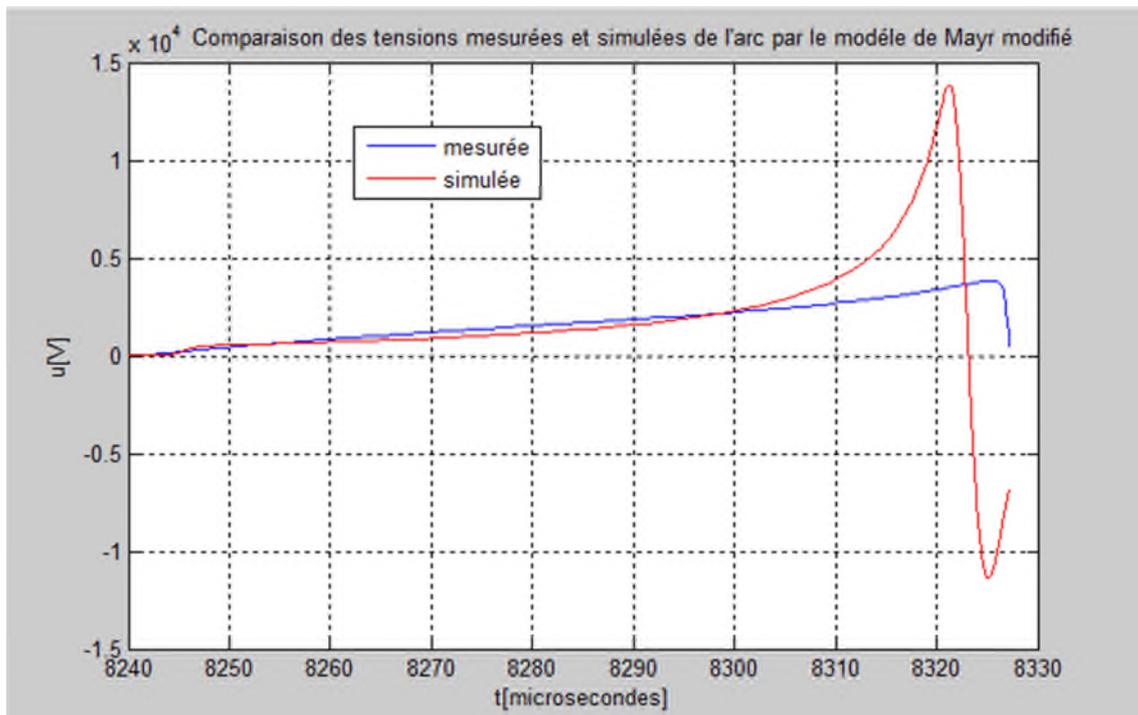


Figure. 4.17 : comparaison des courbes des tensions simulées et mesurées.

En faisant la comparaison entre les courbes mesurées et simulées de tension et du courant de l'arc, on constate que le modèle de Mayr modifié a bien reproduit les courbes de courants et de tension mesurées sauf au voisinage du zéro du courant car il a effectué une coupure précoce, ce qui fait diminuer la durée de l'arc.

4.5. Conclusion

À travers ce chapitre on peut conclure que, l'arc électrique est un phénomène important pour la coupure des courants alternatifs dans les disjoncteurs HT. L'utilisation du modèle de Mayr modifié traduit le comportement dynamique de l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT comme ça été le cas en pratique, mais il effectue une coupure précoce, ce qui fait diminuer la durée de l'arc. Des modèles plus récents sont plus performants tel que le modèle de Schavemaker.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de ce travail est la modélisation de l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT en utilisant le modèle de Mayr modifié.

D'abord on a donné une idée générale sur les disjoncteurs HT et plus particulièrement le disjoncteur SF6 HT, puis on a traité la coupure d'un courant alternatif dans un réseau HT et les phénomènes liés à cette coupure.

Dans le troisième chapitre on a présenté les modèles d'arc à boîte noire les plus utilisés tels que le modèle de Cassie, Mayr, Habedank, Schwarz, Kema, Mayr modifié, Schavemaker et nous avons choisi le modèle de Mayr modifié pour effectuer notre travail.

D'abord on a identifié les paramètres du modèle à travers un programme qu'on a écrit dans MATLAB puis on a fait des simulations numériques en utilisant ce modèle implanté dans le simulink de MATLAB.

On constate que ce modèle traduit bien le comportement dynamique de l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT sauf au voisinage du zéro du courant car il effectue une coupure précoce, ce qui fait diminuer la durée de l'arc. Des modèles plus récents sont plus performants tel que le modèle de Schavemaker.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T & D « **Les architectures de réseaux** », Guide de conception des réseaux électriques industriels Schneider Electric 6 883 427/A.
- [2] Denis Dufournet « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 1)** », Dossier techniques de l'ingénieur d4690 document délivré le 09/05/2012.
- [3] Serge Theoleyre « **Les techniques de coupure en MT** », Cahier technique n° 193 édition septembre 1998.
- [4] J. Pasteau « **Introduction à l'appareillage très haute tension** », Cahier technique n° 127 édition juin 1984 Schneider Electric.
- [5] Yves Pelenc « **Appareillage électrique d'interruption à haute tension** », Dossier techniques de l'ingénieur d4700.
- [6] zensol@zensol.com Disjoncteurs Haute tension.htm.
- [7] Schneider Electric « **Protection des réseaux électriques** », Guide de la protection.
- [8] Serge Theoleyre « **techniques de coupure en MT** », Dossier techniques de l'ingénieur d4705 document délivré le 09/05/2012.
- [9] J.C.Henry, G.Perrissin, C.Rollier « **Les disjoncteurs a autosoufflage de SF6 sous contraintes severes** », Cahier technique n° 101 édition octobre 1978.
- [10] Denis Dufournet « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 2)** », Dossier techniques de l'ingénieur d4692 document délivré le 09/05/2012.
- [11] D. Koch. « **Propriétés et utilisations du SF6 dans les appareils MT et HT** », Cahier technique n° 188, édition février 2003.
- [12] Siemens AG2003 instruction de service pour SONELGAZ « **Disjoncteur 3AP1 FI tension nominale 90kV N°35078731...734** ».
- [13] Denis Dufournet « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 3)** », Dossier techniques de l'ingénieur d4694 document délivré le 09/05/2012.
- [14] Yves Pelenc « **Interruption des circuits alimentés en courant continu** », Dossier techniques de l'ingénieur d4700 document délivré le 09/05/2012.
- [15] Benoît Calmet « **Protection des réseaux de transport et de répartition** », Dossier techniques de l'ingénieur d4800 document délivré le 08/05/2012.
- [16] Mr Zellagui Mohamed « **Etude des protections des réseaux électrique MT(10 et 30 KV)** ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister (2010).

- [17] Benoit de Metz-Noblat « **Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques**». Cahier technique n° 18, édition décembre 2002.
- [18] S. Vaquié, “**L’arc électrique**“, CNRS Éditions, Paris, 2000, pp : 188-189.
- [19] J.A. Martinez-Velasco, “**Modeling of circuit breakers using the type-94 component**“, EEUG News February 1997, pp 55-66.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] J.A. Martinez-Velasco, “**Circuit Breaker Representation for TRV Calculations**“, EEUG News Aug-Nov 1998, pp 77-87.
- [23] H. Knobloch, U. Habedank, A.G Siemens, “**Arc resistance at current zero: a tool to describe the breaking capacity of SF6 circuit breakers at short-line faults**“, High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication N° 467 ,IEE 1999, pp 205-208.
- [24] U. Habedank and A.G Siemens, “**Application of a New Arc Model for the Evaluation Short-circuit breaking Tests**“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, N° 4, October 1993, pp: 1921-1925.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.

- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] P.H. Schavemaker, “**Arc Model Blockset for use with MATLAB Simulink and Power System Blockset**” User’s Guide, Version 2, 2001, Delft University of Technology.