

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de Technologie

Département de génie électrique



Mémoire de fin d'études

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

Option : Réseaux électriques

Thème

**Interruption d'un courant
alternatif par disjoncteur SF6 HT
en utilisant le modèle de Mayr**

Réalisé par :

M^{elle} : BOKAMOUME Dyhia

M^r : KENOUCHE Amir

Encadré par :

M^{me} : ZIDANE .F

Promotion 2014 / 2015

Remerciements

Voici enfin que ce travail arrive à terme. On tien à exprimé toute notre reconnaissance à ceux qui au long de ce mémoire nous ont apporté leurs soutien et leurs encouragement, on remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la force la santé et la patience pour mené ce travail à terme.

On tien à exprimé notre profonde gratitude et un grand respect a notre promotrice Madame " F. ZIDANE " Enseignante à l'université A/Rahmane MIRA de Bejaia

Pour la clarté de ses enseignements son soutien, indéfectible à sa patience à toute épreuve afin que ce travail soit mené à bien.

Nous adressons de vifs nous remercions très chaleureusement toutes les personnes aillons contribué de prêt ou de loin la réalisation de ce mémoire

remerciement aux membres de jury qui ont accepté de corrigé de commenté et d'évalué ce travail.

Nous remercions également tous les enseignants de département d'électrotechnique de l'université A/Rahmane MIRA de Bejaia qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.

Enfin, nous ne peux pas oublier de remercier nos amis.

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire fin d'études à :

A ma mère

Mon père

Mes frères

A Ma sœur

A leurs enfants : Amine & Haythème

À toutes mes familles : KENOUCHE & BOUKAMOUME

À tous mes amis : Mahdi, Youssef, piksou & Tarik

Sont oublié me très chers amis Nabil

Amir

Dédicaces

À mes très chers parents que j'aime tant. Je vous offre ce modeste travail pour vous montrer ma gratitude, et vous remercier pour les sacrifices que vous faites pour nous. Je ne peux que vous souhaité une heureuse et très longue vie avec nous, merci papa et maman pour tout, sans vous rien n'aurait été possible.

Spécial dédicace à mes grands-parents ;

À mes précieux frères Salah et Ahmed ;

À mon irremplaçable sœur Tinhinane ;

À ma très chère sœur Fadhma, son mari et sa princesse Hélène ;

À ma très chère tante (Malika) et sa famille ;

À tous mes oncles et tantes ;

Sans oublier ma meilleure amie Fatima et sa famille ;

À toute la famille Boukamoume ;

À Toutes mes chères Amies et copines de chambre ;

Sans oublier mon binôme et sa famille;

À toute la promotion électrotechnique 2015 ;

Je dédie ce travail.

Dyhia

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
------------------------------------	---

CHAPITRE 01: DISJONCTEUR SF6 HAUTE TENSION

Inerodction ..	2
1.1 Disjoncteurs HT	2
1.1.1 Définition d'un disjoncteur HT.....	2
1.1.2 Le rôle des disjoncteurs HT	2
1.1.3 Classification des disjoncteurs HT	3
1.1.3.1 Classification des disjoncteurs HT selon la technique de coupure	3
a. La coupure dans l'air comprimé.....	4
b. La coupure dans l'huile	5
c. La coupure dans SF6	5
1.1.3.2 Classification des disjoncteurs selon l'utilisation	5
1.1.3.3 Classification des disjoncteurs selon l'installation	6
a. Le disjoncteur ouvert.....	6
b. Le disjoncteur sous enveloppe métallique	6
c. Le disjoncteur hybride.....	6
1.1.4 Description générale d'un disjoncteur HT.....	7
a. Partie électrique active	7
b. Partie commande	7
c. Partie Contrôle.....	8
1.1.5 Les caractéristiques assignées d'un disjoncteur HT.....	8
1.2 Le disjoncteur SF6 HT	10
1.2.1 Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension.....	10
1.2.1.1 Les propriétés et les caractéristiques du gaz SF6.....	10
a. Propriétés chimiques	10
b. La propriété de conductivité thermique	10
c. Propriétés diélectriques	11
d. La propriété de conductivité électrique.....	11
e. Les propriétés biologiques.....	12
f. Les caractéristiques pressions-température.....	13
g. La caractéristique diélectrique-pression.....	14

Sommaire

h. La constante de temps de désionisation	15
1.2.1.2 Les raisons techniques.....	16
1.2.2 Les différents types de coupure dans SF6.....	16
a. Disjoncteur auto –pneumatique	16
b. Disjoncteur auto-soufflage	17
1.2.3 Conception	18
1.2.4 Description du disjoncteur SF6 à une chambre de coupure.....	19
1.2.4.1 La Colonnes polaires	20
1.2.4.2 Les câbles de liaison.....	20
1.2.4.3 Coffret d’organe de manœuvre	20
1.2.4.4 Coffret d’appareillage	20
1.2.4.5 La chambre coupure	20
1.2.4.6 L’organe de commande.....	21
1.2.5 Le fonctionnement du disjoncteur SF6 HT	22
1.3 Dimensionnement des disjoncteurs	23
1.3.1 Les critères de dimensionnement	24
Conclusion	24

CHAPITRE 02 : LES PHÉNOMÈNES DE COUPURE D’UN COURANT ALTERNATIF

Introduction.....	25
2.1 Interruption des courants	25
2.2 Interruption d’un courant continu	25
2.3 Interruption d’un courant alternatif.....	27
2.4 Les différents courants à interrompre dans un réseau HT	28
2.4.1 La surcharge	28
2.4.2 Le courant de court-circuit	28
2.4.3 Les contraintes qui suivent l’interruption	30
2.5 La théorie de l’arc électrique	30
2.5.1 Définition de l’arc	30
2.5.2 Naissance d’un arc électrique.....	31
a. Dans l’interruption d’un courant	31

Sommaire

b. L'amorçage volontaire d'arc	31
2.5.3 La théorie électrique de l'arc.....	31
2.5.4 Les caractères thermiques	32
2.5.5 Avantage.....	32
2.5.6 Comment éteindre cet arc.....	32
2.5.7 Inconvénients, dangers de l'arc électrique.....	32
2.6 Les caractéristiques principales d'un disjoncteur HT	32
2.6.1 Le pouvoir de coupure.....	32
2.6.2 Pouvoir de fermeture	33
2.6.3 La tension transitoire de rétablissement	34
2.7 Les conditions du milieu pour réussir la coupure	35
2.8 Processus de coupure avec l'arc électrique	35
2.9 Technique de coupure en HT	35
2.9.1 Coupure au passage du courant par zéro	37
2.9.2 Répartition de la coupure dans des chambres en séries	38
2.9.3 Shunter une impédance au contact d'arc.....	39
2.9.4 Le principe de coupure dans un disjoncteur SF6 HT	39
a. Position "fermé"	39
b. Ouverture	40
c. Soufflage.....	40
d. Position "ouvert"	40
2.10 La durée de coupure d'un courant alternatif	41
Conclusion	42

CHAPITRE 03 : LES MODÈLES D'ARC À BOITE NOIRE

Introduction.....	43
3.1 Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique.....	43
3.2 Représentation des modèles d'arc à boite noire.....	43
3.3 Les modèles de base.....	44
3.3.1 Le modèle de Mayr	44

Sommaire

3.3.2 Le modèle de Cassie.....	46
3.3.3 Comparaison des deux modèles	47
3.4 Les modèles d'arc améliorés	48
3.4.1 Le modèle de Mayr modifié	48
3.4.2 Le modèle de Habedank.....	49
3.4.3 Le modèle de Schwarz	50
3.4.4 Le modèle de KEMA	51
3.4.5 Le modèle de Schavemaker.....	53
Conclusion	55

CHAPITRE 04 : SIMULATION NUMÉRIQUE AVEC LE MODÈLE DE MAYR

Introduction.....	56
4.1 conception de modèle	56
4.1.1 Description du modèle de Mayr	56
4.1.2 Mise en équation du modèle dans le simulink	56
4.1.3 Insertion du modèle dans le circuit d'essai	58
4.2 Simulation avec le modèle de mayr	60
4.3 Les résultats de la simulation	61
Conclusion	63
Conclusion générale.....	69

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 : Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure.....	3
Fig.1.2 : Disjoncteur à air comprimé (36kV).....	4
Fig.1.3 : Disjoncteurs ouverts : 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz.....	6
Fig.1.4 : Parties principales d'un disjoncteur HT.....	7
Fig.1.5 : Courbe de conductivité thermique du SF6 en fonction de la température	11
Fig.1.6 : Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF6	12
Fig.1.7 : Courbes de pression de vapeur et lignes isodenses de gaz SF6.....	13
Fig.1.8 : Rigidity diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes.....	14
Fig.1.9 : Constantes de temps de dés ionisation en fonction de la pression pour différents gaz.....	15
Fig.1.10 : Disjoncteur auto pneumatique (110kV).....	17
Fig.1.11 : Disjoncteur auto-soufflage (800Kv).....	18
Fig.1.12 : Structure d'un disjoncteur SF6 HT 3AP1	19
Fig.1.13 : Chambre de coupure du disjoncteur SF6 HT 245 kV.....	21
Fig. 2.1 : Circuit R L en courant continu.....	25
Fig. 2.2 : Variation de la résistance en fonction du courant de coupure.....	26
Fig.2.3 : Circuit R L en courant alternatif.....	27
Fig.2.4 : Une coupure au passage par zéro.....	27
Fig.2.5 : Explication simplifiée relative à un fonctionnement sur court-circuit ($Z_c=0$)...	31
Fig.2.6 : Présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en point éloigné d'un alternateur	34
Fig.2.7 : Tension transitoire de rétablissement.....	35
Fig.2.8 : Evolution du courant et de la tension de l'arc électrique.....	36
Fig.2.9 : Evolution des paramètres de l'arc pendant la période Post-Arc.....	37

Liste des figures

Fig.2.10 : Capacités naturelles et additives répartissant la tension entre deux chambres en série.....	38
Fig.2.11 : Les phases du processus de coupure d'un courant alternatif dans disjoncteur SF6 HT.....	40
Fig.2.12 : Evolution des paramètres de l'arc pendant l'ouverture.....	41
Fig.2.13 : La durée d'interruption de courant par le disjoncteur.....	42
Fig. 3.1 : Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.....	47
Fig.3.2 : Le modèle de Habedank.....	49
Fig.3.3 : Le modèle de KEMA.....	51
Fig.3.4 : Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés.....	54
Fig.4.1 : Système d'équation de modelé Mayr.....	57
Fig.4.2 : Sous système d'équation de modelé Mayr.....	58
Fig.4.3 : Le bloc du modèle de Mayr.....	59
Fig.4.4 : Sous système du modèle de Mayr	59
Fig.4.5 : Le modèle de Mayr insère dans le circuit des essai.....	60
Fig.4.6 : La boîte de dialogue du modèle.....	61
Fig.4.7 : Courant simulée par le modèle Mayr.....	61
Fig.4.8 : Tension simulée par le modèle Mayr.....	62
Fig.4.9 : Tension transitoire de rétablissement (TTR) et pic d'extinction.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Courants de court-circuit selon CEI 60909.....	29
Tableau 1.3 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie.....	47

LISTE DES ABRÉVIATIONS

HT : Haute Tension.

CEI : Commission électrotechnique internationale.

SF6 : L'hexafluorure de soufre.

TTR : Tension Transitoire de Rétablissement.

HP : Haute Puissance.

O : une manœuvre d'ouverture.

CO : une manœuvre de fermeture suivie immédiatement d'une manœuvre d'ouverture.

C : une manœuvre de fermeture.

AMB : Arc Model Blockset.

Introduction général

Introduction

L'exploitation, la maintenance et la protection des réseaux électriques des installations de toute nature qui existent aujourd'hui, ont conduit les constructeurs à porter une attention toute particulière à la réalisation de matériels de coupure, qu'ils soient de haute ou basse tension. Le disjoncteur est donc devenu un appareil essentiel de contrôle et de sécurité en assurant l'interruption du courant en toutes circonstances de besoin ou d'anomalie.

Dans les réseaux à haute tension, la coupure du courant est assurée par le disjoncteur SF6, le mécanisme de coupure est fondé sur la séparation des contacts, qui entraîne l'apparition d'un arc électrique, dont l'amplitude peut atteindre plusieurs dizaines de kilo ampères dans des conditions de défaut de court circuit. Ce disjoncteur tente alors, de mettre au maximum à profit les propriétés remarquables de l'arc électrique, pour dissiper l'énergie électromagnétique. Il a connu un véritable essor depuis quelques années, surtout dans le domaine des forts courants. Les qualités particulières du SF6 lui ont valu le mérite d'être considéré comme « le gaz des appareilleurs ».

Dans ce contexte, notre travail consacré sur la thématique : « **la modélisation d'arc électrique dans disjoncteur SF6 HT** », est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré au disjoncteur SF6 haute tension, où 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 poursuivit par une idée précise sur la constitution, la description et le fonctionnement du disjoncteur SF6 haute tension.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un aperçu sur les phénomènes de coupure à courant alternatif à HT, ainsi nous étudions l'arc électrique et l'influence du courant d'arc et comment couper ce courant, avec une description précise dans le cas d'un disjoncteur SF6 haute tension.

Dans le troisième, on a décrit les différents modèles d'arc électrique à boîte noire adoptés pour exprimer le comportement dynamique de l'arc, avec une idée sur leurs hypothèses et leurs évolutions dans le temps.

En fin le dernier chapitre est consacré à la conception d'un interrupteur à base de modèle de mayr, à utiliser ce modèle dans les simulations et à interpréter les résultats obtenus.

Chapitre 01

Le disjoncteur SF6 haut tension

INTRODUCTION

Les disjoncteurs à haute tension sont des éléments clés du réseau électrique, leur rôle repose sur une approche de sécurité préventive. Ils consistent à interrompre le courant dans toutes les situations (normales ou anormales) et à protéger les personnes, le circuit, ainsi que tous les appareils connectés à celui-ci.

La présence du disjoncteur prend toute son importance: il permet de rapidement reconfigurer le réseau et minimise les dommages possibles.

Ce chapitre sera consacré aux disjoncteurs à haute tension d'une manière générale et aux disjoncteurs SF6 à haute tension, d'une manière particulière.

1.1 Les disjoncteurs hauts tenions

1.1.1 Définition d'un disjoncteur haute tension :

Comme tous les dispositifs électriques, le disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée (tension maximale du réseau), dans les conditions normales de service et dans les conditions anormales spécifiées (court-circuit, discordance de phases...)

1.1.2 Le rôle des disjoncteurs HT

Un disjoncteur est un organe électromécanique, de protection, dont la fonction est d'interrompre le courant électrique en cas d'incident sur un circuit électrique. Il est capable d'interrompre un courant de surcharge ou un courant de court-circuit dans une installation [1].

Alors on peut exprimer le rôle d'un disjoncteur haut tension dans les points suivants :

- Destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tentions assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) ;
- Connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique ;
- Éliminer un court-circuit (conditions anormales spécifiées, foudre...) [2].

1.1.3 Classification des disjoncteurs HT

On peut classer les disjoncteurs haute tension selon les trois critères suivants :

- ✓ Le milieu de coupure ;
- ✓ L'utilisation du disjoncteur dans le système électrique ;
- ✓ Le type de l'installation.

1.1.3.1 Classification des disjoncteurs HT selon la technique de coupure

Il existe différentes techniques de coupure dans un disjoncteur, dont voici quelques-unes présentant chacune ses avantages et inconvénients.

➤ Les différents milieux de coupure des disjoncteurs

Depuis des années, les constructeurs ont cherché, de développer, expérimenté et mettre en œuvre des appareils de coupure à base de milieux aussi variés que : l'air, l'huile, le SF6 et enfin le vide. Pour une coupure réussie, le milieu doit avoir les caractéristiques qui lui permettent d'éteindre l'arc [3].

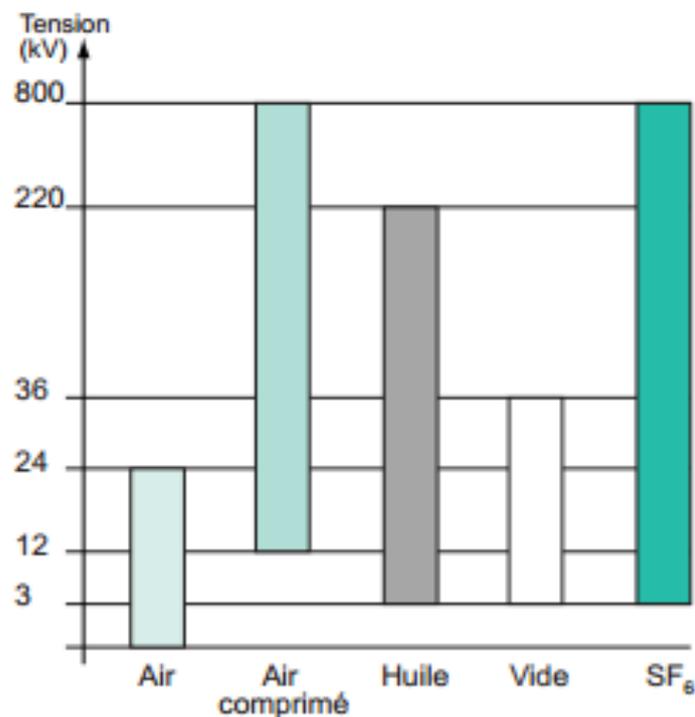


Fig.1.1 : Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure

a. La coupure dans l'air comprimé

L'air comprimé est utilisé pour assurer les fonctions suivantes [4]:

- Refroidissement et allongement de l'arc, entraînement des particules ionisées ;
- Après passage à zéro du courant, refroidissement de la colonne ionisée résiduelle et entraînement des particules ionisées restant dans l'espace entre contacts ;
- Après l'extinction de l'arc, apparition d'une rigidité diélectrique élevée, d'autant plus élevée que la pression d'air est importante.

Les inconvénients de ce type sont :

- Nécessité d'une station d'air comprimé ;
- Bruit violent ;
- Appareil plus cher.



Fig.1.2 : Disjoncteur à air comprimé (36kV)

b. La coupure dans l'huile

Cette technique de coupure consiste à immerger les contacts dans l'huile. Au moment de la coupure, l'huile se décompose et dégage de l'hydrogène et du méthane principalement. Ces gaz forment une bulle qui est soumise à une grande pression pendant la coupure. Au passage du courant par zéro, l'arc s'éteint du fait de la présence de l'hydrogène.

Les disjoncteurs à coupure dans l'huile ont les inconvénients suivants [4] :

- Niveau de sécurité et de maintenance élevé pour contrôler la dégradation des propriétés diélectriques.
- De l'huile et l'usure des contacts.
- La décomposition de l'huile à chaque coupure est un phénomène irréversible.
- Risque d'explosion et d'inflammation.

c. Coupeur dans SF6

Depuis plusieurs années, les constructeurs des disjoncteurs se sont orientés vers le SF6 (hexa fluoré de soufre) comme milieu de coupure, vu ses qualités chimiques et diélectriques. Sous l'effet de la température, la molécule SF6 se décompose, mais dès que le courant retrouve des valeurs faibles, la molécule se compose à nouveau [4].

Le SF6 présente une conductivité thermique équivalente à celle de l'air, une rigidité diélectrique élevée, et une constante de désionisation faible.

L'arc électrique est composé d'un plasma de SF6 dissocié, de forme cylindrique. Ce plasma comporte un noyau à température très élevée, entouré d'une gaine de gaz plus froid. La totalité du courant est transportée par le noyau. La gaine extérieure reste isolante.

1.1.3.2 Classification des disjoncteurs selon l'utilisation

- ✓ Disjoncteurs de lignes ;
- ✓ Disjoncteurs de générateurs ;
- ✓ Disjoncteurs de réactances ;
- ✓ Disjoncteurs de transformateur ;
- ✓ Disjoncteurs de couplage [5].

1.1.3.3 Classification des disjoncteurs selon l'installation.

Selon la possibilité d'installation, on distingue trois types de disjoncteurs HT

- a. **le disjoncteur ouvert**, dont l'isolation externe est faite dans l'air (fig.2.3), il doit être capable de fonctionner dans climatiques et atmosphériques contraignantes [5].

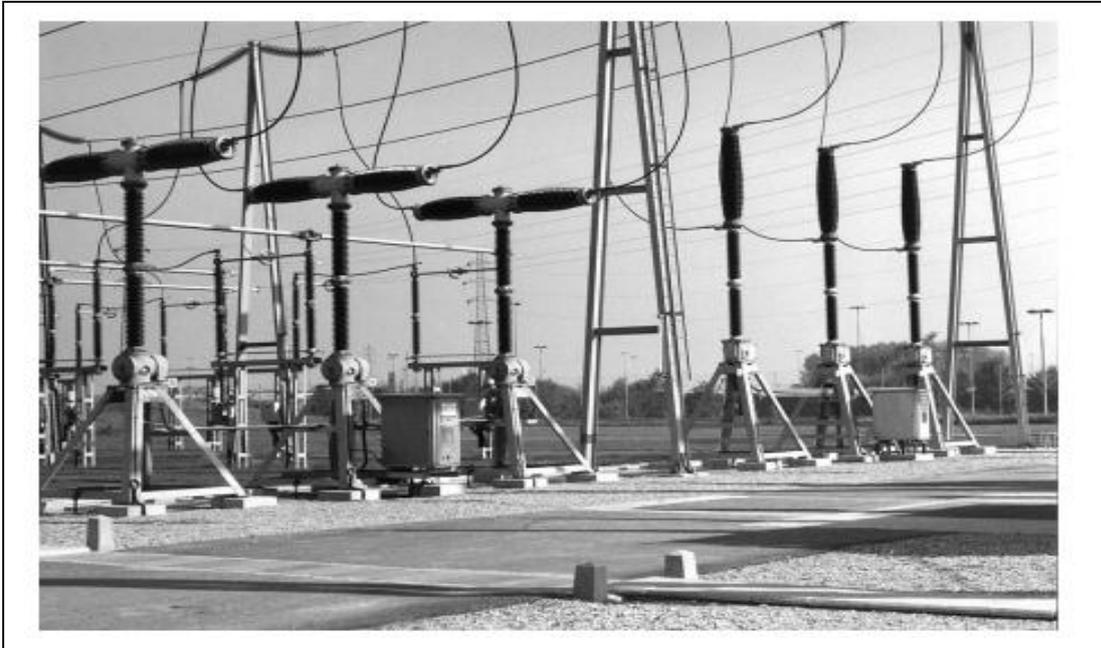


Fig. 1.3 : Disjoncteur ouverts: 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz.

- b. **Disjoncteur sous enveloppe métallique**, à l'abri des intempéries et de la pollution l'enveloppe métallique est reliée à la terre pour 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 et le transformateur de courant.
- c. **Le disjoncteur hybride**, dit « Dead Tank », 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 [5].

1.1.4 Description générale d'un disjoncteur HT

Un disjoncteur à haute tension est composé de trois parties principales (Fig2.6) [6] :

- a) Partie électrique active,
- b) Partie commande,
- c) Partie Contrôle.

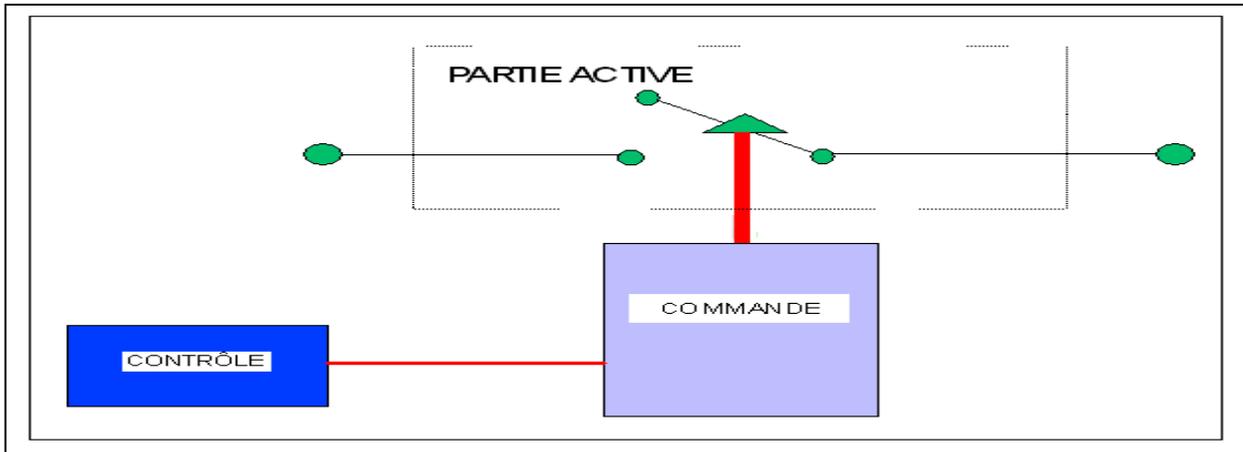


Fig. 1.4 : Parties principales d'un disjoncteur HT.

a. Partie électrique active

C'est la zone 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.

b. Partie commande

C'est la zone 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 demandé.

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

- Commande pneumatique,
- Commande hydraulique,
- Commande mécanique à ressort.

c. 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.

1.1.5 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 [5].

- **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 [7],
- **Niveaux d'isolement assignés** le niveau d'isolement fixe la tenue diélectrique des matériels de manœuvre et l'onde de choc de foudre. Il est caractérisé par deux valeurs [7] :
 - La tenue à l'onde de choc (1,2/50 μ s),
 - La tenue à la fréquence industrielle pendant une minute.
- **Fréquence assignée** : la fréquence assignée est la valeur nominale du réseau où le disjoncteur HT est destiné à fonctionner avec des fréquences nominales 50 et 60 Hz,

- **Courant assigné en service continu** : le courant assigné en service continu correspond au courant dans lequel le disjoncteur HT peut supporter indéfiniment et permanent pour 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 [7] :
 - 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 manœuvres est une succession de manœuvres spécifiées d'un disjoncteur à des intervalles de temps donnés[8].

Séquence de manœuvres assignées suivantes CEI, O - t - CO - t' - CO
(déclenchement –réenclenchement) montrer dans la figure.

O : représente une manœuvre d'ouverture.

CO : représente une manœuvre de fermeture suivie immédiatement d'une manœuvre d'ouverture.

C : représente une manœuvre de fermeture [7].

- **Température de service** : les disjoncteurs HT (comme tout l'appareillage HT) sont prévus pour fonctionner avec les températures normales des services suivantes [9] :
 - 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 tels 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.

1.2 Le disjoncteur SF6 HT

1.2.1 Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension

Les propriétés remarquables, extinctrices de l'arc, du gaz SF6 et les caractéristiques techniques de ce disjoncteur.

1.2.1.1 Les propriétés et les caractéristiques du gaz SF6

a. Propriétés chimiques

L'hexafluorure de soufre correspond à la valence maximale du soufre. Sa structure moléculaire est celle d'un octaèdre dont les six sommets sont occupés par des atomes de fluor.

La section efficace de collision de la molécule de SF6 est de 4,77 Å. Les six liaisons sont covalentes, ce qui explique la stabilité exceptionnelle de ce composé [10] :

- Le SF6 peut être chauffé sans décomposition jusqu'à 500 °C en l'absence de métaux catalytiques.
- Le SF6 est ininflammable,
- L'hydrogène, le chlore et l'oxygène n'ont aucune action sur lui.
- Le SF6 est insoluble dans l'eau.
- Il n'est pas attaqué par les acides

b. La propriété de conductivité thermique

La conductivité thermique du SF6 est inférieure 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 [10].

La protection thermique a pour principale fonction la protection des conducteurs contre les échauffements dus aux surcharges prolongées de l'installation.

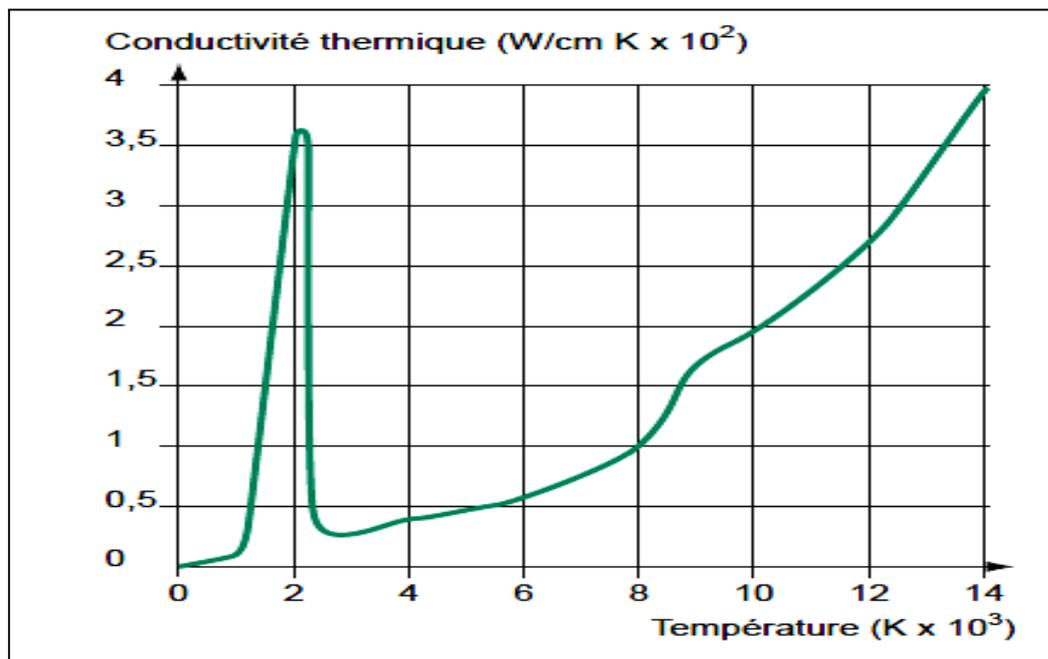


Fig.1.5 : Courbe de conductivité thermique du SF6 en fonction de la température.

c. Propriétés diélectriques

Les excellentes propriétés diélectriques du SF6 sont dues au caractère électronégatif de la molécule qui possède une tendance marquée à capturer les électrons libres pour former des ions lourds et peu mobiles, ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique [3].

La rigidité diélectrique du SF6 est 2,5 fois plus élevée que celle de l'air dans les mêmes conditions.

d. La propriété de 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 où le SF6 est dissocié, de forme cylindrique, le noyau du plasma présente un milieu de bonne conductivité électrique [3].

C'est à dire à très haute température le SF6 est conducteur électrique.

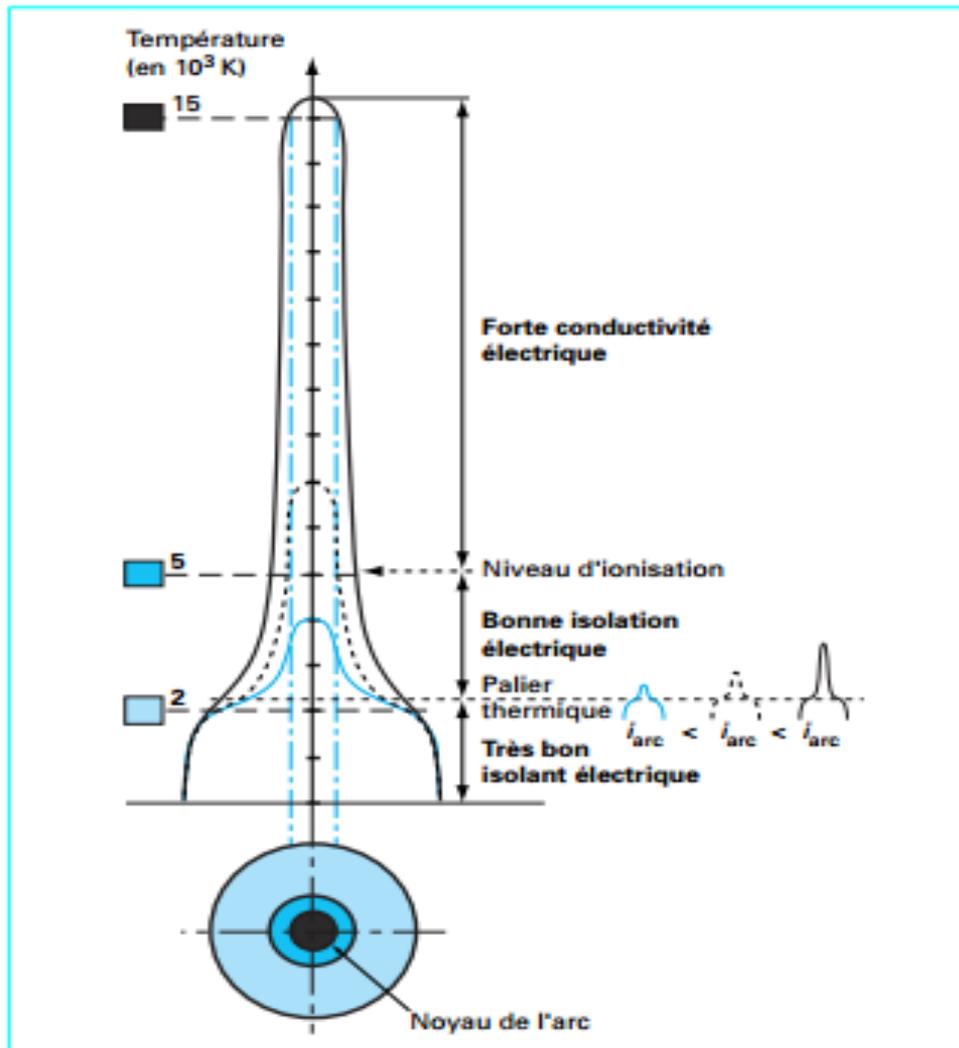


Fig.1.6 : Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF6

e. Les propriétés biologiques

L'absence de toxicité du SF6 à l'état pur est confirmée régulièrement par un test sur les livraisons de gaz neuf, dans lequel des souris sont placées pendant 24 heures dans une atmosphère contenant 80 % de SF6 et 20 % d'oxygène (test biologique recommandé par la norme CEI 60376) [10].

f. Les caractéristiques pression-température

- ✓ Le disjoncteur peut fonctionner dans une plage de température de -20°C à 55°C .
- ✓ La variation de la pression en fonction de la température est linéaire et relativement faible dans la gamme des températures de service (-25 à $+50^{\circ}\text{C}$), est représentée par la figure (fig.7.12) [10].

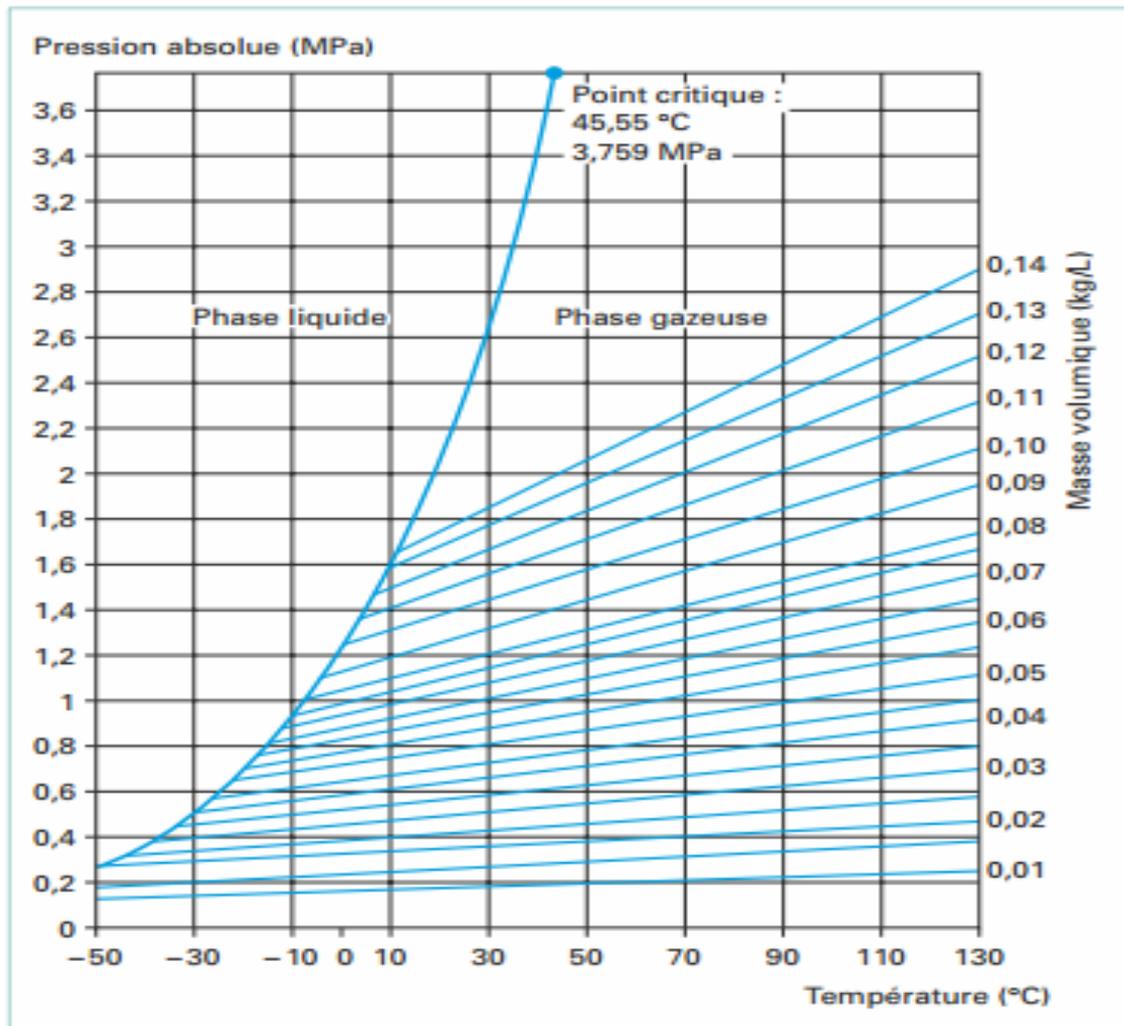


Fig.1.7 : Courbes de pression de vapeur et lignes isodenses de gaz SF6.

Pour des températures, élever 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.

g. La caractéristique diélectrique pression

La rigidité diélectrique du SF6 est 2 à 3 fois supérieures 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 subsistants 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 5 (bar) peut atteindre jusqu'à 240 (kV/cm) [11].

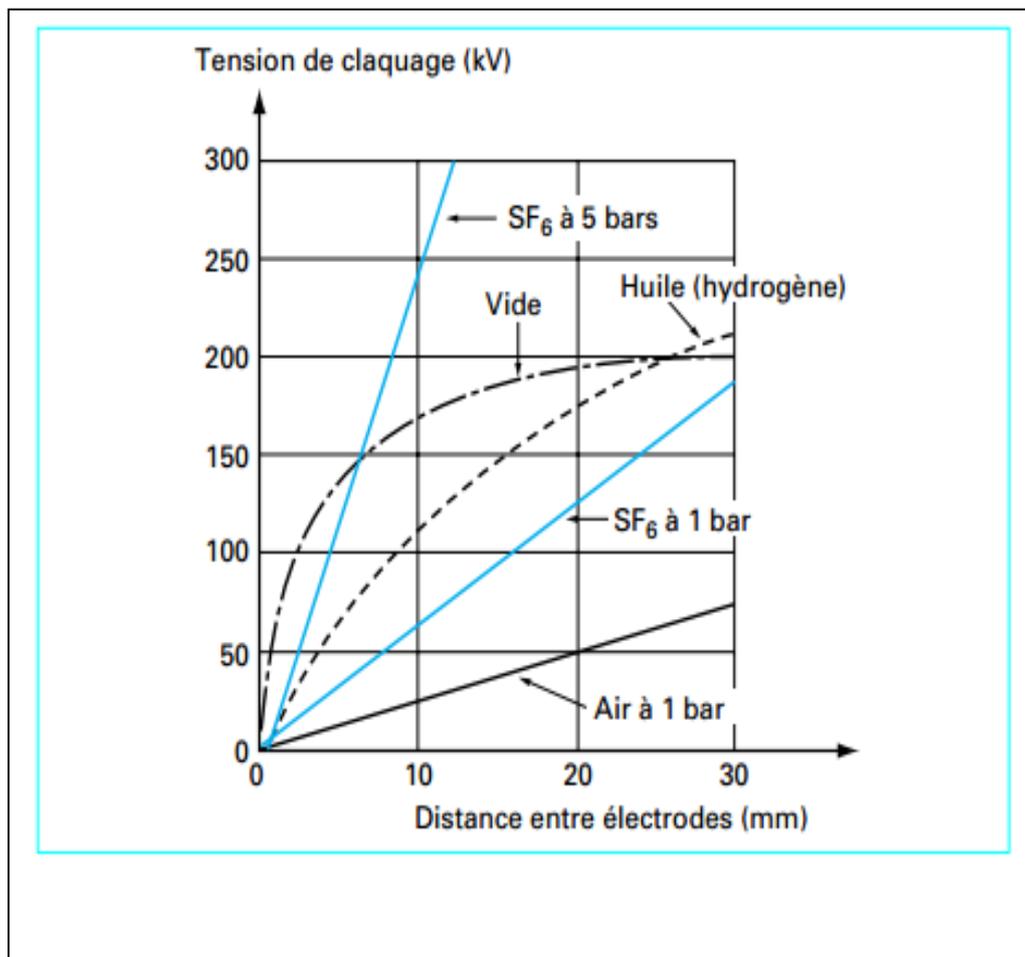


Fig. 1.8 : Rigidité diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes

h. La constante de temps de désionisation

La constante de temps de désionisation est le temps nécessaire à la résistance d'arc pour doubler de valeur en admettant que sa vitesse de variation reste constante, elle est exprimée en microsecondes (μs) [3].

Le SF6 confère à son milieu une constante de temps de désionisation extrêmement faible, de l'ordre de $0,25 \mu\text{s}$ (fig.1.9), et sa valeur est constante en fonction de la pression, mais pour les autres milieux τ varie proportionnellement par rapport à la pression.

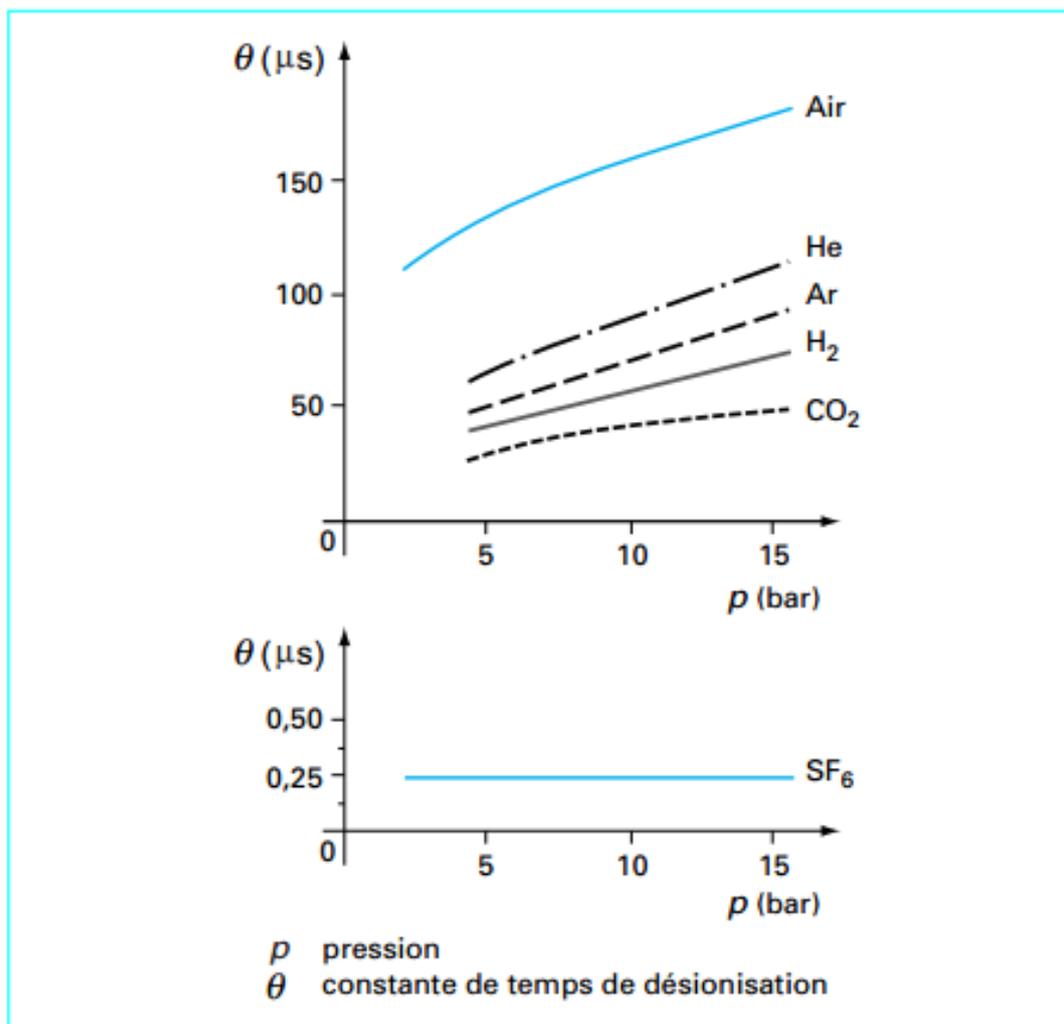


Fig.1.9 : Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz

1.2.1.2 Les raisons techniques

Sur le plan technique il y a plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF6 peuvent expliquer leur succès [3] :

- La simplicité de la chambre de coupure qui ne nécessite pas de chambre auxiliaire pour la coupure,
- L'autonomie des appareils apportée par la technique auto-pneumatique (sans compresseur de gaz),
- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63 kA,
- Le nombre de chambres de coupure est réduit (01 chambre en 245 kV, 02 chambres en 420 kV, 03 chambres pour la ligne de 550 kV et 04 en 800 kV),
- Une durée d'élimination de court-circuit court, de 2 à 2,5 cycles en réseau THT,
- La durée de vie d'au moins de 25 ans,
- Faible niveau de bruit,
- Zéro maintenance (régénération du gaz SF6 après coupure),

1.2.2 Les différents types de coupure dans SF6

a. Disjoncteurs auto-pneumatique

Lorsque le disjoncteur est en position fermée, le courant passe par les contacts. Lors d'un déclenchement du disjoncteur, la partie mobile se déplace, entraînant la séparation des contacts et l'apparition d'un arc. Pendant la manœuvre d'ouverture, le disjoncteur produit lui-même la compression du gaz nécessaire au soufflage de l'arc. La manœuvre d'ouverture, par rapport au piston fixe, crée une surpression dans un volume qui s'évacue à l'intérieur de la buse et refroidit l'arc, permettant ainsi son extinction. Le disjoncteur auto pneumatique est adapté pour la coupure moyenne tension, mais il nécessite aussi une grande énergie de manœuvre (par exemple : pour un disjoncteur de 24kV, il faut fournir une énergie de 200J). La figure 1.15 représente un disjoncteur auto-pneumatique de 110kV [12].

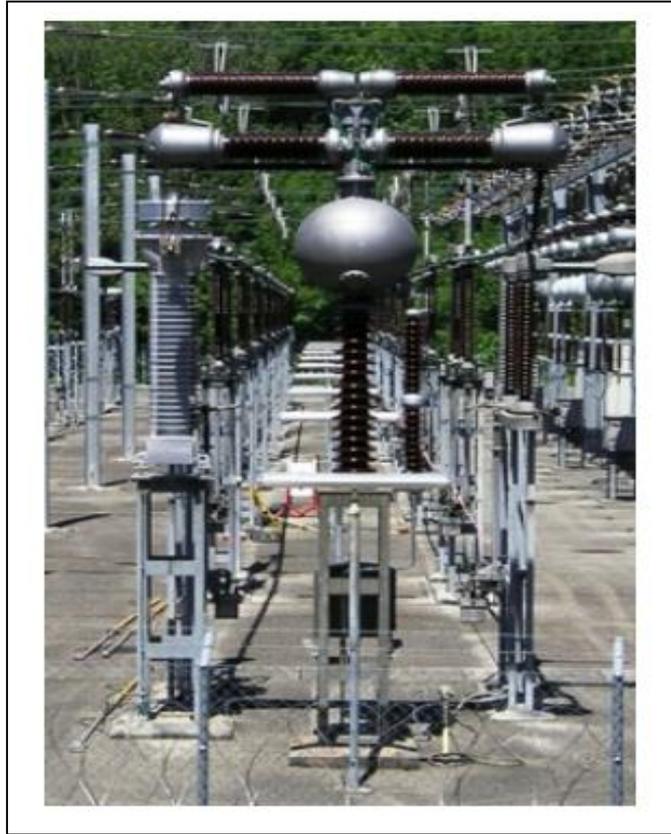


Fig.1.10 : disjoncteur auto pneumatique (110kV)

b. Disjoncteur auto-soufflage

Les disjoncteurs auto soufflage utilisent l'importante énergie de l'arc pour réaliser la coupure. Dans le cas des faibles courants, le soufflage s'effectue comme dans le disjoncteur auto pneumatique grâce à la compression du gaz dans le réservoir secondaire par le déplacement mécanique d'un piston et l'apport extérieur d'énergie.

Dans le cas des forts courants, l'énergie de l'arc produit une surpression dans le volume d'expansion. Ce qui entraîne la fermeture de la valve et isole le volume d'expansion par rapport au volume de compression. En raison d'un effet bouchon, la surpression provoque un écoulement de gaz dans le volume d'expansion générant un écoulement inverse qui souffle l'arc autour du zéro de courant. Une photo d'un disjoncteur à auto-soufflage est représentée par la figure 1.16 [12].



Fig.1.11 : disjoncteur auto-soufflage

1.2.3 Conception

La mise au point de nouvelles générations de disjoncteur SF 6 (hexafluorure de soufre), basés sur la même construction principale avec quelques modifications ou différences entre eux comme[13]:

- Le nombre de chambre de coupure ; car il y a des disjoncteurs à une seule chambre ou à deux ou trois en série.
- Le type d'organe de commande, soit par un mécanisme à ressort ou par système hydraulique, aussi si chaque pôle avec sa commande ou une commande pour les trois pôles [14].

Dans les disjoncteurs SF6 à une chambre de coupure, on trouve toujours les éléments suivants :

Une colonne polaire (deux prises de courants + chambre de coupure), le coffret d'organe de commande, le coffret d'appareillage et un châssis, support isolant.

On donne les différents éléments constituant un disjoncteur SF6 HT de tension nominale 245Kv dans la figure suivante :

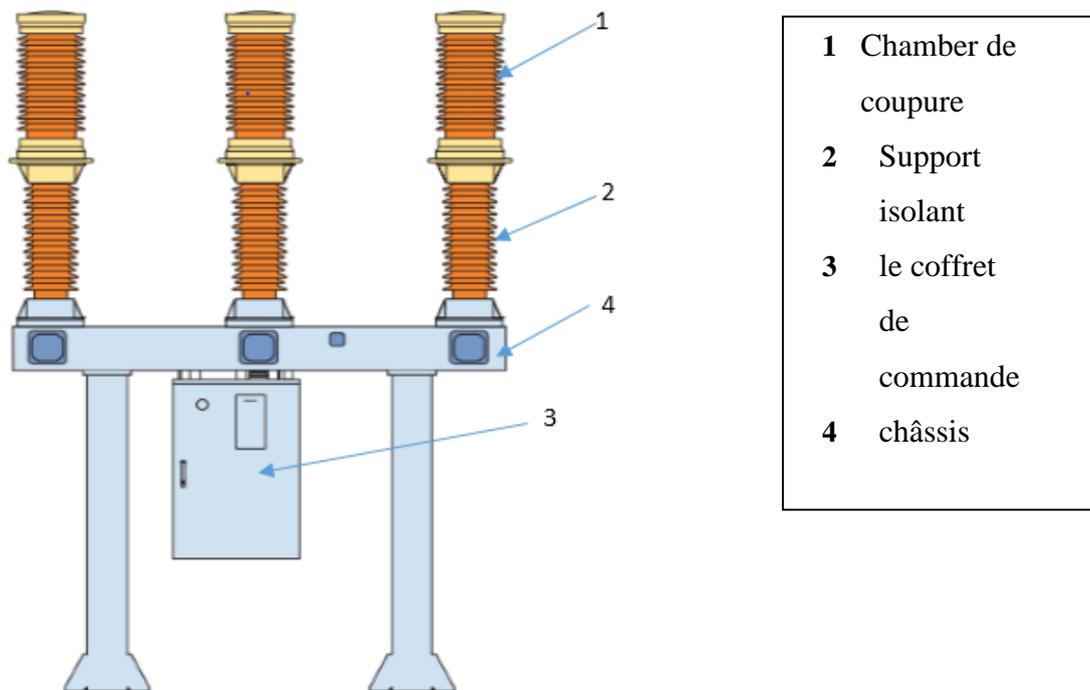


Fig.1.12 : Structure d'un disjoncteur SF6 HT, 3AP1 72.5 kV

1.2.4 Description du disjoncteur SF6 à une chambre de coupure

Le disjoncteur SF6 HT à une seule chambre de coupure avec mécanisme de commande à ressort pour chaque pôle est constitué principalement de trois colonnes polaires, disposées chacune sur un châssis doté d'une indication de position de commutateur, sur le côté du châssis est fixé le coffret de commande. Le coffret d'appareillage est installé sur le pôle central [14].

1.2.4.1 La Colonne polaire

Les trois colonnes polaires du disjoncteur sont identiques. La figure 5.17 représente une colonne polaire en coupe. L'élément de coupure **2** est disposé sur le support **3** qui l'isole par rapport à la terre [15].

Chaque colonne polaire est remplie par le gaz SF6 et équipée d'une surveillance de densité et de pression du gaz par un contrôleur [14].

1.2.4.2 Les câbles de liaison

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

1.3.4.3 Coffret d'organe de manœuvre

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 [14].

1.2.4.4 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 [6].

1.2.4.5 La chambre coupure

La chambre de coupure située à l'intérieur de chaque colonne polaire. Le but de cette chambre est de couper le plus rapidement possible l'arc électrique qui se produit à l'ouverture du contact, basé sur le principe de l'auto-compression. La surpression nécessaire au soufflage de l'arc est produite par la compression du gaz contenu dans un volume limité par un piston fixe et un cylindre mobile[14].

A l'état normal, le gaz est un isolant, et permet de supporter la tension réseau connectée à ses bornes. Lorsque les contacts s'ouvrent, l'intervalle entre les contacts est soumis à un fort champ électrique et la température du milieu augmente rapidement (15000 °C!). Le gaz s'ionise, on parle alors de plasma. Sous l'action du soufflage exercé sur l'arc lors du fonctionnement du disjoncteur, la température de l'arc diminue. La coupure de courant est alors réussie.

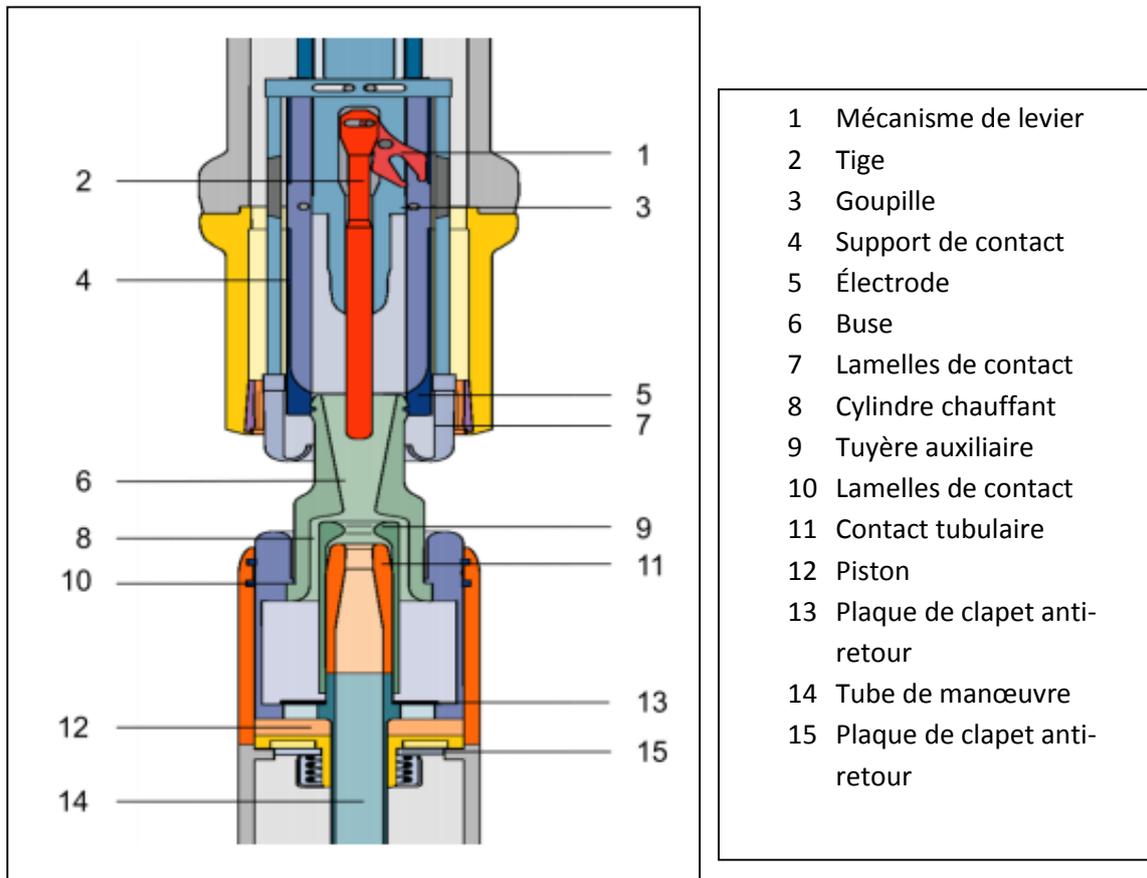


Fig.1.13 : Chambre de coupure du disjoncteur SF6 HT 245 kV.

1.2.4.6 L'organe de commande

Le fonctionnement des disjoncteurs est assuré par des organes de manœuvre qui fournissent l'énergie nécessaire pour effectuer des cycles de manœuvre tels que fermeture /ouverture, l'énergie accumulée dans le mécanisme doit assurer au moins trois cycles de manœuvre en raison de sûreté de fonctionnement [3,14].

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.

1.2.5 Le fonctionnement du disjoncteur SF6 HT

Le fonctionnement d'un disjoncteur déférent avec sons domaine d'application, on réalise alors qu'il y a trois régimes esse ciel.

- **Régime 0** disjoncteur fermer (verrouillage de fonctionnement)
- **Régime 1** déclenchement –réenclenchement(ou mêmes temps) dans les cas :
 - ✓ Des jeux de barre.
 - ✓ Des lignes aériennes.
 - ✓ Des charges impédances.
- **Régime 2** (déclenchement) à cause des cas suivants :
 - ✓ Des lignes souterraines
 - ✓ Des équipements sensibles
 - ✓ La commande volontaire 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 [8,15].

1.3 Dimensionnement des disjoncteurs

Le dimensionnement d'un disjoncteur est un travail complexe. On rappelle que le disjoncteur est le seul appareil qui possède un pouvoir de coupure en court-circuit ce qui rend son dimensionnement très délicat, car il y a davantage de contraintes à prendre en compte pour obtenir la performance de coupure et la stabilité du réseau électrique suite à son fonctionnement [3].

L'art de conception et de dimensionnement du disjoncteur consiste à donner des valeurs optimales aux différents paramètres de coupure afin d'obtenir les performances assignées à l'appareil avec un encombrement et une énergie de manœuvre aussi réduits que possible, mais suffisants pour conserver une marge de sécurité tenant compte des dérives potentielles des caractéristiques lors de la production.

1.3.1 Les critères de dimensionnement

- 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 [3].

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 .

Conclusion

Comme il existe une grande variété de disjoncteurs haute tension, on a parcellé sur les disjoncteurs hauts tension d'une manière générale et des disjoncteurs SF6 haute tension d'une manière particulière ont été donnés.

De par ses caractéristiques, le disjoncteur SF6 HT est l'appareil de protection essentiel des réseaux électriques HT, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc éviter l'endommagement du matériel .

Chapitre 02

Les phénomènes de coupure d'un
courant alternatif

Introduction

Sur un réseau électrique, l'interruption du courant s'avère quelques fois nécessaire. Que ce soit de façon volontaire comme lorsqu'il est nécessaire d'isoler une partie du réseau, pour y effectuer des travaux ou de façon accidentelle.

Le disjoncteur est donc devenu un appareil essentiel de contrôle et de sécurité en assurant l'interruption du courant en toutes circonstances de besoin ou d'anomalie.

Dans ce contexte, ce chapitre sera consacré aux phénomènes d'interruption d'un courant électrique, aux différents courants à couper, aux problèmes d'interruption et aux techniques utilisées pour réussir et optimiser la coupure.

2.1 Interruption des courants

L'interruption des courants électriques est une action indispensable à réaliser sur un circuit électrique afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens en cas de défaut (fonction de sécurité automatique), mais aussi pour contrôler la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Cette action est assurée par un appareil de coupure, soit dans un circuit à courant continu ou à courant alternatif, pour les deux cas elle résulte des phénomènes électriques et des contraintes sévères sur le réseau et l'appareil de coupure [16].

2.2 Interruption d'un courant continu

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

(Fig. 2.1) [16].

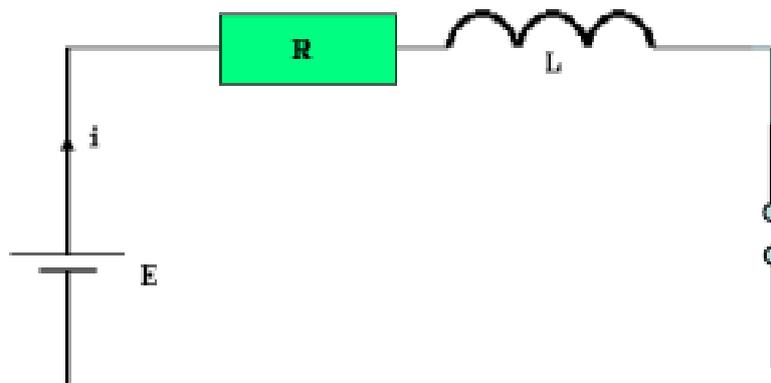


Fig. 2.1 : Circuit R L en courant continu.

- La Loi d'Ohm qui régit le circuit est:

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

L'énergie de coupure est:

$$\int_0^T ri^2 dt = \int_0^T (E - Ri)i dt - \int_I^0 Li di$$

Avec :

T : la durée de la 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 : le courant électrique

Cette relation montre que même avec une coupure infiniment rapide, l'énergie électromagnétique ($\frac{1}{2}Li^2$) initialement contenue dans le circuit va devoir cependant être dépensée entre les contacts.

Cette énergie est constituée de deux types

- Energie électrique qui dépend de temps : $\int_0^T (E - Ri)i dt$
- Energie électromagnétique qui dépend de courant : $-\int_I^0 Li di = \frac{1}{2} LI^2$

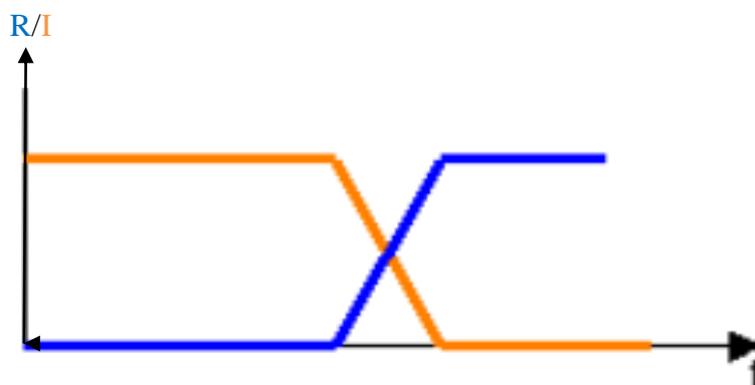


Fig.2.2: Variation de la résistance en fonction du courant de coupure.

Pour couper un courant électrique, il suffit que la résistance de l'interrupteur, initialement nulle, devienne infinie (interrupteur idéal). En d'autres termes, il faut que sa conductance diminue puis s'annule. Lorsque cette condition unique est réalisée, l'appareil devenu isolant n'est plus traversé par aucun courant.

2.3 Interruption d'un courant alternatif

L'interruption d'un courant alternatif. Dont les conséquences pratiques sont infiniment plus importantes. Dans ce cas la condition nécessaire et suffisante de coupure est que l'impédance R de l'interrupteur croisse et devienne infinie (Fig2.3).

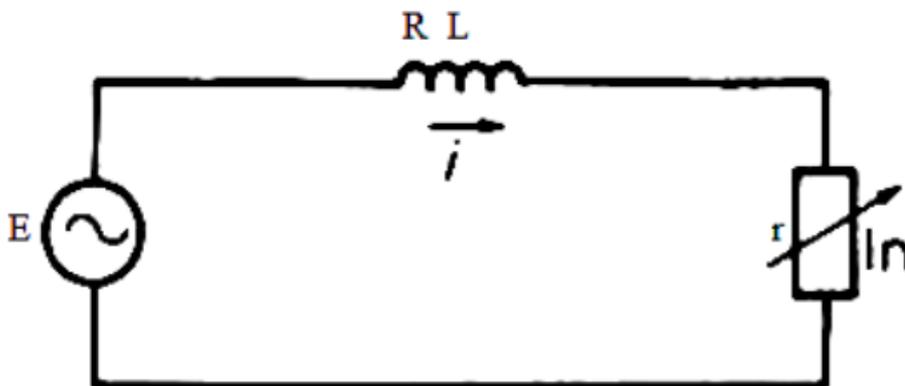


Fig.2.3 : Circuit R L en courant alternatif

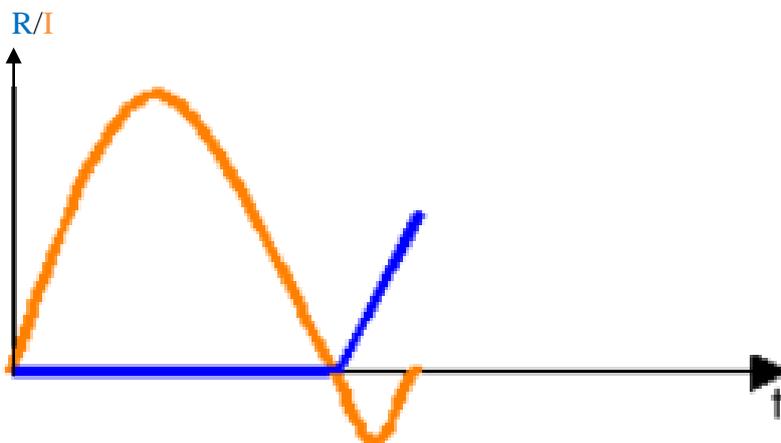


Fig.2.4 : Une coupure au passage par zéro.

Pour couper un courant électrique, il suffit que la résistance de l'interrupteur, initialement nulle, devienne infinie (interrupteur idéal). Il suffirait donc dans un circuit alternatif d'atteindre le passage naturel du courant par zéro pour faire évoluer rapidement l'appareil de l'état conducteur à l'état d'isolant.

2.4 Les différents courants à interrompre dans un réseau HT :

Dans un circuit électrique, la surintensité est atteinte lorsque l'intensité du courant dépasse une limite jugée supérieure à la normale.

Les causes et les valeurs des surintensités sont multiples. On distingue habituellement dans les Surintensités, les surcharges et le court-circuit.

2.4.1 La surcharge :

Le courant de surcharge est en général une faible surintensité se produisant dans un circuit électrique sain. L'exemple type en est le circuit alimentant des prises de courant sur lesquelles on a raccordé un trop grand nombre d'appareil.

2.4.2 Le courant de court-circuit :

Le court-circuit est l'un des incidents majeurs qui peuvent affecter les réseaux électriques en obligeant les disjoncteurs à réagir et il peut être défini comme une liaison accidentelle entre deux conducteurs de potentiels différents. Il peut être à impédance nulle et appelé court-circuit franc ou à impédance non nulle et appelé court-circuit impédance. Un court-circuit est toujours le résultat d'un manque d'isolement [17].

Les court-circuits sont des défauts caractérisés par leur durée, leur forme et leur intensité du courant.

- La durée d'un court-circuit est variable et selon laquelle on peut les classer en trois types [18] :
 - a) Un court-circuit auto extincteur,
 - b) Un court-circuit fugitif,
 - c) Un court-circuit permanent.
- Selon la forme du court-circuit, on peut avoir les types suivants :
 - Court-circuit phase terre.
 - Court-circuit biphasées.
 - Court-circuit biphasées terre.
 - Court-circuit triphasées équilibré.
- L'intensité du courant de court-circuit est une caractéristique importante, elle détermine la sévérité de la contrainte appliquée au réseau et au matériel en défaut, elle dépend de la forme des courts-circuits et du mode de mise à la terre des points neutres.

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 courant de court-circuit	I_{cc} Cas général	I_{cc} Cas défaut éloigné
Triphasé	$\frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d}$	$\frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d}$
Biphasé isolé	$\frac{U_n}{Z_i + Z_d}$	$\frac{U_n}{2Z_d}$
Biphasé terre	$\frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot Z_d}{Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_0 + Z_d \cdot Z_0}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{Z_d + 2Z_0}$
Monophasé	$\frac{U_n \sqrt{3}}{Z_d + Z_0 + Z_i}$	$\frac{U_n \sqrt{3}}{2Z_d + Z_0}$

Tableau 2.1 : Courants de court-circuit selon CEI 60909.

Avec :

U_0 : La tension nominale

Z_d : Impédance directe

Z_p : Impédance homopolaire

Z_i : Impédance inverse

D'après le tableau, on constate que le défaut triphasé est considéré comme le défaut le plus sévère.

2.4.3 Les contraintes qui suivent l'interruption :

L'action d'interruption de courant a des conséquences indésirables sur l'appareil de connexion lui-même, qui est chargé de réaliser l'action, d'une part et le réseau électrique d'autre part. [19,20]

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

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

2.5 La théorie de l'arc électrique :

2.5.1 Définition de l'arc

L'arc électrique joue un rôle fondamental dans la coupure courant alternatif. Il peut être vu comme une réaction du réseau à la continuité électrique.

L'arc électrique correspond à une décharge lumineuse qui accompagne le passage de l'électricité entre deux conducteurs présentant une différence de potentiel convenable. Se crée par une ionisation du milieu isolant, cette ionisation a lieu d'autant plus facilement que les surfaces conductrices est proche, Sa température est estimée expérimentalement à 15000K [21].

2.5.2 Naissance d'un arc électrique

a. Dans l'interruption d'un courant

A la coupure d'un circuit d'impédance Z_C , naît généralement un arc électrique entre les contacts de l'organe de manœuvre (interrupteur, disjoncteur). Ce fait marquant, qui intervient principalement sur forte surcharge (ou court-circuit) lorsque la séparation des pôles est dépendante des éléments de contrôle de la surintensité, se produit également sur ouverture non spontanée et -à un degré moindre- sur fermeture.[22]

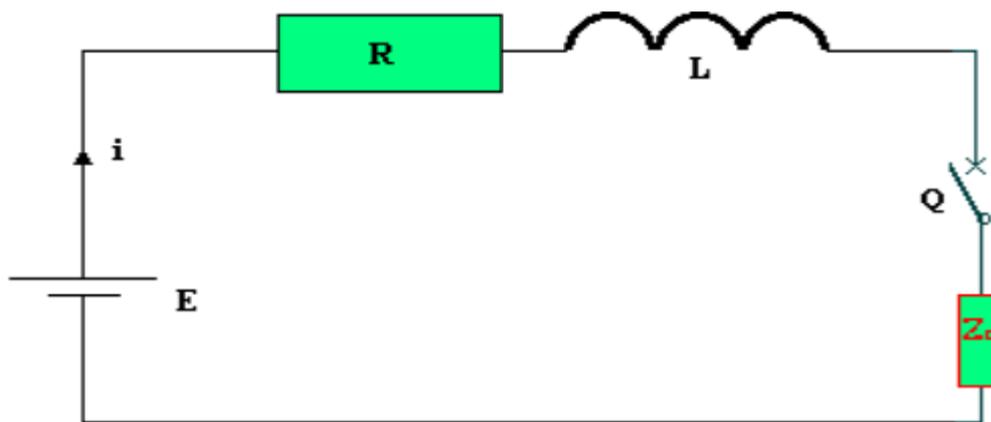


Fig.2.5: Explication simplifiée relative à un fonctionnement sur court-circuit ($Z_c=0$)

b. L'amorçage volontaire d'arc

Pour amorcer un arc, il faut un champ électrique suffisant entre anode et cathode. Ce champ électrique est obtenu avec une tension relativement faible entre électrodes lorsqu'elles sont proches.

Dans le cas d'une mise sous tension entre contacts très espacés, la tension nécessaire est beaucoup plus grande, c'est le cas notamment des fermetures sous tension d'appareils à haute tension pendant lesquels un claquage se produit entre les contacts avant que ceux-ci se touchent, donnant lieu au phénomène de pré-amorçage [23].

2.5.3 La théorie électrique de l'arc

L'arc électrique est considéré comme une impédance électrique variable purement résistive, qui varie en fonction de plusieurs paramètres électriques propres au milieu de développement de l'arc, qui sont : la tension, le courant, l'énergie développée par l'arc et l'énergie fournie à l'arc. L'énergie fournie à l'arc peut être accumulée à l'énergie développée par l'arc dans le cas d'un milieu très chaud (échauffement de l'arc), ou peut être soustraite à l'énergie développée par l'arc dans le cas d'un milieu très froid (refroidissement de l'arc).

2.5.4 Les caractères thermiques :

L'arc électrique est considéré comme un plasma thermique et caractérisé par [19] :

- Une température élevée ;
- Une création d'une différence de pression dans le milieu ;
- L'ionisation du milieu ;
- Les réactions (chimique et thermique) dans le milieu ;
- Un rayonnement important.

2.5.5 Avantage:

Permet de dissiper l'énergie par rayonnement et chaleur. Utilisation des propriétés de l'arc et de son extinction [19].

2.5.6 Comment éteindre cet arc :

En utilisant des appareils de coupure rapides, adaptés aux conditions de fonctionnement (courant / tension) et protégeant les installations ou les êtres humains.

2.5.7 Inconvénients, dangers de l'arc électrique :

- Pas de rupture instantanée du circuit ;
- Dégradation des contacts par micro-fusion (matière "arrachée") et risques de soudure ;
- Contraintes thermiques élevées (température d'arc de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de degrés) avec risques de brûlure pour les personnes, d'incendie pour le matériel ;
- Onde parasite, rayonnement U-V [19].

2.6 Les caractéristiques principales d'un disjoncteur HT

2.6.1 Le pouvoir de coupure :

C'est la valeur efficace du courant maximal que le contacteur peut couper, sans usure exagérée des contacts, ni émission excessive de flammes. Le pouvoir de coupure dépend de la tension du réseau. Plus cette tension est faible, plus le pouvoir de coupure est grand. Si un appareil de connexion ne possède pas un pouvoir de coupure au moins égal au courant de court-circuit présumé en son point d'installation, il doit être associé à un autre dispositif de coupure situé en amont, ayant le pouvoir de coupure nécessaire.

2.6.2 Pouvoir de fermeture

C'est la valeur efficace du courant maximal que le contacteur peut établir, sans souder des contacts. Il dépend de la cadence à laquelle s'effectuent les manœuvres. La défaillance en fermeture est le plus souvent la soudure des contacts qu'est un défaut critique ayant des conséquences graves. Le pouvoir de fermeture de chaque disjoncteur ou interrupteur prévu pour être fermé, si nécessaire, sur court-circuit, doit au moins être égal à la valeur maximale du courant de court-circuit à l'endroit où il est installé.

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

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

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

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

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

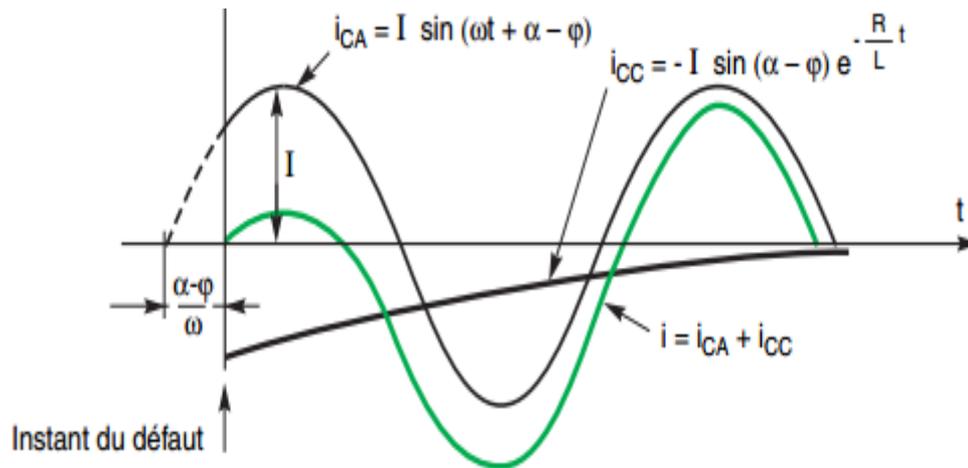


Fig.2.6: Présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en un point éloigné d'un alternateur.

2.6.3 La tension transitoire de rétablissement

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

Après le passage par zéro du courant, la conductance du milieu n'est pas totalement nulle et la tension aux bornes du disjoncteur varie très rapidement et peut atteindre la force électro Cette tension transitoire de rétablissement impose la circulation d'un très faible courant entraînant une dissipation de l'énergie par effet joule. Si les pertes sont alors inférieures à cette source de l'ordre de (10^{12}w/m^3), il peut y avoir emballement thermique et échec de la coupure.

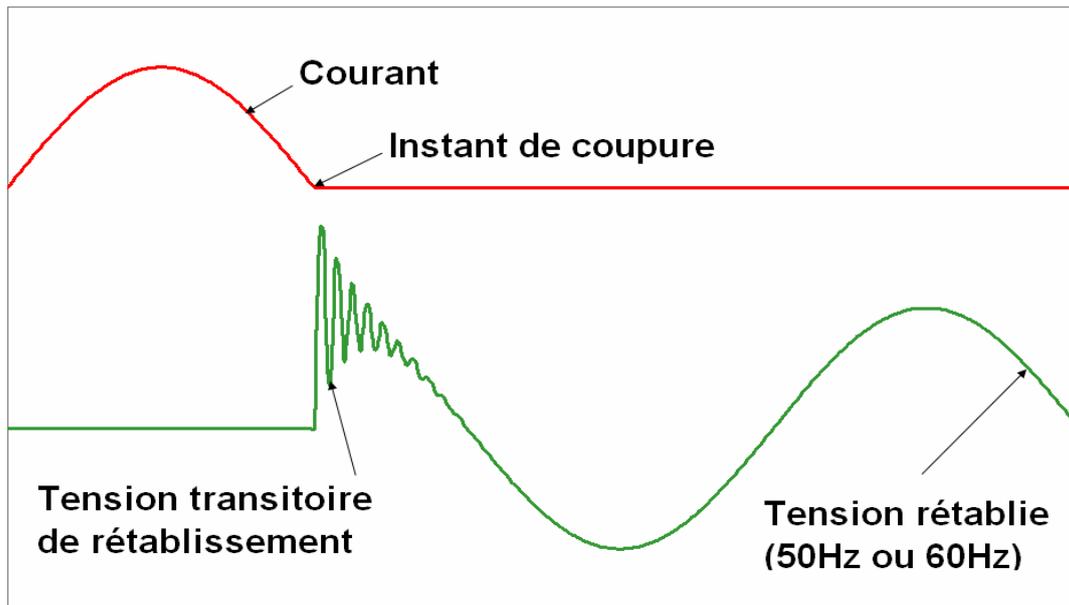


Fig.2.7: Tension transitoire de rétablissement

2.7 Les conditions du milieu pour réussir la coupure :

Pour une coupure réussie, le milieu doit avoir les caractéristiques suivantes : [11,19]

- Avoir une conductivité thermique importante pour pouvoir évacuer l'énergie thermique de l'arc électrique.
- Avoir une vitesse de désionisation importante pour éviter des réamorçages du milieu.
- Avoir une résistivité électrique faible lorsque la température est élevée pour minimiser l'énergie dissipée par l'arc.
- Avoir une résistivité électrique grande lorsque la température est faible pour minimiser le délai de rétablissement de la tension
- L'espace inter contacts doit offrir une tenue diélectrique suffisante.

Zéro naturel du courant, la résistance de l'arc devient infinie et la coupure est effective.

2.8 Processus de coupure avec l'arc électrique :

La coupure par l'arc électrique se fait en trois phases [14]:

- **La période d'attente :** Période entre l'ouverture des contacts et le zéro du courant où l'arc électrique est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne est conductrice sous l'effet d'une température élevée due à l'énergie dissipée par l'arc. La tension entre les deux contacts s'appelle la

tension d'arc et c'est une composante très importante dans le choix du milieu de coupure, car elle définit la valeur de l'énergie dissipée.

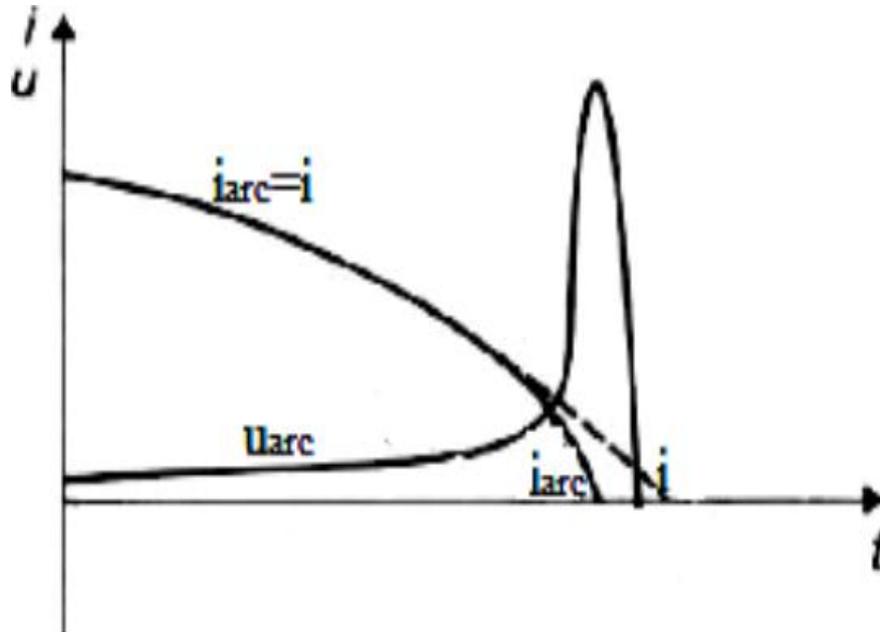


Fig.2.8 : Evolution du courant et de la tension de l'arc électrique

- **La période d'extinction** : Au moment de passage par zéro du courant, l'arc est éteint, le canal des molécules ionisées est cassé, le milieu redevient isolant et le courant est interrompu. La résistance de l'arc doit augmenter au voisinage du zéro du courant, et dépend de la constante d'ionisation du milieu. Aussi, la puissance de refroidissement de l'appareil doit être supérieure à l'énergie de l'arc dissipée par effet joule.
- **La période 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 on assiste à un phénomène de ré allumage ou réamorçage de l'arc.

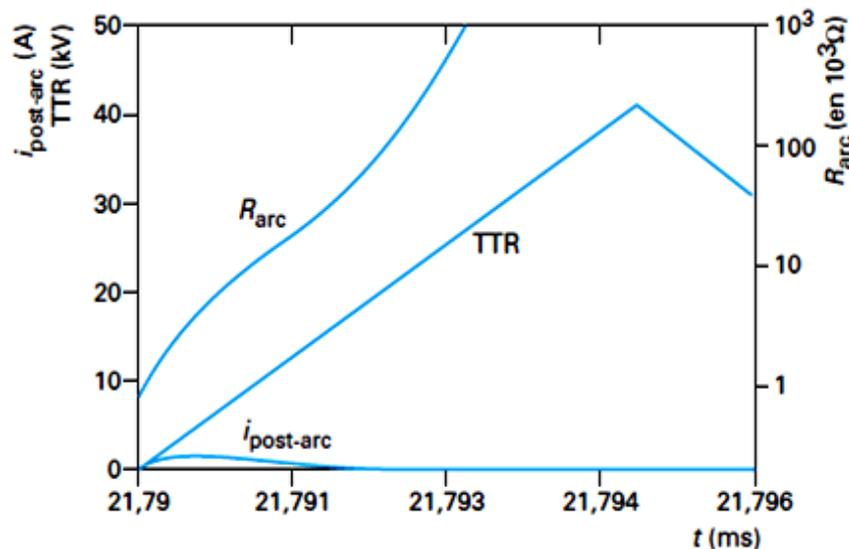


Fig. 2.9 : Evolution des paramètres de l'arc pendant la période Post-Arc

2.9 Technique de coupure en HT

Le domaine haute tension est compris entre 50 et 800kV pour des courants de court-circuit supérieurs à 10kA. Le rôle du disjoncteur HT est de contrôler l'arc lors du premier passage par zéro du courant, car c'est à cet instant que la puissance fournie à l'arc est minimale. Dans le cas d'un courant alternatif à 50Hz, ceci se produit toutes les dix millisecondes.

2.9.1 Coupure au passage du courant par zéro

Avec la décroissance du courant, la température du noyau d'arc diminue, de ce fait la conductivité électrique commence aussi à diminuer. A l'approche du zéro de courant, les échanges thermiques entre la gaine de l'arc et son noyau deviennent très importants, celui-ci disparaît en entraînant la disparition de la conductivité.

Après un passage du courant par zéro l'arc sera éliminé, donc il faut l'empêcher de se rallumer. Pour cela, il faut que l'appareil de coupure soit capable d'avoir une tenue diélectrique suffisante entre ses contacts. Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro de courant, du fait de l'incertitude d'appareil mesure-commande et il est aussi impossible d'accorder aux contacts une vitesse suffisante pour une coupure au même moment du passage par zéro. Par conséquent la coupure est réalisable au voisinage du passage par zéro afin de réduire l'intensité de l'arc et l'énergie de coupure.

2.9.2 Répartition de la coupure dans des chambres en séries

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

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

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

La figure (Fig. 2.10) donne un exemple de capacités naturelles d'un disjoncteur à deux chambres par pôle. En cas de court-circuit, la borne aval est à la terre. Sans condensateur pilote, la première chambre supporte 71 % de la tension totale du pôle. Avec des condensateurs de 400 pF, elle n'en supporte plus que 53 %

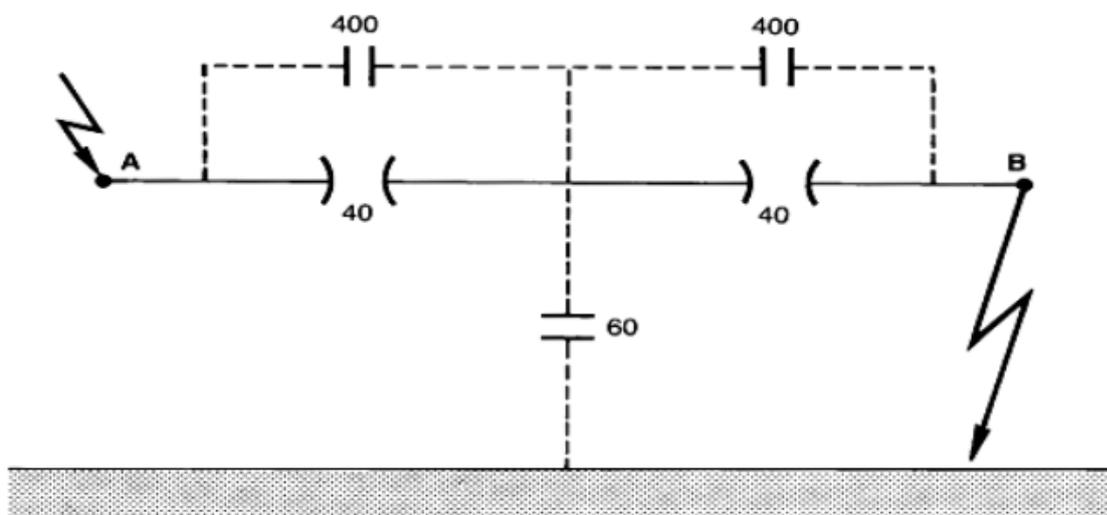


Fig. 2.10 : Capacités naturelles et additives répartissant la tension entre deux chambres en série

2.9.3 Shunter une impédance au contact d'arc

L'impédance qui sera shuntée au contact d'arc peut être de deux natures soit une résistance ou une capacité [10,9].

- **Une résistance** : pour diviser le courant de l'arc, une partie de courant sera écoulee dans la résistance, donc réduire l'énergie de l'arc, cette résistance sera déclenchée avant ou pendant l'apparition l'arc.
- **Une capacité** : pour améliorer la tenue diélectrique entre les deux contacts. Cette capacité sera déclenchée après l'extinction de l'arc.

2.9.4 Le principe de coupure dans un disjoncteur SF6 HT

Le principe de coupure d'un courant dans un disjoncteur SF6 HT représente sur quatre phase sont à noter :

a. Position "fermé"

Le disjoncteur est en condition normale, le circuit étant fermé, le courant circule à travers ses contacte.

b. Ouverture

En cas de défaut, le mode ouverture est enclenché et la trajectoire du courant est déviée à travers les contacts d'arc. On assiste alors à une suppression progressive due à la diminution du volume disponible pour le gaz crée par le mouvement du piston et par l'expansion de l'arc lui-même.

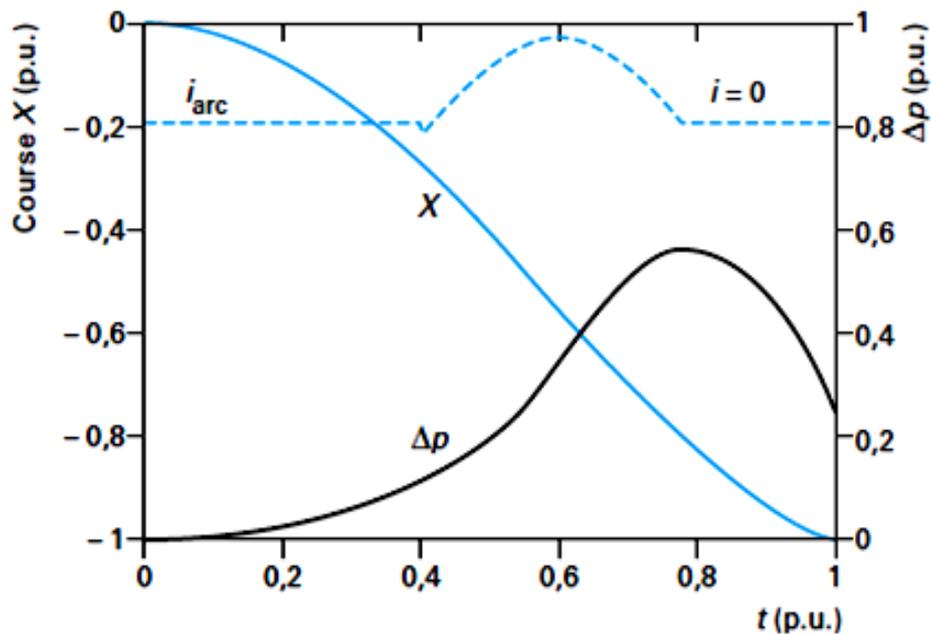


Fig.2.11 : Evolution des paramètres de l'arc pendant l'ouverture

c. Soufflage

L'ouverture du circuit entraîne la formation d'un arc électrique entre les électrodes. L'arc étant conducteur, le courant électrique continue de circuler mais, un soufflage énergétique de l'arc par le gaz froid fortement comprimé favorisera l'extinction de l'arc lors du passage à zéro du courant.

d. Position "ouvert"

Après l'extinction de l'arc, le disjoncteur est complètement ouvert. Le principe de fonctionnement du disjoncteur est identique à celui d'un interrupteur: En position fermée, il laisse passer le courant tandis que lorsqu'un problème survient sur le réseau, le disjoncteur est ouvert et la continuité électrique est ainsi interrompue. Ce principe apparemment fort simple cache tout un ensemble de phénomènes physiques délicats et très complexes qui surviennent lors de l'apparition de l'arc.

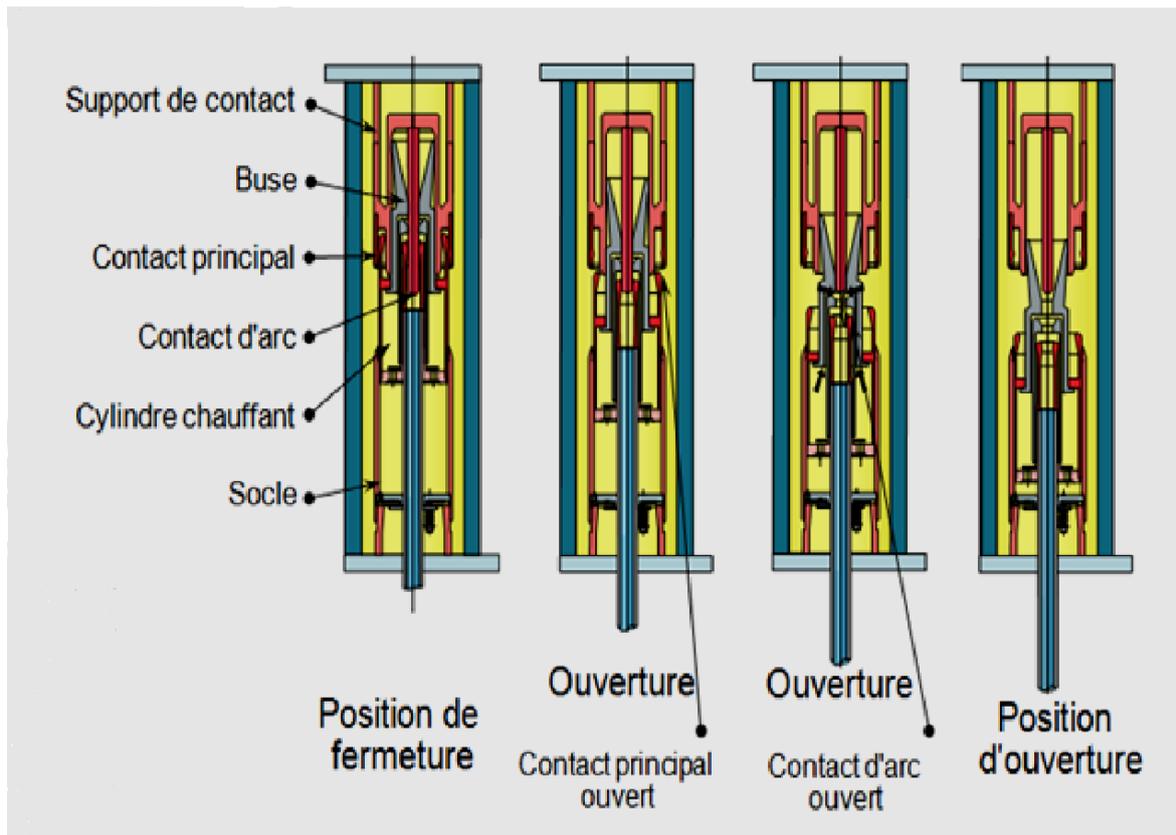


Fig.2.12: Les phases du processus de coupure d'un courant alternatif dans disjoncteur SF6 HT

2.10 La durée de coupure d'un courant alternatif

La durée de coupure d'un courant alternatif varie selon la fréquence de courant, elle varie entre la réception d'un signal d'ouverture des contacts et la séparation des contacts et l'extinction final de l'arc (figure 2.14).

- **La durée du pré-arc :** c'est la temporisation de l'outil de contrôle-commande et l'organe de commande du disjoncteur, et d'ouverture des contacts, elle dure de 97% à 98% de la durée de coupure.
- **La durée de l'arc :** c'est la période entre la séparation des contacts (la naissance de l'arc) et l'extinction finale de l'arc, elle est inférieure ou égale 15ms pour un disjoncteur SF6 HT 50 Hz.

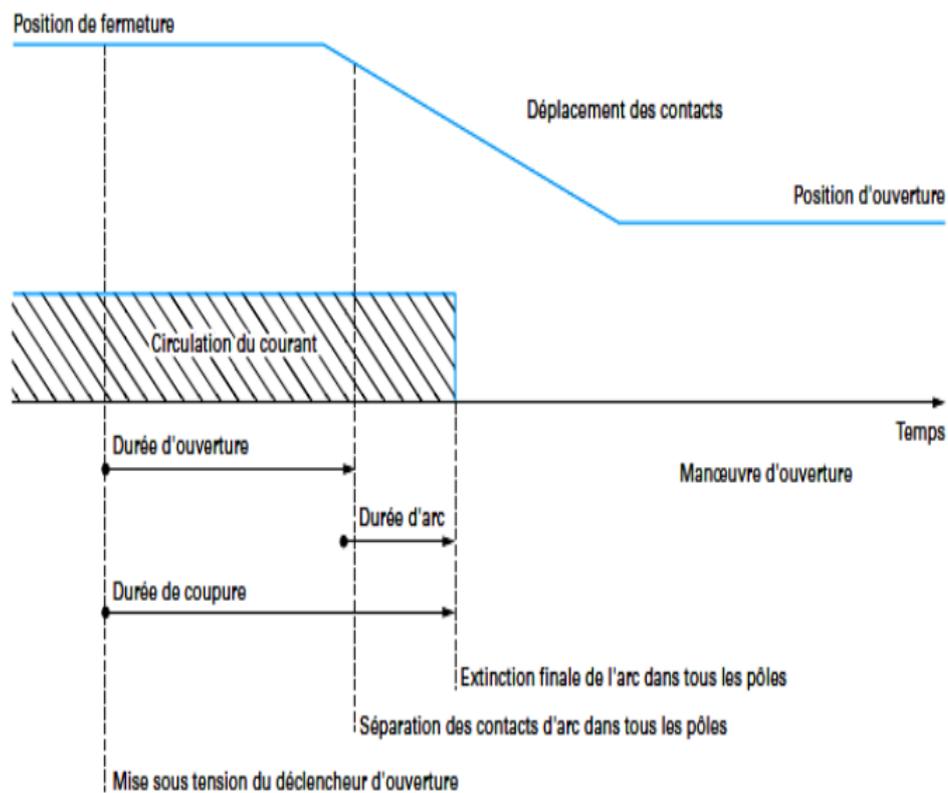


Fig.2.13: La durée d'interruption de courant par le disjoncteur

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

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.

3.1 Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique

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

Les modèles diélectriques et thermiques : ces modèles plus physiques qui décrivent le comportement de l'arc en calculant les évolutions des paramètres du plasma tels que les champs de température ou de vitesse.

- **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.

3.2 Représentation des modèles d'arc à boîte noire

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

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) \quad (3.1)$$

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.

3.3 Les modèles de base

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

3.3.1 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:

$$g = \frac{1}{r} = F(w) \quad (3.2)$$

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

En dérivant les deux membres de la relation (3.2) par rapport au temps nous aurons:

$$\frac{dg}{dt} = F'(w) \cdot \frac{dw}{dt} \quad (3.3)$$

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 , $(ri^2 - P) \cdot dt$ 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) dévie:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{F'(w)}{F(w)} (ri^2 - P) \quad (3.5)$$

➤ 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 ($e=2,7182$).

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 (III.8) la relation (III.5) dévie :

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{w_0} (ri^2 - P_0) = \frac{P_0}{w_0} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3.9)$$

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ri^2}{P_0} - P_0 \right) = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3.10)$$

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 (Tau et P_0) sont considérés comme des constantes, mais la réalité expérimentale est différente, car (Tau et P_0) ne restent pas constants durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc [22].

3.3.2 Le modèle de Cassie

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (3.11)$$

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

La courbe $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt}\right)$ La courbe en fonction de (u^2) devrait être une droite (Tau, U_0) constantes dont l'intersection avec les axes permettrait de déterminer $(\text{Tau}$ et $U_0)$.

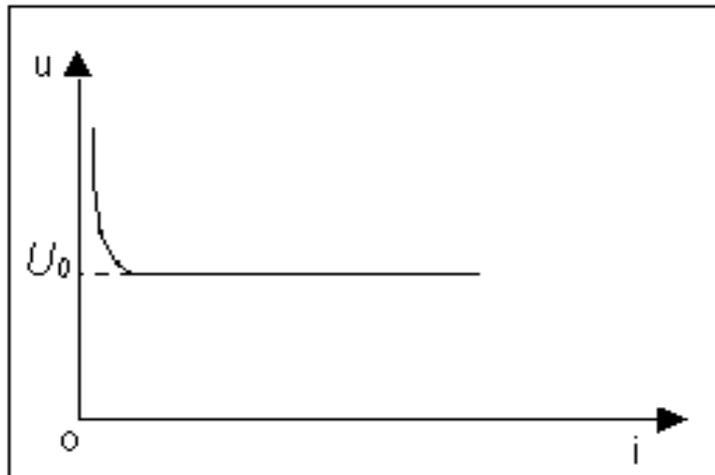


Fig.3.1 : Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.

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 [24].

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.

3.3.3 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	$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0} \right)$	$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right)$
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 [25].

3.8 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 [25].

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

3.4.1 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 [25, 26, 27, 28].

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0 + U_0 |i|} - 1 \right) \quad (3.12)$$

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P(P_0 + U_0 |i|)} - 1 \right) \quad (3.11)$$

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).

3.4.2 Le modèle de Habedank

L'arc est considéré comme une entité physique formée par deux composants en série, l'un est décrit par l'équation de Mayr et l'autre par l'équation de Cassie (Fig. 3.2) [29, 30].

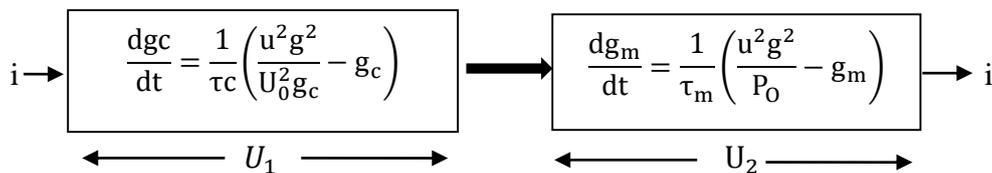


Fig. 3.2 : Le modèle de Habedank

Les équations du modèle sont :

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_{c}} \left(\frac{u^2 g^2}{U_0^2 g_c} - g_c \right) \quad (3.14)$$

Et

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_{m}} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_m \right) \quad (3.15)$$

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.

U_0 : Le pourcentage constant de la caractéristique $u-i$ de l'état statique (Fig. 3.1).

g_0 : La conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie.

τ : C'est la constante de temps de Cassie.

P_m : La puissance de refroidissement de l'état statique de Mayr.

g_m : La conductance de l'arc décrite par l'équation de Mayr.

τ_m : La constante de temps de Mayr.

Chaque équation contient deux paramètres, donc ce modèle à quatre paramètres indépendants à déterminer (τ_c , U_0 , τ_m et P_0).

3.4.3 Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique [31,32,33,34]. 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 :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^\alpha} \left(\frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (3.16)$$

g : La conductance de l'arc

u : La tension de l'arc

i : Le courant de l'arc.

τ_0 : La constante de temps de l'arc

P : La puissance de refroidissement

α : Le paramètre qui influe sur Tau 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 :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{ui}{P_0 \cdot g} - 1 \right) = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{u}{P_0} - 1 \right) \quad (3.17)$$

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

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3.18)$$

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) [35,36].

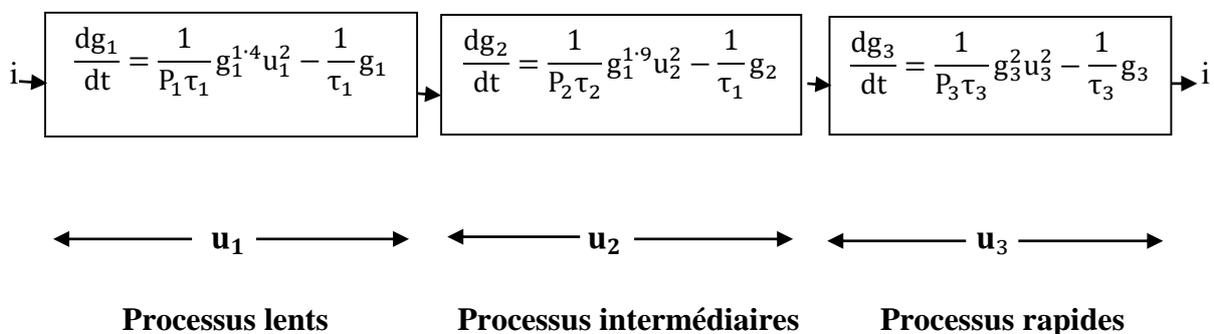


Fig. 3.3 : Le modèle de KEMA

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

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}_j \text{Tau}_j} \cdot g_j \lambda_j u_j^2 - \frac{1}{\text{Tau}_j} \cdot g_j \quad (3.19)$$

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 :

$$\frac{1}{g} \sum_j^3 \frac{1}{g_j} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (3.20)$$

La tension 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 :

$$i = gu = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3} \cdot u \quad (3.22)$$

Les paramètres du modèle

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

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

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

3.4.5 Le modèle schavemaker

C'est le modèle le plus récent, avec le paramètre τ constant et la puissance de refroidissement en fonction de la puissance électrique d'entrée [33,35,36].

$$P = P_0 + P_1 ui$$

P_0 : La constante de 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:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{p_0 + p_1 ui} - 1 \right) \quad (3.23)$$

Les paramètres indépendants de ce modèle sont $(\text{Tau}, P_0 \text{ et } P_1)$.

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).

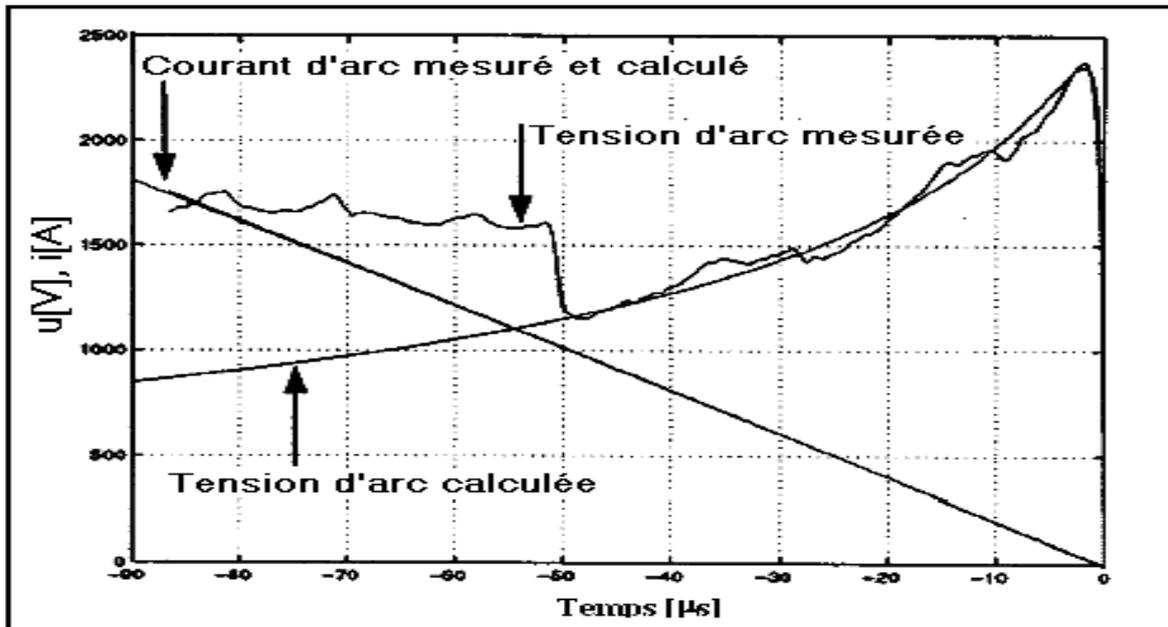


Fig.3.4 les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés.

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:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_i}{\max(U_0 |i|, P_0 + P_1 u_i)} - 1 \right) \quad (3.24)$$

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:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u}{U_0} - 1 \right) \quad (3.25)$$

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 forts**

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_i}{P_0} - 1 \right) \quad (3.26)$$

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.

Conclusion

Nous nous devons de citer l'un des premiers modèles d'arc « 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 dans les domaines des courants forts, cependant les modèles les plus récents de Schavemaker et KEMA sont une véritable innovation, ils sont appréciés par tous les chercheurs dans le domaine de la modélisation des disjoncteurs 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 avec le modèle Mayr

Introduction

Dans le présent chapitre on a choisi le modèle de Mayr, pour modéliser l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 haute tension.

La modélisation d'arc avec ce modèle nous aide à maîtriser les phénomènes d'interruption d'un courant alternatif, décrite dans la partie théorique.

Ce travail est constitué de trois étapes :

La première étape est la conception d'un interrupteur basée sur l'équation du modèle de Mayr.

la deuxième étape est la simulation du comportement dynamique de l'arc en utilisant l'interrupteur qu'on a conçu .

La troisième étape est une interprétation des résultats obtenue

4.1 Conception de modèle

4.1.1 Description du modèle de Mayr

Le modèle de Mayr 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:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right)$$

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

c : la conductance d'arc

u : la tension d'arc

i : le courant d'arc

τ : la constante de temps de l'arc

P : la puissance de refroidissement

4.1.2 Mise en équation du modèle dans le simulink

Le modèle de mayr

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{p_0} - 1 \right) \quad (4.1)$$

$$i = gu$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{dt} \left(\frac{dg}{g} \right) = \frac{d \ln(g)}{dt}$$

L'équation (4.1), Peut s'écrire :

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{gu^2}{p} - 1 \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{du(3)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{e^{u(3)}u(1)^2}{p} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Avec :

$$u(3) = \ln g$$

$$e^{u(3)} = e^{\ln g} \Leftrightarrow g = e^{u(3)}$$

$$gu^2 \rightarrow e^{u(3)} \cdot u(1)^2$$

$$y = i = gu \rightarrow y = e^{u(3)} \cdot u(1)$$

$u(1)$: C'est la première entrée et égale à la tension d'arc: u .

$u(2)$: C'est la deuxième entrée (L'état des contacts) et représente la séparation de contact du disjoncteur.

Lorsque : $\begin{cases} u(2) = 0 & \Leftrightarrow \text{les contacts sont fermés} \\ u(2) = 1 & \Leftrightarrow \text{les contacts sont ouverts} \end{cases}$

$u(3)$: C'est la variable d'état de l'équation différentielle qui est le logarithme naturel de l'arc conductance: $\ln(g)$.

x_0 : C'est la valeur initiale de la variable d'état, à savoir la valeur initiale de la conductance de l'arc: $g(0)$.

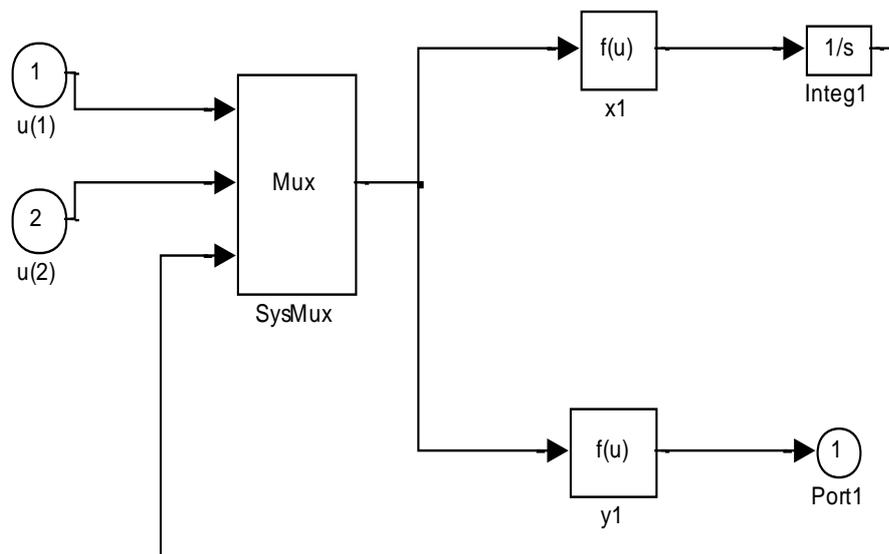


Fig.4.1: Système d'équation de modèle Mayr.

On a créé un sous système

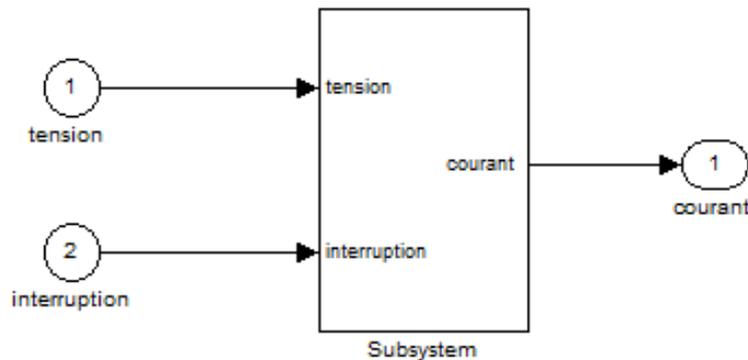


Fig.4.2: Sous système d'équation de modèle Mayr

4.1.3 Insertion du modèle dans le circuit d'essai

Pour insérer notre interrupteur dans le circuit d'essai il est nécessaire de lui ajouter le bloc de Simulink suivants (fig.4.3) :

- **voltage measurement** : pour mesurer la tension de l'arc.
- **Hit crossing**

Le bloc Simulink « Hit crossing » pour détecter le zéro du courant, (lorsque l'entrée, dans ce cas-ci le courant, traverse la valeur zéro). Par conséquent, en ajustant le pas, le bloc assure que la simulation trouve le point de passage à zéro. Ceci est important pour le coupe-circuit, lors du passage par zéro de la tension et du courant.

- **Step**

Le bloc "Step" est utilisé pour contrôler (commander), la séparation de contact du disjoncteur (l'ouverture et la fermeture). L'étape est réalisée à partir d'une valeur zéro une au temps spécifié de séparation de contact. Quand les contacts sont fermés, l'équation différentielle suivante est résolue:

$$\frac{dI_{ng}}{dt} = 0$$

Par conséquent, le modèle d'arc se comporte comme la conductance avec le valeur $g(0)$.

À partir du temps de séparation de contact dorénavant, l'équation de Mayr est résolue :

$$\frac{dI_{ng}}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{gu^2}{p} - 1 \right)$$

La valeur initiale de la conductance d'arc $g(0)$ et le temps à l'où la séparation de contact du disjoncteur commence peuvent être spécifiés au moyen du dialogue de modèle d'arc.

- **Controlled current source**

Ce block convertit le signal d'entrée de Simulink en une source de courant équivalent. Le courant généré est entraîné par le signal d'entrée du bloc.

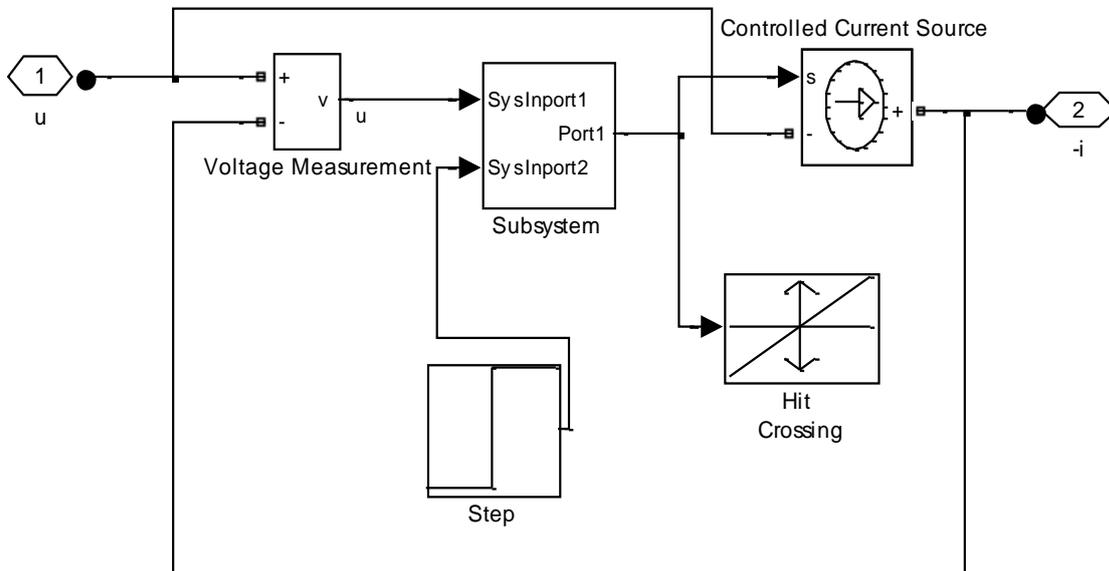


Fig.4.3 : Le bloc du modèle de Mayr

Après avoir terminé cette étape on a créé un sous-système qu'on a appelé « Mayr interrupteur » (fig4.4), et qu'on a inséré dans le circuit d'essai (fig.4.5)

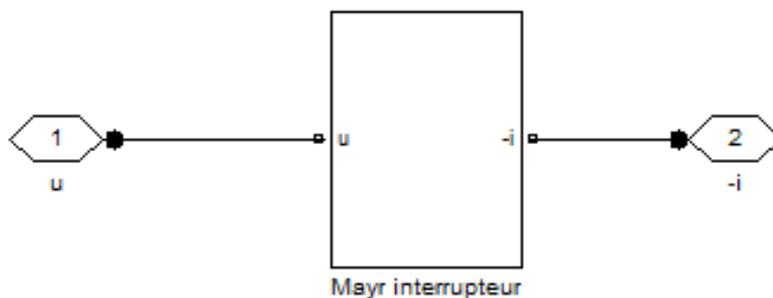


Fig.4.4 : Sous système du modèle de Mayar

Avec edit blok on 'introduit les paramètres du modèle et notre modèle est près pour effectuer des simulations.

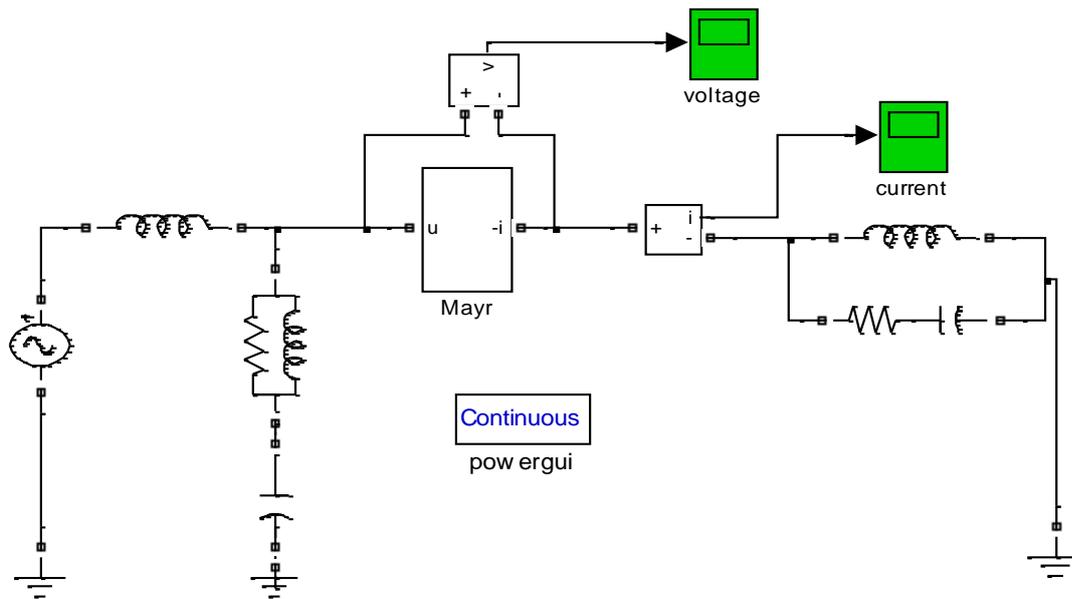


Figure 4.5 : Le modèle de mayr insere dans le circuit d’essai.

Les paramètres du circuit d’essai sont :

$E_{syut} = 59196$ v (amplitudes maximales) phase 90° , et sa fréquence 60 Hz.

$L_S = 3.52 \cdot 10^{-3}$ H

$R_1 = 29.8 \Omega$

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

$C_1 = 1.98$ MF

$R_2 = 450 \Omega$

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

$C_1 = 1.93$ nF

4.2 Simulation avec le modèle de Mayr

On ouvre la boîte de dialogue du modèle et on introduit les paramètres du modèle de Mayr (figure 4.4), extrait des courbes mesurées de la tension et du courant de l’arc

$\tau = 0.3$ [us], $P = 30900$ [W], ainsi que l’instant de séparation de contact qu’on a choisi à $t = 0.02$ [s] la valeur initiale de la conductance d’arc $g(0) = 10^4$ [s], ensuite on lance la simulation .

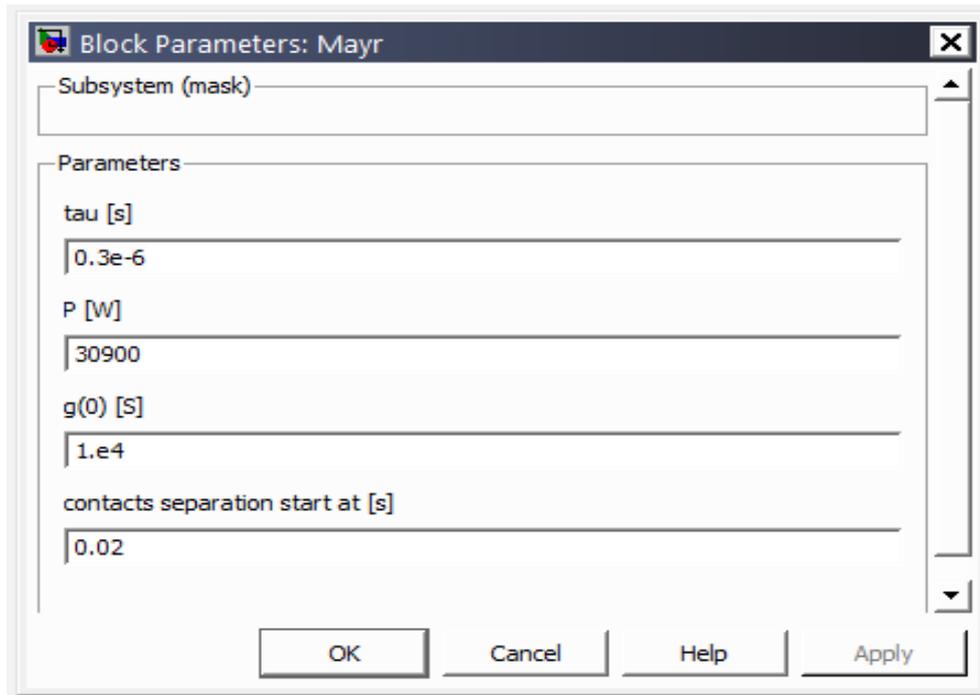


Fig. 4.6 : La boîte de dialogue du modèle

4.3 Les résultats de la simulation

Les figures (4.7 et 4.8) représentent respectivement le courant et la tension simulés de l'arc. On observe une interruption réussie, comme ça été le cas au laboratoire, car le courant s'annule après le passage par zéro et la tension transitoire de rétablissement (TTR) s'amortie.

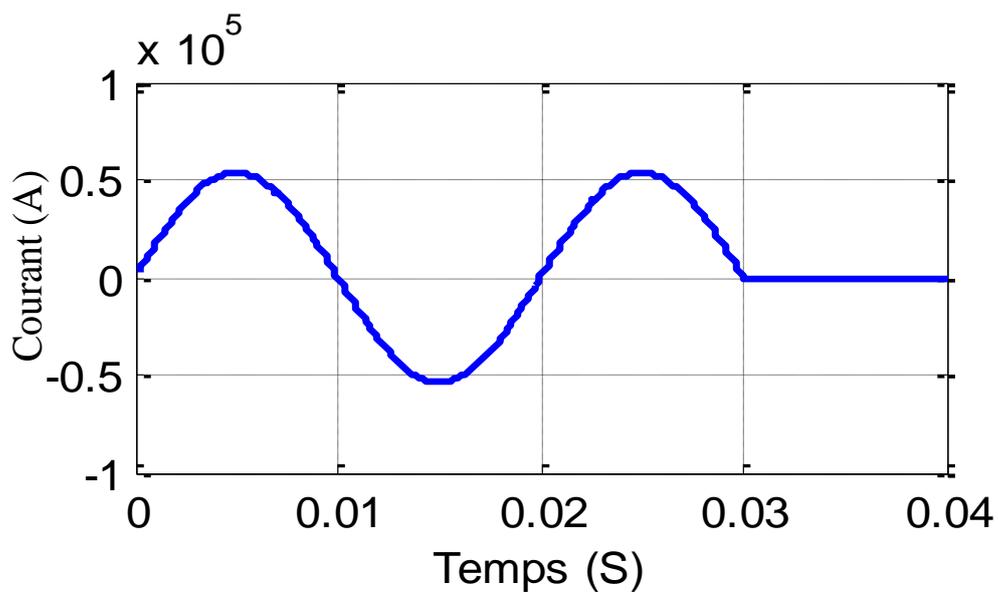


Fig. 4.7: Courant simulée par le modèle Mayr.

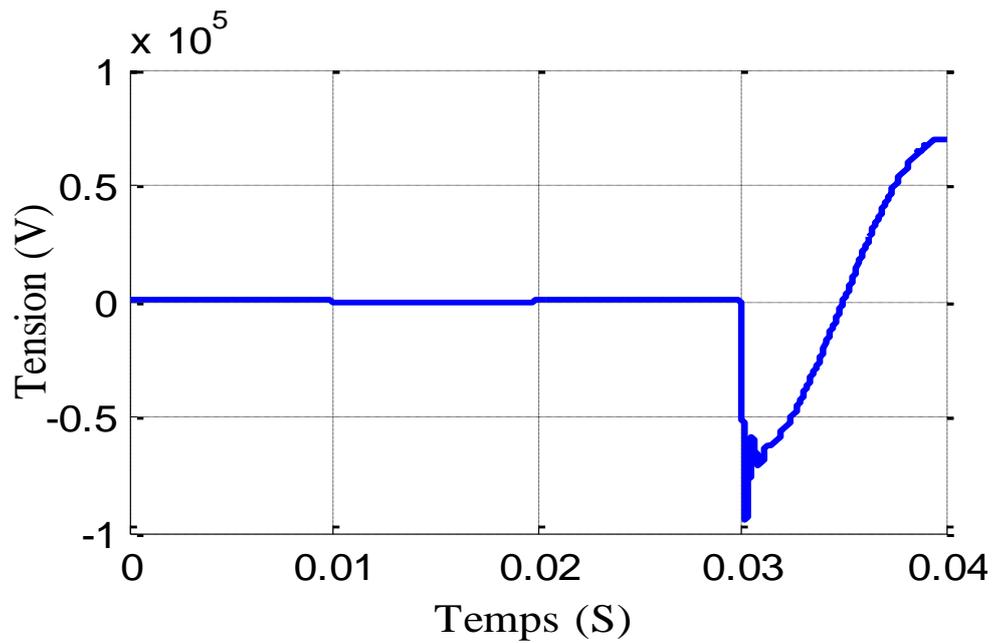


Fig. 4.8: Tension simulée par le modèle Mayr

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

- Un faible courant poste arc de : -1.0982
- Une TTR maximale de: -95 k.3V
- Un pic d'extinction faible : 1166 V

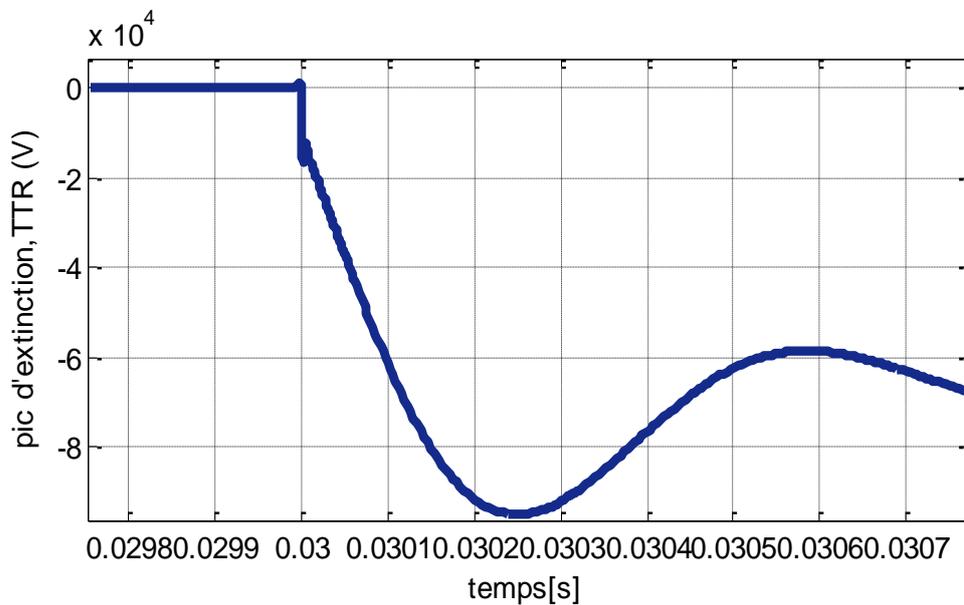


Fig.4.9 : Tension transitoire de rétablissement (TTR) et pic d'extinction

Ce modèle donne une interruption réussie, comme ça été le cas durant l'essai réel, car le courant s'annule après le passage par zéro du courant et la TTR s'amortie.

Bien que d'après la littérature ce modèle ne reproduit pas parfaitement la tension et le courant mesuré dans le demain de courant fort.

Conclusion :

À travers ce chapitre on peut conclure que, l'arc électrique est un phénomène important pour la coupure des courant alternatif dans le disjoncteur SF6 ht le modèle de Mayr utiliser pour la modélisation de l'arc traduit bien le comprtement de disjoncteur SF6 HTdans le demaine des fable courants.

Conclusion générale

Conclusion générale

A travers ce mémoire, on a traité l'interruption d'un courant électrique alternatif dans un circuit haute tension par un disjoncteur SF6 HT, en suite on a modélisé et simulé le phénomène électrique d'interaction circuit-arc ; par un modèle d'arc électrique à boîte noire.

Le disjoncteur SF6 haute tension est installé dans un réseau électrique HT pour protéger ses différentes composantes qui le constitue lors d'un court-circuit, en séparant la partie affectée par se défaut. Ce disjoncteur est caractérisé par son pouvoir de coupure du courant (la séparation d'une partie) et de fermeture ou rétablir le courant (réalimentation d'une partie) en charge et sous tension, pour les plus sévères des cas, les courts circuits triphasés connus par leurs grandes valeurs d'intensité électrique.

Après le traitement des différents modèles d'arc électrique à boîte noire, on a opté pour le modèle de Mayr suite à sa démontrée pour la modélisation d'arc électrique.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire consacré à la simulation de l'arc électrique par le modèle de Mayr, on a expliqué d'abord la procédure de simulation avec le modèle de mayr. La modélisation et la simulation de l'arc électrique nous ont permis de donner une description assez précise sur le comportement dynamique du courant et de la tension.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Messaoud MOHAMMEDI « **Schémas et Automates Programmables** », support de cours Première année Master Commande. Année 2011.
- [2] Zakaria ER « **Disjoncteur définition fonctionnement et type** » EMI GA1 2009/2010.
- [3] Serge THEOLEYRE « **Les techniques de coupure en MT** », Cahier technique n° 193 éditions septembre 1998. P6-7-8-9-16-17-1824-25.
- [4] Dr. Noredine BENAIED « **Schémas et Appareillages électriques** », Support de cours Première année Master Commande. Année 2014. P 15-16.
- [5] Denis Dufour net « **Disjoncteurs SF6 Évolution de 1959 à 1994** », Revue générale de l'électricité n° 5, P4-5-6-15-17-28.
- [6] Zensol@zensol.com Disjoncteurs Haute tension.htm.
- [7] ZELLAGUI Mohamed, « **ÉTUDE DES PROTECTIONS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES MT (30 & 10 kV)** », université mentori Constantine, juillet 2010.
- [8] Merlin Gerin, Manuel d'utilisation, « **Disjoncteurs MT 30 kV: Fluarc FB.4** » France, juin 2002.
- [9] J. PASTEAU « **Introduction à l'appareillage très haute tension** », cahier technique n° 127 édition juin 1984 Schneider Electric, p 4-5-6-11-15.
- [10] D. KOCH. « **Propriétés et utilisations du SF6 dans les appareils MT et HT** », Cahier technique n°188, édition février 2003, p 8-9.
- [11] « **Disjoncteur 3AP1 FI tension nominale 245 kV N°35078683** », instruction de service pour SONELGAZ. Siemens AG2003.
- [12] Dannet RANDRIANARIVAO « **modélisation des écoulements dans un disjoncteur haute tension** », l'université de Toulouse, septembre 2012.p 19-25-26.
- [13] S. Y. LEUNG, A. SNIDER & S. M. WONG, « **SF6 Generator Circuit Breaker Modeling** », International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada on 19-23 juin 2005.
- [14] « **Disjoncteur 3AP1 FI tension nominale 245 kV N°35078683** », instruction de service pour SONELGAZ. Siemens AG2003.
- [15] « **Disjoncteur 3AP1 FI pour tension nominale 60 kV N° de fabrication 35078735...766** », instruction de service pour SONELGAZ. Siemens AG2003.

Références Bibliographiques

- [16] Yves PELENC « **Appareillage électrique d'interruption à haute tension** »
« **Interruption des circuits alimentés en courant continu** » DOSSIER
Techniques de l'Ingénieur D4 700 Document délivré le 09/05/2012, P 14-15- 16-
29-29-30-34.....36.
- [17] Benoît CALMET « **Protection des réseaux de transport et de répartition** »
Dossier Techniques de l'Ingénieur d4800 Document délivré le 08/05/2012, p5.
- [18] B. de Metz-Noblat & F. Dumas & C. Poulain « **Calcul des courants de court-circuit** », Cahier technique n°158 Schneider Electric.
- [19] Yann Cres Sault « **Propriétés des appareils de coupure** » Laboratoire LAPLACE.
- [20] Mr BOUCHAHDANE Mohamed « **Etude des équipements de protection de la nouvelle ligne 400 kV en Algérie** ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister (2009).
- [21] ENOH SERGE DIDIER EBY « **Simulation numérique du transfert radiatif dans les arcs de disjoncteurs à SF6** ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtres sciences appliquées Mars 1997.
- [22] R.P.P Skeets et V. Kertész « **Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a valeted arc model** », IEE Proc. Genre. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, p 121-125.
- [23] Denis DUFOURNET « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 2)** » DOSSIER Techniques de l'Ingénieur d4692 Document délivré le 09/05/2012.p 11-12-16.
- [24] S. Vaquié, « **L'arc électrique** ». CNRS éditions Paris, 2000, p188-189.
- [25] J. A Martinez-Velasco, « **Modeling of circuit breakers using the type-94 component** ». EEUG News February 1997, p 55-66.
- [26] 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 p 137-142.
- [27] 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, April1992 p 1016-1022.

Références Bibliographiques

- [28] J.A. Martinez-Velasco, « **Circuit Breaker Representation for TRV Calculations** », EEUG News Aug-Nov 1998, p 77-87.
- [29] 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, p 205-208.
- [30] 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, p 1921-1925.
- [31] 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, p 1148-1153.
- [32] 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), p 1056-1062.
- [33] 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, p1-6.
- [34] 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, p1-5.
- [35] R.P.P Smeets, S. Nishiwaki, « **Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers by Means of Current Zero Analysis** », IEEE trans., 2002, p 424-429.
- [36] 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, p: 121-125.