

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira de Béjaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

*Mémoire de fin d'étude*

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en  
Electrotechnique*

*Option : Réseaux électriques*

**Thème**

***Simulation de la coupure d'un défaut  
proche en ligne en utilisant le modèle de  
Mayr modifié***

Présenté par :

*M<sup>r</sup>* MAHTOUT Lahlou

*M<sup>r</sup>* KASRI Iliessa

Encadré par :

*M<sup>me</sup>* LATRI Fatiha

Année Universitaire 2021 – 2022

---

### **Remerciements**

*Nos sincères remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté,*

*la santé et la patience qu'il nous a donné afin de réaliser ce mémoire.*

*Également, nous remercions notre promotrice Madame ZIDANE F.*

*pour son encadrement et sa disponibilité.*

*Aussi, nous la remercions pour ses encouragements, son indulgence, et sa*

*Sympathie tout le semestre et les années d'études précédentes.*

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance aux membres de jury*

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

---

## ***Dédicace***

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

*A mon père M. Mahtout Said pour ses soutiens moraux et  
financiers sans oublier ma mère Mme Yahiaoui Malika*

*A mes sœurs Seline, Chanez, Dina*

*A tous mes amis :Katia, Naravas ,Hmidouche, Samy, Lounis, sadya ...*

*A tous ceux qui me sont chers.*

**M.Lahlou**

---

## ***Dédicace***

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

*A mon père M. KASRI lamine pour ses soutiens moraux et  
financiers sans oublier ma mère Mme KASRI Samia*

*A mes frères KASRI sidali et KASRI Yacine*

*A ma sœur KASRI Amina*

*A tous mes amis : Nazim, Amdjed, Takfa , Amine, Kenza , Islam*

*A tous ceux qui me sont chers.*

**K.Iliesse**

<b>Table des matières</b>	<b>3</b>
<b>1 Disjoncteurs haute tension</b>	<b>10</b>
1.1 Introduction . . . . .	10
1.1.1 Différents niveaux des tensions alternatives : . . . . .	10
1.1.2 Classification de L'appareillage électrique HT : . . . . .	11
1.2 Définition d'un disjoncteur HT : . . . . .	11
1.2.1 principe de fonctionnement d'un disjoncteur HT : . . . . .	11
1.2.2 Description générale d'un disjoncteur HT . . . . .	12
1.2.3 Classification des disjoncteurs HT : . . . . .	13
1.3 Disjoncteur $SF_6$ HT : . . . . .	17
1.3.1 Propriétés et caractéristiques du gaz $SF_6$ : . . . . .	17
1.4 $SF_6$ et l'environnement : . . . . .	22
1.4.1 Description du disjoncteur $SF_6$ : . . . . .	22
1.5 Fonctionnement d'un disjoncteur $SF_6$ HT . . . . .	28
1.6 Avantages des disjoncteurs $SF_6$ HT : . . . . .	28
1.7 Conclusion . . . . .	29
<b>2 Coupure des courants de courts-circuits</b>	<b>30</b>
2.1 Introduction . . . . .	30
2.2 Courants de courts-cercuits : . . . . .	30
2.2.1 Définition d'un court-circuit . . . . .	30
2.2.2 Types de court-circuit . . . . .	30
2.2.3 Caractéristique du courant de court-circuit . . . . .	33
2.2.4 Conséquences des courants de court-circuit . . . . .	34
2.3 Coupure des courants de courts-circuits . . . . .	34

2.3.1	Nature du courant électrique . . . . .	34
2.4	L'interruption des courants électriques . . . . .	35
2.4.1	Interruption d'un courant continu . . . . .	35
2.4.2	Interruption d'un courant alternatif . . . . .	37
2.5	Contraintes dues à l'interruption . . . . .	38
2.5.1	Conditions nécessaires pour réussir la coupure . . . . .	38
2.5.2	Coupure des courants en HT : . . . . .	39
2.5.3	Répartition de la coupure dans des chambres en série . . . . .	40
2.5.4	Endroit des défauts : . . . . .	40
2.6	Caractéristiques assignées des disjoncteurs HT : . . . . .	43
2.6.1	Importance de la constante de temps de désionisation . . . . .	47
2.7	conclusion . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Modèles d'arc à boîte noire</b>	<b>49</b>
3.1	Introduction . . . . .	49
3.2	Aperçu sur la modélisation d'arc électrique . . . . .	49
3.3	Représentation des modèles d'arc à boîte noire . . . . .	50
3.4	Les modèles de base . . . . .	50
3.4.1	Le modèle de Mayr . . . . .	50
3.4.2	Le modèle de Cassie . . . . .	52
3.4.3	Comparaison des deux modèles . . . . .	53
3.5	Les modèles d'arc améliorés . . . . .	53
3.5.1	Le modèle de Mayr modifié . . . . .	54
3.5.2	Le modèle e de Habedank . . . . .	54
3.5.3	Le modèle de Schwarz . . . . .	55
3.5.4	Le modèle de KEMA . . . . .	56
3.5.5	Le modèle de Schavemaker . . . . .	58
3.5.6	Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts . . . . .	58
3.6	Conclusion . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne en utilisant le modèle de Mayr modifié</b>	<b>60</b>
4.1	Conception d'un " interrupteur " dans le Simulink de Matlab, en se basant sur les équations du modèle de Mayr modifié . . . . .	61
4.1.1	Description du modèle de Mayr modifié . . . . .	61
4.2	Implantation du modèle de Mayr modifié dans le Simulink de MATLAB . . . . .	61
4.3	Dimensionnement du circuit d'essai . . . . .	64

## TABLE DES MATIÈRES

---

4.4	Simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne en utilisant le modèle de Mayr modifié . . . . .	67
4.5	Résultats de simulation . . . . .	68
4.6	Conclusion . . . . .	71

## TABLE DES FIGURES

1.1	Parties principales d'un disjoncteur HT. . . . .	12
1.2	- Disjoncteurs 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz. . . . .	14
1.3	disjoncteur a l'huile . . . . .	15
1.4	Principe des disjoncteurs auto-pneumatiques. . . . .	17
1.5	Courbe de conductivité thermique du $SF_6$ en fonction de la température . . . . .	18
1.6	: Constantes de temps de déionisation en fonction de la pression pour différents gaz .	19
1.7	Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de $SF_6$ . . . . .	20
1.8	Courbes de pression et de densité du gaz $SF_6$ en fonction de la tomprature . . . .	21
1.9	Rigidité diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes . . . . .	22
1.10	Disjoncteur $SF_6$ HT 3AP1 FI90kV . . . . .	23
1.11	vue en coupe d'une colonne polaire . . . . .	24
1.12	Vue en coupe d'une Chambre de coupure du disjoncteur 3AP1 FI90kV. . . . .	25
1.13	Schéma fonctionnel de la commande à accumulation d'énergie par ressorts . . . . .	27
I.1	Court-circuit monophasé . . . . .	31
I.2	Court-circuit biphasé . . . . .	31
I.3	Court-circuit biphasé terre . . . . .	32
I.4	Court-circuit triphasé isolé. . . . .	32
I.5	Court-circuit triphasé terre. . . . .	32
2.1	Circuit LR en courant continu. . . . .	35
2.2	Variation des paramètres $I_r$ en fonction de temps. . . . .	36
2.3	Circuit R L en courant alternatif . . . . .	37
2.4	Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit . . . . .	39
2.5	présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en un point éloigné d'un alternateur. . . . .	41



TABLE DES FIGURES

---

2.6	Circuit avec un défaut aux bornes triphasé à la terre . . . . .	42
2.7	les formes d'onde TRV à travers la borne du disjoncteur et le côté ligne. . . . .	43
2.8	tension transitoire de rétablissement . . . . .	45
2.9	Caractéristiques de l'intensité et de la TTR lors d'une phase d'ouverture des contacts	46
2.10	Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz	47
2.11	L'évolution et la durée de l'arc dans la phase ouverture du disjoncteur. . . . .	48
3.1	Caractéristique statique d'un arc de forte puissance. . . . .	52
3.2	Le modèle de Habedank . . . . .	54
3.3	Le modèle de KEMA . . . . .	56
3.4	: Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés . . . . .	58
4.1	Système d'équation du modèle de Mayr Modifié dans Matlab/Simulink . . . . .	62
4.2	le sous système du système d'équation du modèle de Mayr Modifié dans le simulink de Matlab. . . . .	63
4.3	Le bloc du modèle de Mayr Modifié. . . . .	63
4.4	Le modèle de Mayr Modifié dans le Simulink/Matlab. . . . .	64
4.5	Tension et courant d'arc pour une interruption réussie de $21.2 kA_{eff}$ [37]. . . . .	64
4.6	Modèle de Mayr Modifié inséré dans le circuit d'essai. . . . .	65
4.7	La branche RCL . . . . .	67
4.8	Boite de dialogue du modèle Mayr Modifié. . . . .	68
4.9	Tension simulée en utilisant le modèle de Mayr Modifié en fonction du temps . . .	68
4.10	Courant simulé en utilisant le modèle de Mayr Modifié en fonction du temps . . . .	69
4.11	Tension d'arc en fonction du temps . . . . .	69
4.12	Courant post arc . . . . .	70
4.13	Tension transitoire de rétablissement (TTR) en fonction du temps. . . . .	71

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie électrique est transportée via des réseaux électriques qui deviennent de plus en plus complexes du fait de l'augmentation continue de la demande d'énergie électrique. La sécurité de ces réseaux électriques est assurée principalement par les disjoncteurs à haute tension qui doivent interrompre les courants de défaut et isoler les parties défectueuses rapidement et efficacement. Les techniques de coupures dans l'air et dans l'huile qui jouaient un rôle considérable en MT et HT sont aujourd'hui considérées des techniques du passé et les deux grandes techniques de coupure actuelles sont le  $SF_6$  et le vide. Dans le domaine de la haute tension la technique de coupure dans le  $SF_6$  est largement utilisée.

Les phénomènes physiques qui ont lieu lors de la coupure des courants de défaut sont très compliqués et particulièrement dans le cas du défaut proche en ligne et du défaut aux bornes. Des essais dans un laboratoire à haute puissance sont indispensables pour s'assurer que le disjoncteur HT est capable d'interrompre ces défauts. Cependant ces essais sont très coûteux et prennent beaucoup de temps. Les modèles d'arc à boîte noire décrivent le comportement dynamique de l'arc électrique à l'intérieur du disjoncteur HT, durant le processus de la coupure, ils permettent de faciliter la compréhension des phénomènes de coupures et aussi d'étendre les informations obtenues durant les essais.

Dans ce travail on va faire la simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne en utilisant le modèle de Mayr modifié. Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres : Le premier est consacré aux disjoncteurs  $SF_6$  HT, où on a d'abord donné une idée générale sur les disjoncteurs HT et on a poursuivi par une idée précise sur la constitution, la description et le fonctionnement du disjoncteur  $SF_6$  haute tension.

Le deuxième est réservé aux phénomènes de coupure d'un courant alternatif. Dans le troisième, on a cités les différents modèles d'arc électrique à boîte noire utilisés pour modéliser le comportement dynamique de l'arc et étudier l'interaction arc-circuit.

Enfin le dernier chapitre est consacré la simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne en utilisant le modèle de Mayr modifié.

# CHAPITRE 1

## DISJONCTEURS HAUTE TENSION

### 1.1 Introduction

Le disjoncteur est le moyen le plus efficace pour assurer la protection des personnes, des biens et des installations du réseau, grâce à sa souplesse pour éliminer les courants de défauts. Dans les réseaux à haute tension le disjoncteur est le dispositif de protection ultime. Ce chapitre est dédié aux disjoncteurs  $SF_6$  haute tension (HT). Dans ce cadre, on va commencer par donner les différents niveaux des tensions alternatives et la classification de l'appareillage électrique HT puis on va étudier le disjoncteur HT et plus particulièrement le disjoncteur  $SF_6$  HT.

#### 1.1.1 Différents niveaux des tensions alternatives :

Les différents niveaux des tensions sont déterminés suivant les deux normes à savoir la NFC18-510 et la CEI38 [1]. La nouvelle norme en vigueur en France NFC18-510 définit les niveaux des tensions alternatives comme suit :

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV,
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV,
- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV,
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50V et 500 V,
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V, Les notations de la norme CEI38 (Commission électrotechnique internationale) seront utilisées dans ce mémoire avec les définitions suivantes :

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

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

- MT : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 35 kV, Les valeurs normalisées sont : 3,3kV - 6,6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV.

- BT : pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V, Les valeurs normalisées sont : 400V - 690V - 1000 V (à 50Hz).

Et nous dans notre étude on va s'intéresser à la haute tension.

### **La haute tension :**

La haute tension est un terme qui caractérise, selon des normes européennes, les valeurs de la tension électrique supérieures à 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu [1].

### **1.1.2 Classification de L'appareillage électrique HT :**

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

- Sa fonction ; protection, sectionnement.
- sa tension ; niveau de tension d'utilisation.
- Sa destination ; fonctionner dans des réseaux de répartitions, distribution.
- Son installation ; intérieure ou extérieure.
- Le type de matériel ; matériel ouvert, sous enveloppe métallique, blindé ou hybride.
- La température de service ; normale, maximale, minimale.
- Son utilisation ; selon sa fonction.
- Sa technique de coupure ; air, l'huile,  $SF_6$  [2].

## **1.2 Définition d'un disjoncteur HT :**

Les disjoncteurs haute tension sont conçus pour transmettre et couper un courant. Ils servent à la fois :

- Pour connecter ou déconnecter des lignes dans le réseau électrique, par exemple, dans des conditions de fonctionnement normales
- Pour éliminer les courts-circuits du réseau causés par la foudre ou d'autres causes.

Les disjoncteurs sont une protection importante des réseaux à haute tension car, de par leur nature, ils sont les seuls à pouvoir couper les courants de court-circuit et éviter que les équipements connectés au réseau ne soient endommagés par ce courant de Court-circuit.

### **1.2.1 principe de fonctionnement d'un disjoncteur HT :**

La coupure de courant par des disjoncteurs haute tension est obtenue en séparant les contacts dans le gaz (air,  $SF_6$ ) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Une fois les contacts séparés, le courant continue de circuler dans le circuit à travers l'arc établi entre les contacts du disjoncteur. Le principe de coupure utilisé est de couper le courant lorsqu'il passe par zéro (cela se produit toutes les dix millisecondes dans le cas d'un courant alternatif 50 Hz). En effet, c'est à cet instant que la puissance qui est fournie à l'arc par le réseau est minimale (cette puissance fournie

est même nulle à l'instant où la valeur instantanée du courant est nulle), on peut donc espérer, moyennant un soufflage suffisant, mettre à profit cet intervalle de temps pendant lequel le courant est de faible intensité pour refroidir suffisamment l'arc afin que sa température diminue et que l'espace entre les contacts redevienne isolant.

### 1.2.2 Description générale d'un disjoncteur HT

Un disjoncteur à haute tension est composé de trois parties principales Figure(1.1) :

1. Partie électrique active.
2. Partie commande.
3. Partie Contrôle [9].

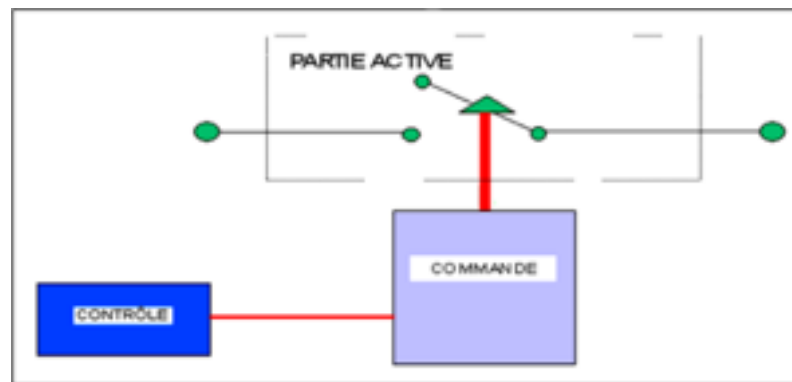


FIGURE 1.1 – Parties principales d'un disjoncteur HT.

●**Partie active :**

C'est la partie du circuit principal qui établit ou interrompt le courant. Elle est constituée d'une enceinte fermée contenant un contact fixe et un autre contact mobile dans un milieu liquide ou gazeux appelé milieu de coupure, le courant est établi ou interrompu par mise en contact de ces deux contacts ou par leur séparation. Pour un disjoncteur triphasé, chaque phase comporte au moins une partie active. Pour des niveaux de tension nominale élevés, cette partie active peut être constituée de plusieurs chambres identiques connectées en série et commandées simultanément pour établir un seul contact électrique, dans ce cas un condensateur dit de distribution est connecté en parallèle sur chaque chambre. Il est utilisé pour la répartition de la tension afin de réduire l'usure excessive des contacts [6].

●**Partie commande :**

C'est la partie qui génère l'énergie nécessaire pour déplacer les contacts mobiles et effectuer des actions mécaniques lors de l'ouverture et de la fermeture.

La commande comprend un dispositif de stockage d'énergie appelé accumulateur, dont le rôle est

d'accumuler l'énergie nécessaire à l'ouverture ou à la fermeture et de la maintenir prête en cas de besoin. Trois types de commandes sont populaires dans le domaine du disjoncteur haut tension :

- Commande pneumatique.
- Commande hydraulique.
- Commande à ressorts mécaniques [6].

### ●Partie Contrôle :

C'est la partie qui initie la commande de fonctionnement à partir d'une impulsion électrique de durée de fraction de seconde sur une bobine du mécanisme de commande. L'ouverture ou la fermeture s'effectue en libérant l'énergie nécessaire préalablement stockée dans l'accumulateur ,ce qui amplifie cet ordre en une opération de la disjonction [6].

### 1.2.3 Classification des disjoncteurs HT :

#### 1 -Selon la destination

L'appareillage à haute tension est destiné à fonctionner dans trois types de réseaux ou d'installations :

- Réseaux de répartition ou de transport (  $\geq 52$  kV ) .
- Réseaux de distribution (  $\leq 52$  kV ) .
- Installations industrielles (3,6 à 24 kV) [4] .

#### 2- Selon l'installation :

Selon sa possibilité d'installation, on distingue :

- a .Pour l'intérieur :** qui est destiné à être installé uniquement à l'intérieur d'un bâtiment, à l'abri des intempéries et de la pollution, avec une température ambiante qui n'est pas inférieure à  $- 5$  °C (éventuellement  $- 15$  °C ou  $- 25$  °C).
- b .Pour l'extérieur :** qui est prévu pour être installé à l'extérieur des bâtiments, et qui par suite doit être capable de fonctionner dans des conditions climatiques et atmosphériques contraignantes.

#### 3 -Selon le type de matériel

Deux types de matériels sont distingués :

- a .Les disjoncteurs ouverts dont l'isolation externe est faite dans l'air.**

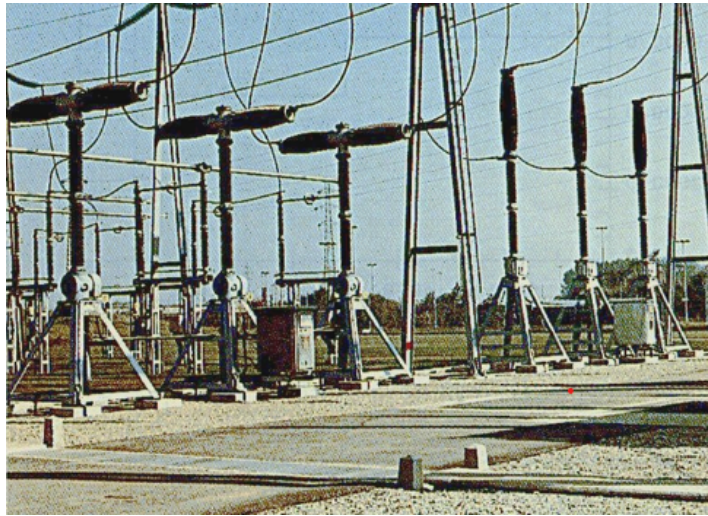


FIGURE 1.2 – - Disjoncteurs 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz.

**b .Disjoncteurs sous enveloppe métallique ou blindés :**

Livré avec un boîtier métallique, mis à la terre pour éviter tout contact et accident avec d'autres éléments sous tension. Le disjoncteur fait partie de la partie isolée au  $SF_6$ , Il s'agit notamment des différents composants nécessaires au fonctionnement du poste : disjoncteurs, jeux de barres, sectionneur de jeu de barres, sectionneur de terre, transformateur de courant, mis dans un boîtier métallique [4].

**c .Disjoncteurs hybrides :**

Dits " **Dead Tank** ", dont l'isolation des parties actives est faite dans le  $SF_6$  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 [4].

**4 -Selon le milieu de coupure :**

**a .Disjoncteur à l'huile**

Après avoir été développée en moyenne tension, la coupure dans l'huile s'est imposée en haute tension. Sous l'action de l'arc électrique, l'huile est décomposée, plusieurs types de gaz sont produits (essentiellement de l'hydrogène et de l'acétylène) lors de cette décomposition. L'énergie de l'arc est utilisée pour décomposer et évaporer l'huile, ceci permet de refroidir le milieu entre les contacts et par suite d'interrompre le courant à son passage par zéro [5].

**•Inconvénients :**

Ces disjoncteurs avaient pour principaux inconvénients de nécessiter de nombreux éléments de coupure en série (pour tenir la tension), et de nécessiter un entretien important et délicat (remplacement de l'huile usagée). Ils ont été supplantés par les disjoncteurs à  $SF_6$  qui

nécessitent peu de maintenance et ont une longue durée de vie [5].

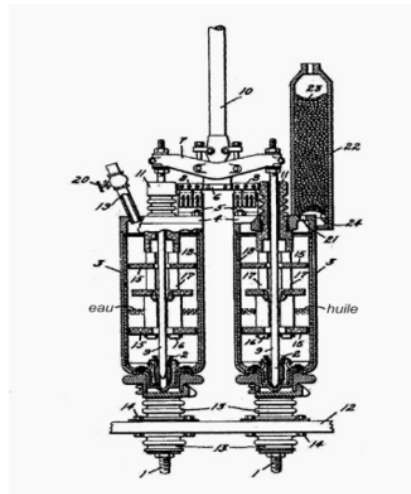


FIGURE 1.3 – disjoncteur a l’huile .

**b .Disjoncteur à air comprimé**

Le gaz contenu dans les disjoncteurs à air comprimé est maintenu sous haute pression (20 à 35 bars) à l’aide d’un compresseur. Cette haute pression permet d’assurer la tenue diélectrique et de provoquer le soufflage de l’arc pour la coupure. Le soufflage intense exercé dans ces disjoncteurs a permis d’obtenir de très hautes performances (courant coupé jusqu’à 100 kA sous haute tension) et avec une durée d’élimination du défaut très courte permettant d’assurer une bonne stabilité des réseaux en cas de défaut. La technique à air comprimé est la seule qui permette encore aujourd’hui d’atteindre les pouvoirs de coupure les plus élevés (275 kA sous 36 kV) qui sont exigés pour les disjoncteurs de générateurs [5].

• **Inconvénients :**

Un défaut des disjoncteurs à air comprimé est leur bruit très important à l’ouverture. De plus, ils nécessitent un entretien périodique, en particulier de leurs compresseurs, ceci explique qu’ils ont été progressivement supplantés par une autre génération de disjoncteurs, celle des disjoncteurs à  $SF_6$  (ou hexafluorure de soufre) [5].

**c .Disjoncteurs avec ampoules à vide**

Les premières applications industrielles ont été réalisées à la fin des années 1950 lorsque les difficultés technologiques de mise en œuvre furent résolues, notamment la garantie d’un vide poussé pendant au moins vingt ans, ce qui nécessite une étanchéité parfaite de l’ampoule [5].

• **Inconvénients**

Actuellement des disjoncteurs intégrant des ampoules à vide sont en service jusqu’à 84 kV, au Japon, le pouvoir de coupure d’un disjoncteur à vide peut atteindre 63 kA [5].

**d .Disjoncteur à gaz  $SF_6$  (Hexafluorure de soufre)**



**• Historique**

L'utilisation du  $SF_6$  pour l'isolation a été brevetée aux États-Unis par Franklin Cooper de General Electric en 1938, et son utilisation pour l'interruption d'un courant a été revendiquée aussi en 1938 dans un brevet allemand par Vitaly Grosse de AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft). La première application industrielle du  $SF_6$  pour la coupure date de 1953, elle a été faite par Westing house pour des interrupteurs en charge à haute tension 15 kV à 161 kV avec un pouvoir de coupure de 600 A. La première réalisation d'un disjoncteur  $SF_6$  HT a été faite en 1956 par Westing house mais le pouvoir de coupure était alors limité à 5 kA sous 115 kV (1000 MVA) et cet appareil devait avoir de nombreux éléments de coupure en série par pôle pour assurer les performances (six chambres de coupure en série) [7].

**• Disjoncteur auto-pneumatique :**

Le principe du soufflage auto-pneumatique s'est développé au cours des années 1970 et au début des années 1980 pour répondre aux spécifications les plus exigeantes et développer des appareils de plus en plus performants. Lorsque le disjoncteur est en position "fermé", le courant transite par des contacts dits "permanents" qui sont situés sur le diamètre extérieur de la partie active. Lors d'un déclenchement du disjoncteur, la partie mobile se déplace vers le bas, entraînant la séparation des contacts permanents. Le courant passe alors par une autre série de contacts, appelés "contacts d'arc". Quand la partie mobile a fait une course suffisante, les contacts d'arc se séparent, ce qui provoque l'amorçage d'un arc entre ces contacts. Les contacts d'arc sont réalisés avec des matériaux à base de tungstène de manière à pouvoir supporter sans dommage les effets de l'arc électrique. Pendant la manœuvre d'ouverture, le disjoncteur produit lui-même la compression du gaz nécessaire au soufflage de l'arc. Le déplacement relatif du cylindre de soufflage par rapport au piston fixe crée une surpression dans le cylindre qui s'évacue à l'intérieur de la buse et refroidit l'arc, permettant ainsi son extinction [7].

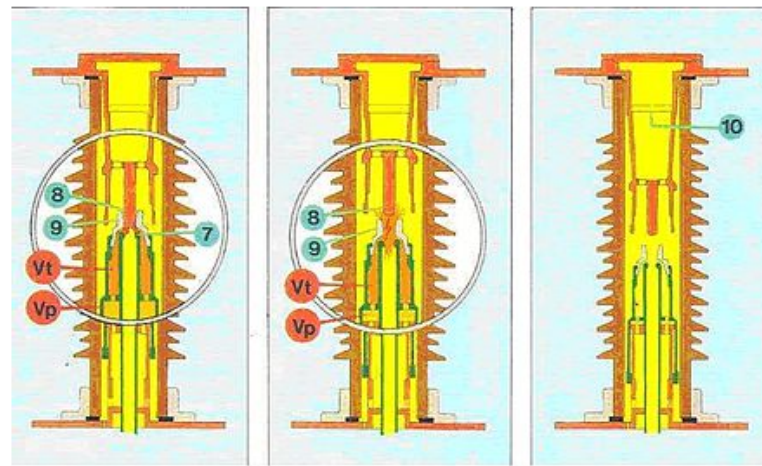


FIGURE 1.4 – Principe des disjoncteurs auto-pneumatiques.

### 1.3 Disjoncteur $SF_6$ HT :

Les raisons qui favorisent le disjoncteur  $SF_6$  à haute tension sont les propriétés remarquables, extinctrices de l'arc, du gaz  $SF_6$  et les caractéristiques techniques de ce disjoncteur.

#### 1.3.1 Propriétés et caractéristiques du gaz $SF_6$ :

L'évolution des réseaux de transport et des réseaux industriels expose les disjoncteurs HT à des conditions de fonctionnement difficiles [11].

L'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) est un gaz prisé pour ses nombreuses propriétés chimiques et diélectriques. Cette technologie de coupure a été développée dans les années 1970 et elle apporte également beaucoup d'avantages :

- sécurité
- Taille
- Entretien et longue durée de vie [11].

#### a .Propriétés chimiques :

Le  $SF_6$  à l'état pur est un gaz non polluant, incolore, inodore, ininflammable, non toxique, il est Insoluble Dans l'eau. Il est chimiquement inerte : ses molécules possèdent toutes les liaisons chimiques saturées et une énergie de dissociation élevée (+ 1 096 kJ/mol), ainsi qu'une forte capacité à dissiper la chaleur produite par l'arc . Pendant la période d'arc, le  $SF_6$  se décompose à des températures allant jusqu'à 15 000 à 20 000 K. Cette dissociation est quasi réversible : lorsque le courant est réduit, la température est abaissée, les ions et électrons se recombinent, reconstituant la molécule  $SF_6$  [8].

**b .Propriété de conductivité thermique :**

La conductivité thermique du  $SF_6$  est comparable à celle de l'air, mais une étude de la courbe de conductivité thermique du  $SF_6$  à haute température montre un pic à la température de dissociation du  $SF_6$  (naissance du plasma) [8].

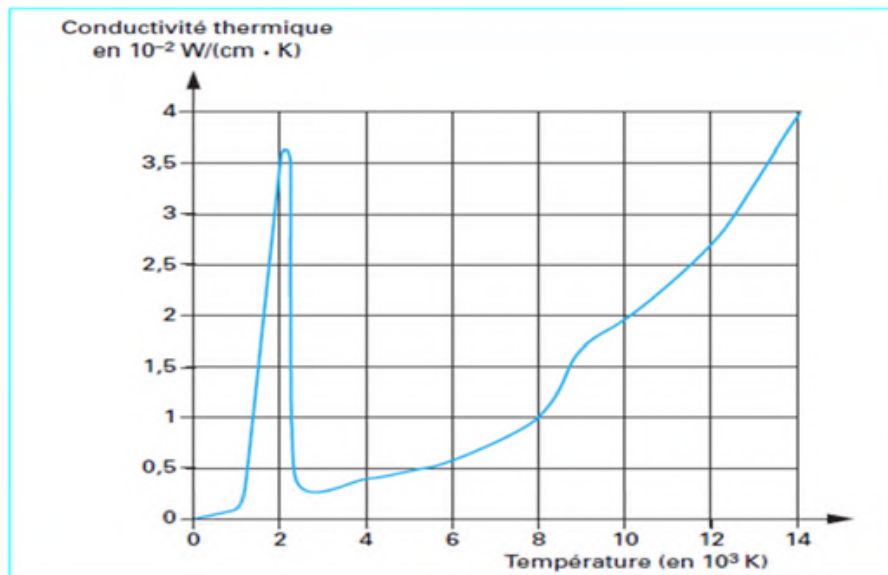


FIGURE 1.5 – Courbe de conductivité thermique du  $SF_6$  en fonction de la température .

**c .Propriétés diélectriques**

Le  $SF_6$  a une rigidité diélectrique très élevée, grâce aux propriétés très électronégative du fluor :

- La durée de vie de ses électrons libres est encore très faible, ils se combinent aux molécules de  $SF_6$  pour former des ions lourds peu mobiles ;
- La probabilité de claquage diélectrique par avalanche est ainsi retardée ;
- Il confère à son milieu une constante de temps de déionisation extrêmement faible de l'ordre de  $0,25 \mu s$  par rapport aux autres milieux utilisés (Figure 1.5).
- La " grande " dimension de sa molécule lui permet de ralentir les électrons par collision.
- À la pression atmosphérique, la rigidité diélectrique du  $SF_6$  est 2,4 fois supérieure à celle de l'air [8].

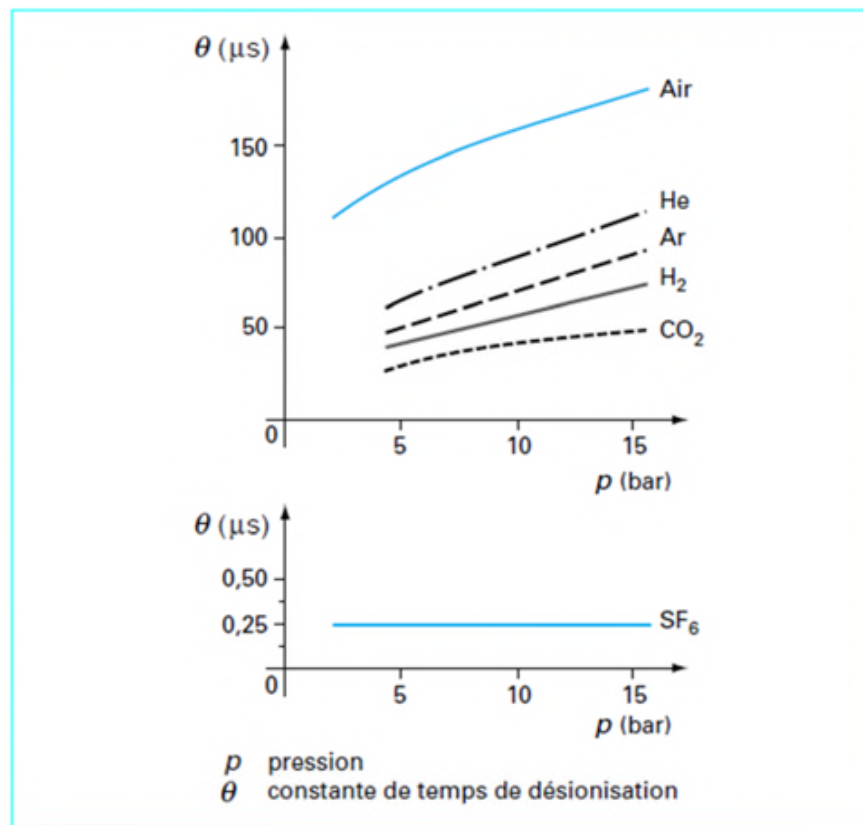


FIGURE 1.6 – : Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz .

**d .Propriété de la conductivité électrique :**

Suivant des études thermiques sur le gaz  $\text{SF}_6$  à une température très élevée (proche de  $2000^\circ\text{C}$ ), il y aura naissance d'un plasma de forme cylindrique où le  $\text{SF}_6$  est dissocié , le noyau du plasma présente un milieu de bonne conductivité électrique.

Donc à très haute température le  $\text{SF}_6$  est conducteur électrique [3].

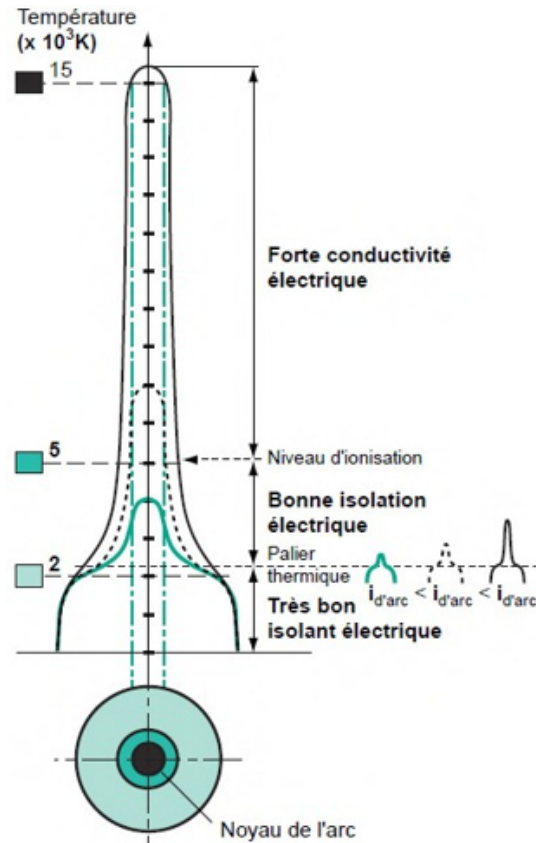


FIGURE 1.7 – Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de  $SF_6$ .

**e .Caractéristiques pression-température :**

- Le changement de pression avec la température est linéaire.
- Relativement faible dans la plage de température de fonctionnement (-25 à +50°C).
- Une température élevée correspond à une forte augmentation de la pression [11].

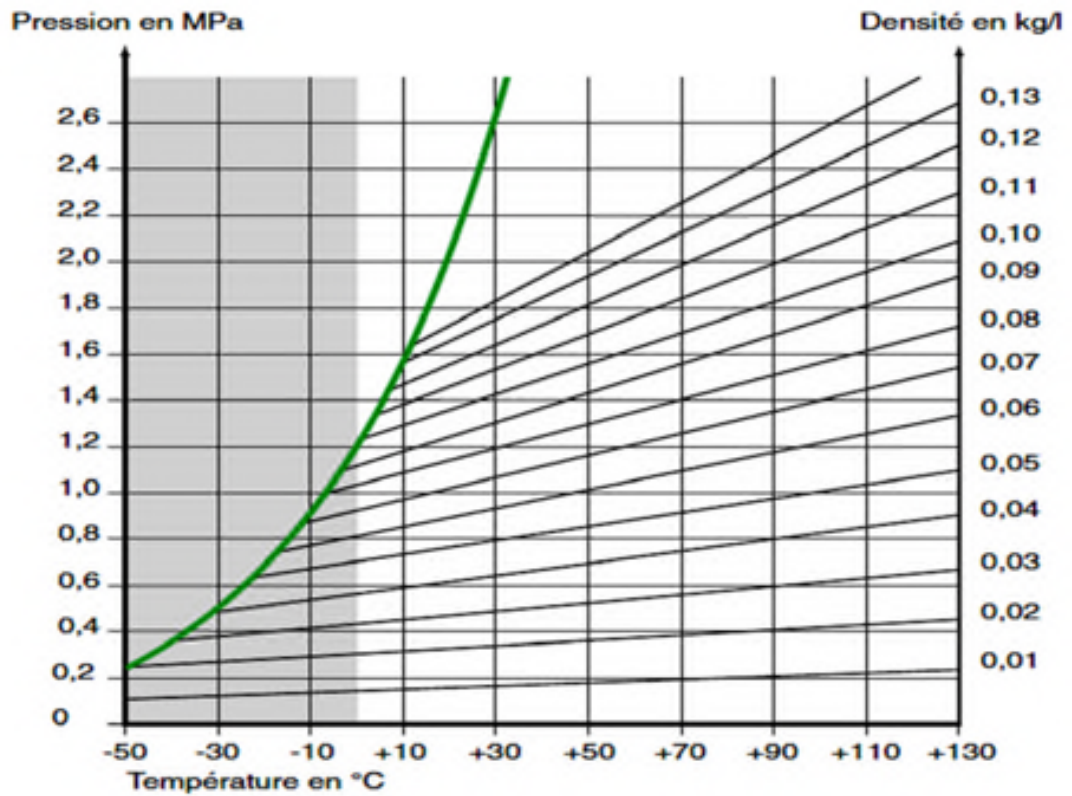


FIGURE 1.8 – Courbes de pression et de densité du gaz  $SF_6$  en fonction de la température .

**f .Caractéristique diélectrique-pression :**

La rigidité diélectrique du  $SF_6$  est de 2 à 3 fois celle de l'air sous la même pression, ce qui est dû à la forte capacité du  $SF_6$  à capturer des électrons libres pour former des ions lourds à faible mobilité, qui peuvent être ralentis par collision. Il reste peu d'électrons libres dans le gaz, ce qui les empêche d'accélérer trop rapidement sous l'influence du champ électrique, retardant la formation des électrons germes de décharge.

En comparant le changement de rigidité à (1bar) et (5bar), la rigidité diélectrique du  $SF_6$  augmente avec l'augmentation de la pression.

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

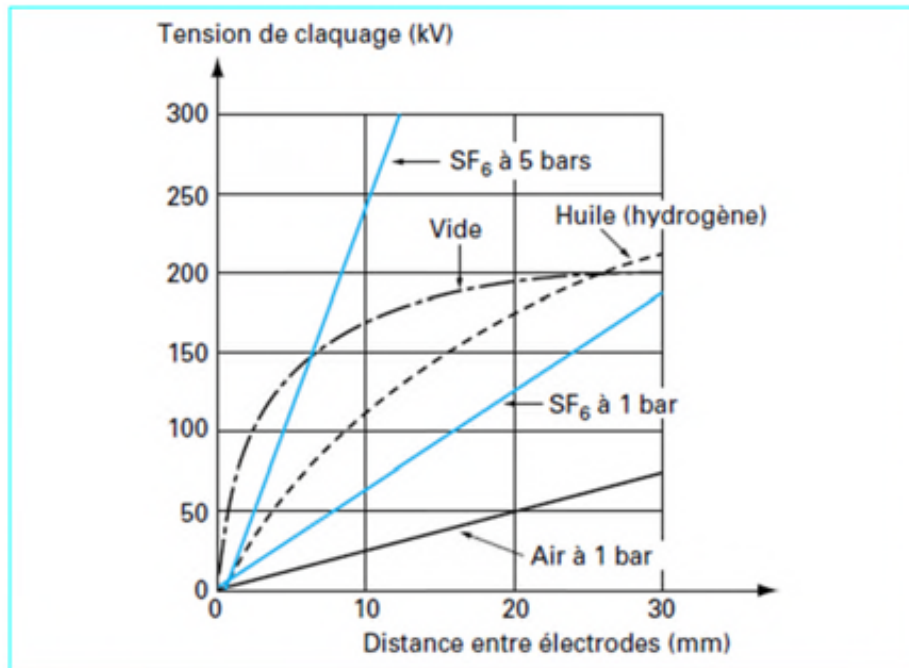


FIGURE 1.9 – Rigidity diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes .

## 1.4 SF<sub>6</sub> et l'environnement :

Le SF<sub>6</sub> ne contribue pas de manière significative à l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique car il ne contient pas de chlore, qui est l'espèce principale pour la catalyse de l'ozone, et ne contribue pas non plus à l'effet de serre en raison de très faibles niveaux dans l'atmosphère [9].

### 1.4.1 Description du disjoncteur SF<sub>6</sub> :

La figure (1.10) représente un disjoncteur SF<sub>6</sub> HT de modèle 3AP1 FI c'est est un disjoncteur autonome tripolaire pour installation en extérieur. Le SF<sub>6</sub> est un gaz utilisé pour l'extinction de l'arc. Il est constitué des éléments suivants :

1. châssis,
  2. Coffret d'appareillage,
  3. coffret de commande,
  4. indication de position de commutation ,
  5. support isolant ,
  6. élément de coupure ,
  7. goulotte,
- (A, B, C) colonnes polaires [12].

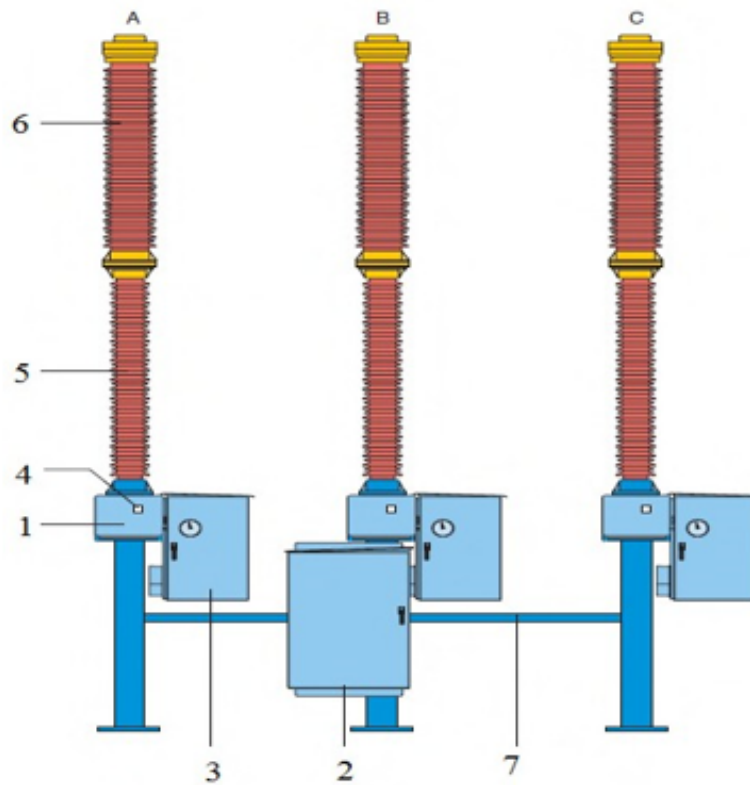


FIGURE 1.10 – Disjoncteur  $SF_6$  HT 3AP1 FI90kV .

●**Colonnes polaires :**

Les colonnes polaires du disjoncteur sont identiques. La figure(1.11) représente une colonne polaire en coupe.

La chambre de coupure (8) est disposée sur une potence (5) qui l'isole du sol. Chaque pôle est rempli de gaz  $SF_6$  et équipé d'une densité et d'une pression de gaz contrôlées par un contrôleur [12].



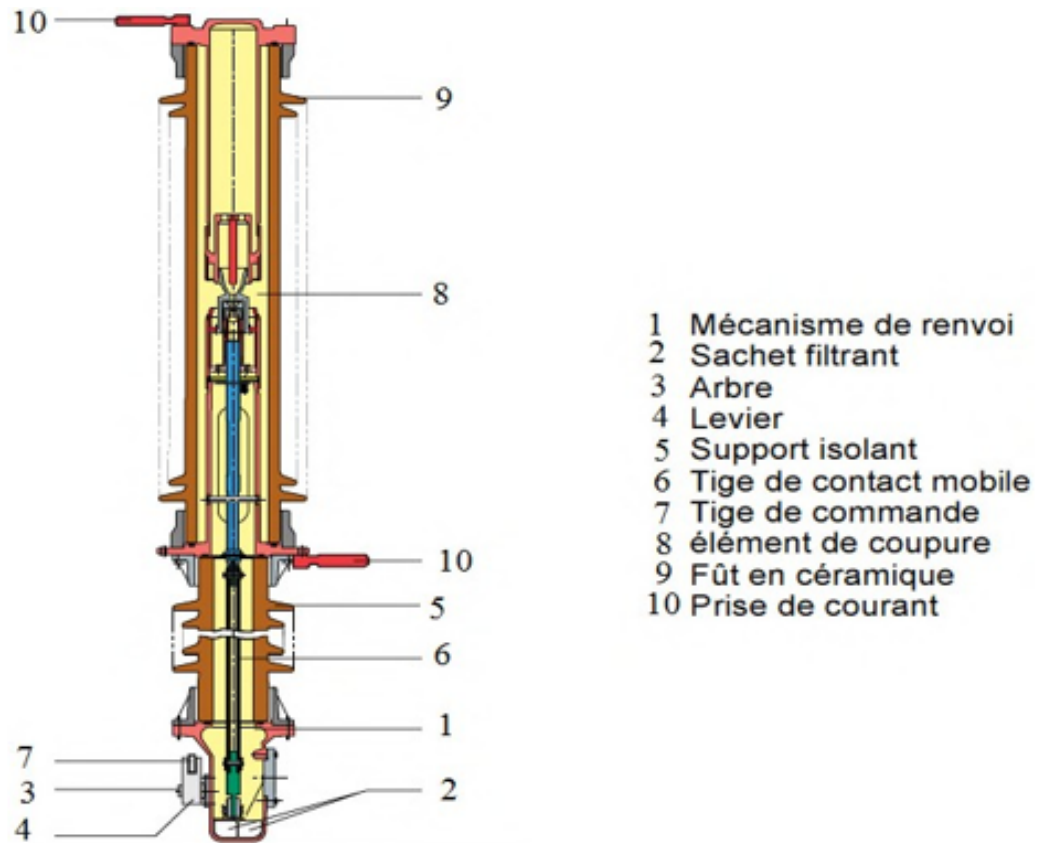


FIGURE 1.11 – vue en coupe d'une colonne polaire

●Chambre de coupure :

La chambre de coupure est située à l'intérieur de chaque pôle du disjoncteur triphasé, et elle a pour fonction d'interrompre le passage du courant ou de rétablir le courant (ouverture ou fermeture du circuit). Elle se compose principalement de deux éléments qui garantissent que les contacts du disjoncteur soient connectés ou déconnectés sous l'influence des forces mécaniques et pneumatiques, qui sont créées en insufflant du gaz dans la buse en raison des propriétés thermiques du gaz  $SF_6$  [12].

Le circuit principal est constitué d'une prise de courant supérieure (1), d'un porte-contacts (2), de doigts de contact (3) disposés en couronne dans le porte-contacts, d'un cylindre chauffant (4), d'un socle (5) et d'une partie inférieure .douille (1).

Les pièces de contact (3) ont des ressorts hélicoïdaux à leurs extrémités, qui les poussent vers l'intérieur pour générer la pression de contact nécessaire sur la cartouche chauffante (4) et le support de contact (2), respectivement. Le circuit principal est doublé en parallèle par le circuit d'arc formé par les broches (6). Un contact tubulaire mobile (7) fixé au support de contact (2) et agencé à l'intérieur de la cartouche chauffante (4). La broche (6) et le contact tubulaire mobile (7) sont réalisés avec un matériau à haute résistance à l'arc. Le contact tubulaire (7), le piston (8) et le

Le cylindre chauffant (4) est mécaniquement intégré; il est attelé au tube de manœuvre (9) pour former l'équipage mobile de l'élément de coupure. Le piston (8) avec la plaque de clapet anti-retour (10) forme, en combinaison avec le fond à soupape de sûreté (11), le dispositif de compression pour l'extinction de l'arc. La chambre de coupure est remplie par le gaz  $SF_6$  qui joue le rôle du milieu extincteur, en s'appuyant sur ses propriétés extinctrices [12].

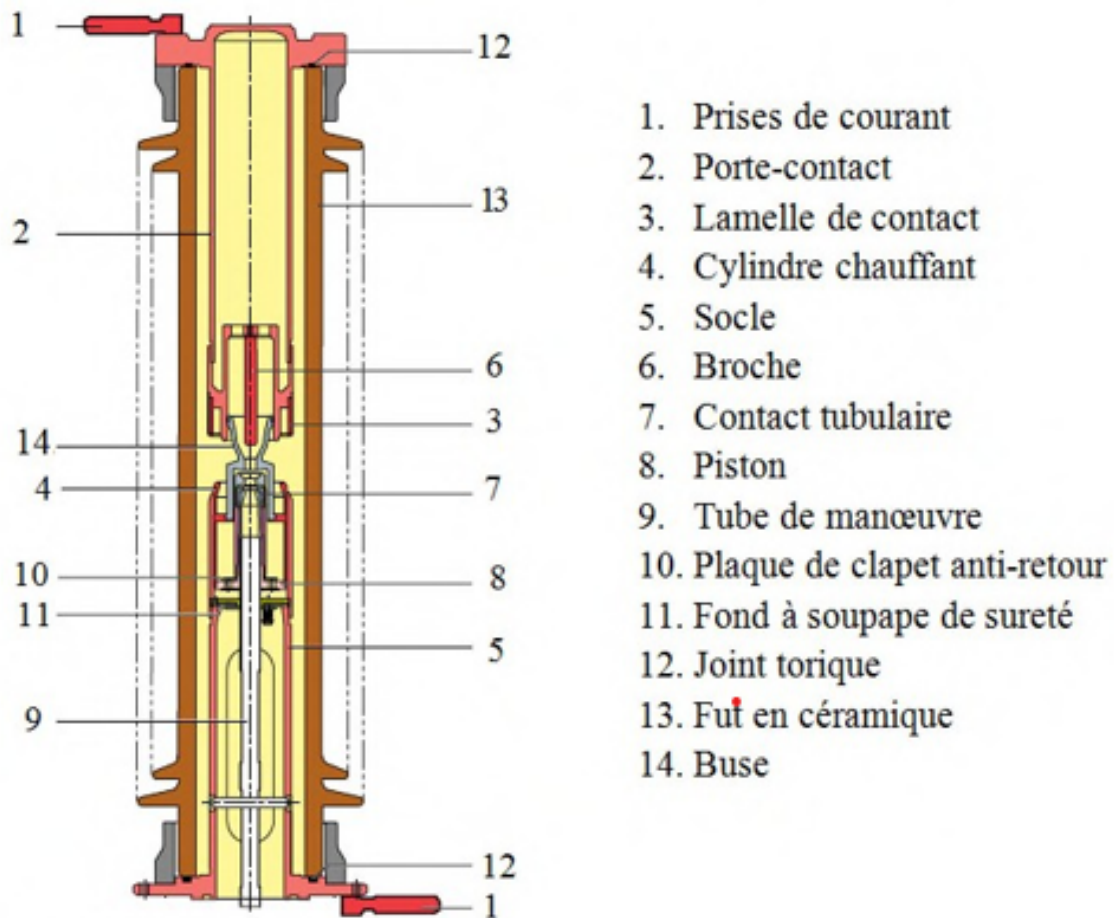


FIGURE 1.12 – Vue en coupe d'une Chambre de coupure du disjoncteur 3AP1 FI90kV.

### 1. Coffret d'organe de manœuvre

Le disjoncteur est actionné par l'appareil de commande ou une "commande" fournit l'énergie nécessaire pour effectuer une opération d'ouverture et de fermeture ou un cycle d'opérations, comme la fermeture-ouverture ou une séquence d'opérations spécifiée. Ce coffret contient les moyens de commander et de manœuvrer le disjoncteur manuellement ou automatiquement, à l'aide du levier

de commande et de l'énergie potentielle nécessaire au mécanisme, pour manœuvrer le contact d'un pôle, cette énergie est accumulée dans les ressorts de fermeture et d'ouverture [12].

### **2. Coffret d'appareillage**

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

### **3. Câbles de liaison**

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

### **4. Organe de commande**

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

- En coupure ou fermeture de courants de court-circuit ;
- A 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.
  - Une faible perte d'énergie interne.
  - Un nombre réduit de composants.
  - Un fonctionnement plus souple, avec un impact réduit sur la structure du disjoncteur [12].

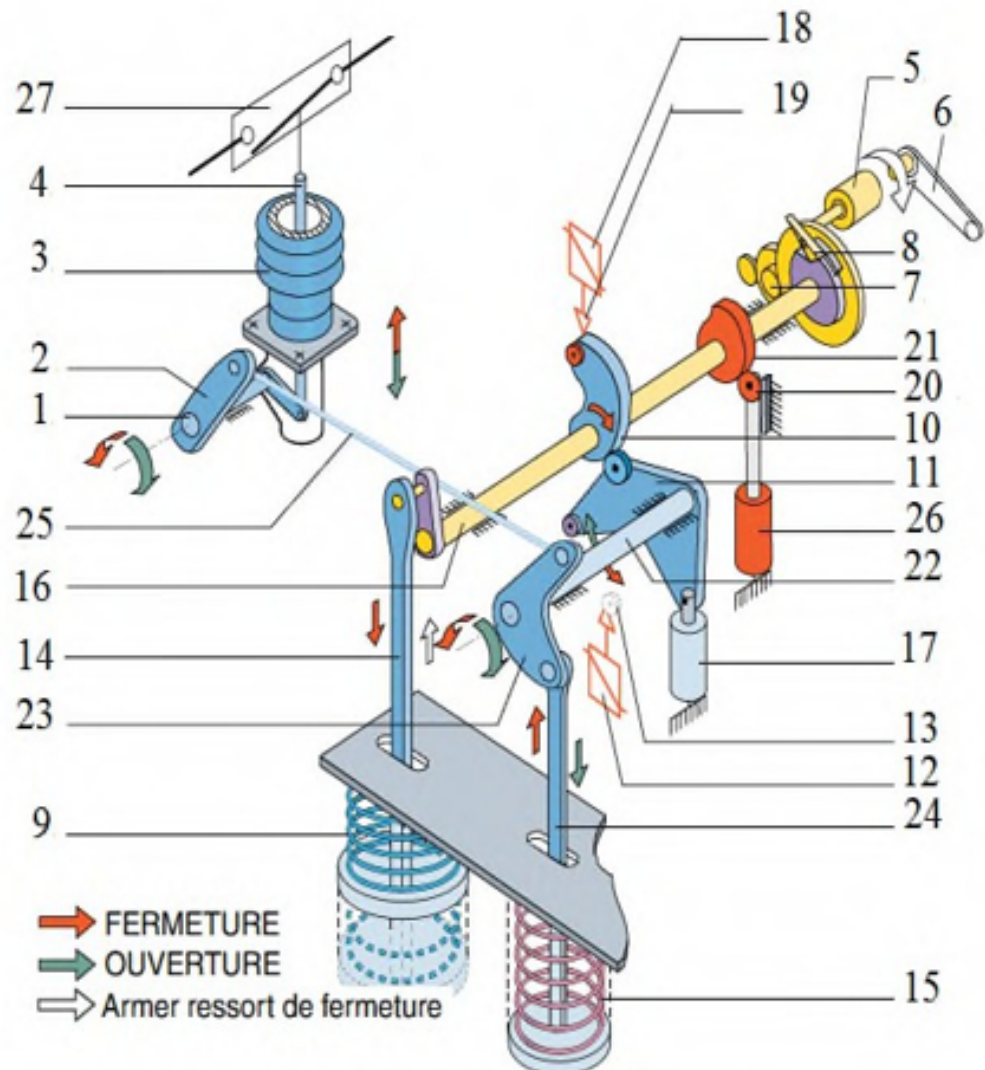


FIGURE 1.13 – Schéma fonctionnel de la commande à accumulation d'énergie par ressorts .

- 1.arbre
- 2.levier
- 3.support isolant
- 4.tige de contact mobile
- 5.moteur
- 6.armement manuel
- 7.réducteur d'armement
- 8.cliquet d'entraînement (roue libre)
- 9.ressort de fermeture
- 10.came
- 11.levier oscillant

- 12.declencheur d'ouverture
- 13.encliquetage d'ouverture
- 14.bielle(ressort de fermeture)
- 15.ressort d'ouverture
- 16.arbre d'armement
- 17.amortisseur en position d'ouverture
- 18.déclencheur de fermeture
- 19.encliquetage de fermeture
- 20.cliquet antiretour
- 21.came
- 22.arbre de manœuvre
- 23.levier de manœuvre
- 24.bielle(ressort d'ouverture)
- 25.tige de commande
- 26.amortisseur en position de fermeture
- 27.élément de coupure

### 1.5 Fonctionnement d'un disjoncteur $SF_6$ HT

Le disjoncteur HT fonctionne automatiquement, suite à la présence d'un court-circuit dans le réseau électrique, ce dernier sera détecté par la protection située dans le coffret d'appareillage et qui 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 manœuvre le disjoncteur à l'aide d'une télécommande à distance et de dispositif de télécommunication et de mécanisme de commande, la manœuvre dans ce cas sera ouverture ou fermeture. Le disjoncteur peut fonctionner automatiquement par la protection ou volontairement à l'aide d'une télécommande [12, 13].

### 1.6 Avantages des disjoncteurs $SF_6$ HT :

D'un point de vue technique, plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF6 expliquent leur succès :

- Simplicité de la chambre de coupure.

- L'autonomie des équipements apportée par la technologie auto pneumatique (pas de compresseur de gaz).
- Possibilité d'obtenir les performances les plus élevées (jusqu'à 63 kA) avec un nombre réduit de chambres à arc : une seule chambre est nécessaire à 245 kV, une ou deux chambres à 420 kV et 550 kV, et typiquement quatre à 800 kV.
- Temps d'élimination des défauts court
- Durée de vie électrique élevée, garantie au moins 25 ans de durée de vie.
- L'utilisation de sous-stations sous enveloppe métallique peut réduire la taille.
- Les chambres peuvent être équipées de résistances de fermeture ou de fonctionnement synchronisé pour limiter les surtensions lors du fonctionnement en très haute tension.
- Sûr à utiliser.
- un faible niveau de bruit [10].

### 1.7 Conclusion

Les disjoncteurs haute tension utilisant le gaz SF<sub>6</sub> comme milieu de coupure sont les plus fiables dans le domaine de la haute tension grâce aux propriétés remarquables extinctives de l'arc du gaz SF<sub>6</sub>. Ils sont aussi plus compact avec une grande durée de vie et respectent l'environnement.

## CHAPITRE 2

# COUPURE DES COURANTS DE COURTS-CIRCUITS

### 2.1 Introduction

Le court-circuit est un phénomène très fréquent, n'importe quel réseau électrique, poste de transformation peut être à n'importe quel moment exposé à un défaut de court-circuit. Tout court-circuit s'accompagne par une surintensité dont la valeur dépend de plusieurs facteurs allant du point de son apparition jusqu'à la source. Ces fortes intensités ont des conséquences néfastes non seulement sur le matériel, mais aussi elles peuvent mettre en péril la vie humaine. Les courants de court-circuit doivent être calculés en tout point du réseau pour faire le choix correct des équipements de protection. Dans ce but, des méthodes de calculs ont été développées et des logiciels ont été conçus pour permettre un calcul précis et rapide de ces courants.

Le présent chapitre donne les différents types de court-circuit et décrit le processus de la coupure d'un courant alternatif et les phénomènes électriques liés à la coupure, notamment dans le domaine de la haute tension.

### 2.2 Courants de courts-circuits :

#### 2.2.1 Définition d'un court-circuit

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

#### 2.2.2 Types de court-circuit

On peut distinguer trois types de court-circuit :

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

●**Court-circuit monophasé**

Il correspond à la liaison d'une phase et la terre comme le montre la figure(I.1).

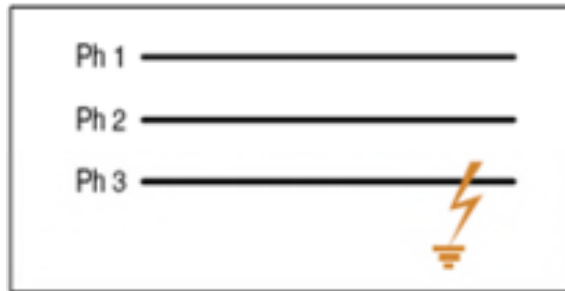


FIGURE I.1 – Court-circuit monophasé

●**Courts-circuits biphasés**

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

●**Court-circuit biphasé isolé**

Il correspond à un défaut entre deux phases, comme le montre la figure(I.2) [1]

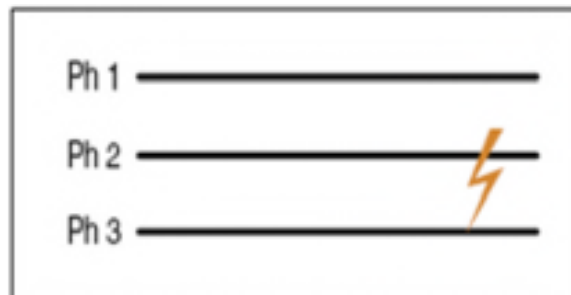


FIGURE I.2 – Court-circuit biphasé

●**Court-circuit biphasé terre**

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



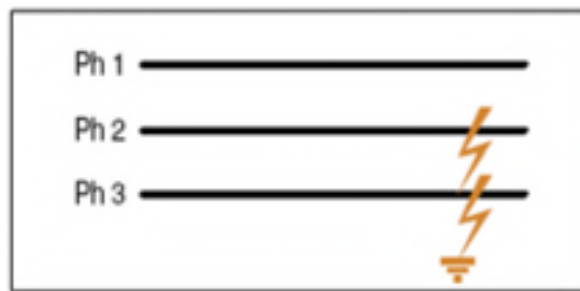


FIGURE I.3 – Court-circuit biphasé terre

• **Court-circuit triphasé isolé**

Il correspond à la réunion des trois phases, comme le montre la figure(I.4).

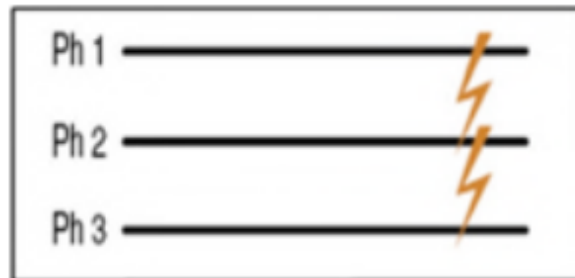


FIGURE I.4 – Court-circuit triphasé isolé.

• **Court-circuit triphasé terre**

Il correspond à la réunion des trois phases et la terre , comme le montre la figure(I.5).

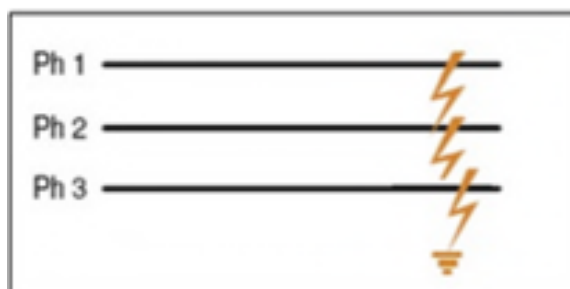


FIGURE I.5 – Court-circuit triphasé terre.

L'intensité des courants de court circuit sont données dans le tableau si dessous :

Type de dissymétrie	Dissymétrie impédante	Dissymétrie franche ( $Z=0$ et/ou $Z_c=0$ )
Court-circuit monophasé	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z }$	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_0 }$
Court-circuit biphasé terre ( $Z_c=0$ )	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3} Z_i }{ Z_d \times Z_i(Z_d + Z_i)(Z_0 + 3Z) }$	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3} Z_i }{ Z_d \times Z_i + Z_i \times Z_0 + Z_d \times Z_0 }$
Court-circuit biphasé isolé ( $Z=m$ )	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_i + Z_c }$	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_i }$
Court-circuit triphasé ( $Z$ quelconque)	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_c \sqrt{3}}$	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d \sqrt{3}}$

TABLE 2.1 – L'intensité des courants de court-circuit

#### Notation :

Le tableau ci-dessus récapitule les courants en module dans différentes dissymétries.

- Tention efficace composée du réseau triphasé =U
- Tention efficace simple du réseau triphasé  $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$
- Courant de court-circuit en module =  $I_{cc}$
- Courant de défaut terre en module =  $I_{terre}$
- Impédances symétriques =  $Z_d, Z_i, Z_0$
- Impédances de court-circuit =  $Z_c$
- Impédances de terre =  $Z$ .

### 2.2.3 Caractéristique du courant de court-circuit

Les défauts de courts-circuits sont principalement caractérisés par :

#### \*leur durée

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

#### \*leur origine

- Mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par

un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux) ;

- Surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique ;
- Dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive (vieillesse des isolements).

#### 2.2.4 Conséquences des courants de court-circuit

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

**Au point de défaut.** La présence de défaut provoque :

- détérioration des isolants ;
- fusion des conducteurs ;
- incendie et danger pour les personnes ;
- des efforts électrodynamiques :
- Déformation des jeux de barre ;
- Arrachement des câbles.

**Pour les autres circuits électriques du réseau**

- les creux de tension pendant et après la durée d'élimination du défaut ;
- la mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma et la sélectivité des protections ;
- l'instabilité et/ou la perte de synchronisme des machines influencées par le court-circuit [4].

### 2.3 Coupure des courants de courts-circuits

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

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

#### 2.3.1 Nature du courant électrique

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

Dès la fin du 19ème siècle, le réseau à courant alternatif s'est imposé dans le monde et ce pour

plusieurs raisons, une efficacité bien meilleure dans la transformation des niveaux de tension (transformateurs) et une génération ainsi qu'une consommation bien plus naturelle en alternatif (roue des moulins ou des turbines) qu'en continu.

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

Précisons enfin qu'aujourd'hui, le courant continu revient petit à petit sur le devant de la scène avec le développement des panneaux solaires par exemple [8].

## 2.4 L'interruption des courants électriques

### 2.4.1 Interruption d'un courant continu

On prend le cas le plus simple un circuit inductif (R, L) alimenté en courant continu voir la figure(2.1) [24].

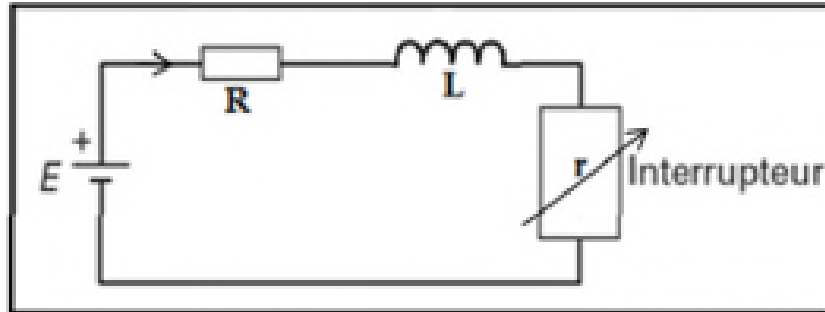


FIGURE 2.1 – Circuit LR en courant continu.

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

$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0 \quad (2-1)$$

- L'énergie de coupure est :

$$\int_0^T ri^2 dt = \int_0^T (E - Ri) i dt - \int_i^0 L i di \quad (2-$$

2)

avec : T : la durée de la coupure.

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

$E$  : la tension de la source.

$R$  : la résistance de circuit.

$L$  : l'inductance de circuit.

$i$  : le courant électrique.

Cette énergie est constituée de deux types :

- Énergie électrique qui dépend du temps de coupure :

$$\int_0^T (E - Ri) i dt \quad (2-3)$$

- Énergie électromagnétique qui dépend du courant :

$$- \int_l^0 L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2-4)$$

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

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

La variation de la résistance de l'interrupteur en fonction de l'évolution du courant de coupure est représentée sur la figure(2.2) [24].

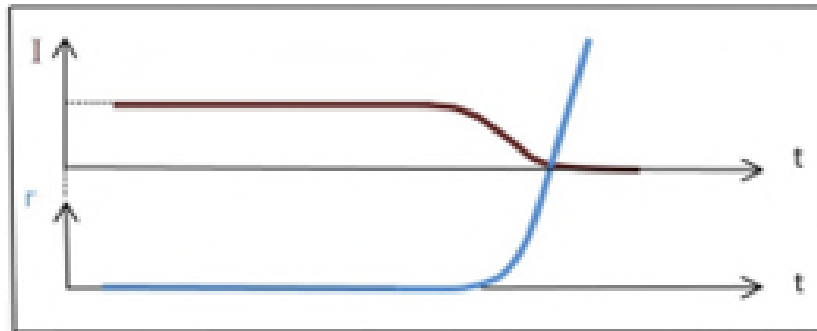


FIGURE 2.2 – Variation des paramètres  $I, r$  en fonction de temps.

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

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

Ce critère, s'il est primordial, n'est pas le seul. Il en existe au moins un autre d'importance. Si en

effet, la variation de résistance est infiniment rapide, celle du courant l'est également, et en conséquence, la force électromotrice induite  $L \frac{di}{dt}$  dans l'inductance propre du circuit devient infiniment grande, cette surtension illimitée est évidemment inadmissible.

En pratique, il est donc nécessaire de fixer une valeur limite pour la valeur de surtension à ne pas dépasser. Une fois celle-ci définie, la loi de variation de la résistance est imposée et le problème théoriquement peut être résolu. Alors l'énergie dépensée lors de la coupe est supérieure à l'énergie électromagnétique.

### 2.4.2 Interruption d'un courant alternatif

On prend le cas le plus simple d'un circuit inductif (R, L) alimenté en courant alternatif. Comme le montre la figure (2.3) [24].

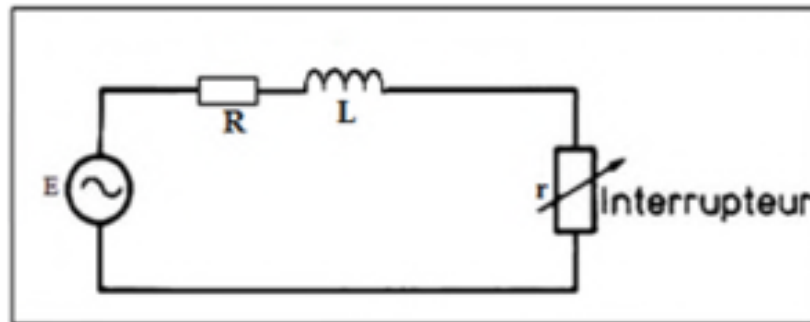


FIGURE 2.3 – Circuit R L en courant alternatif.

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

#### • Couper avec l'arc électrique

Deux raisons expliquent l'existence d'un arc :

Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro naturel de courant du fait de l'incertitude de mesure de commande. La surtension instantanée  $L \frac{di}{dt}$  qui apparaîtrait aux bornes de l'appareil si celui-ci devenait immédiatement isolant serait infinie et entraînerait le claquage immédiat de l'espace intercontacts encore faible [7].

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

## 2.5 Contraintes dues à l'interruption

L'action d'interruption de courant a des conséquences indésirables sur l'appareil de connexion lui-même, ce dernier est chargé de réaliser l'action d'une part et le réseau électrique d'autre part [14,15]. Ces conséquences donnent à l'interruption une difficulté pour la réaliser, la réussir et la maîtriser. Elles peuvent être résumés comment suit :

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

### 2.5.1 Conditions nécessaires pour réussir la coupure

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

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

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

- Un milieu qui ne va pas engendrer des réactions indésirables, lors de la présence d'un arc électrique (développer des rayons dangereux, explosion ...) [26, 28].

### 2.5.2 Coupure des courants en HT :

Lorsque les contacts se séparent, le courant continue de passer à travers l'arc.

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

#### •Coupure au passage du courant par zéro :

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

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

Après un passage du courant par zéro l'arc sera éliminé, il faut l'empêcher de se rallumer. Pour cela, il sera obligé de renouveler continuellement le milieu isolant entre les contacts [8].

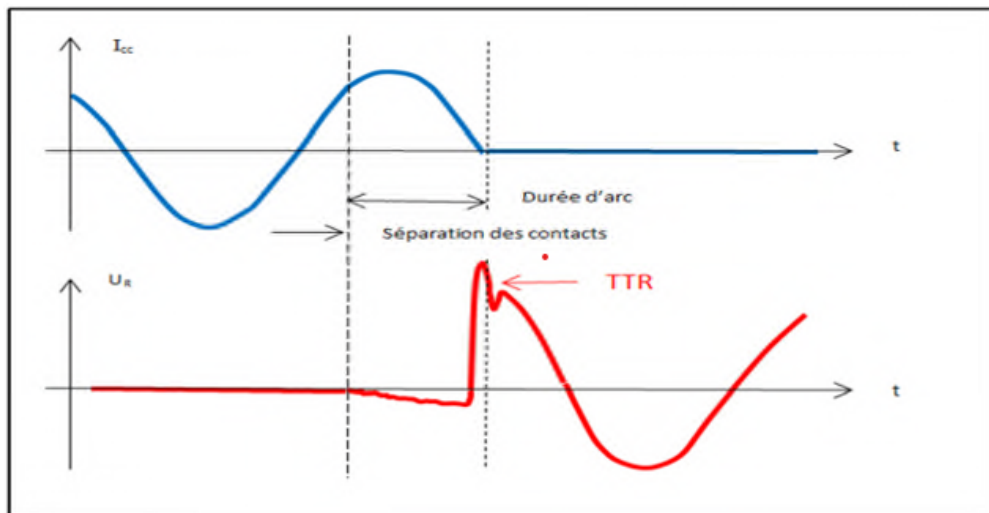


FIGURE 2.4 – Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit .

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



### 2.5.3 Répartition de la coupure dans des chambres en série

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.

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

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

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

### 2.5.4 Endroit des défauts :

#### •1. Défaut éloigné des alternateurs

Ce type de défaut est plus fréquent. Le régime transitoire est alors celui résultant de l'application à un circuit self-résistance d'une tension :

$$e = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (2-5)$$

L'intensité  $i$  est alors la somme des deux composantes :

$$i = i_{CA} + i_{CC}. \quad (2-6)$$

- L'une ( $i_{CA}$ ) est alternative et sinusoïdale

$$i_{CA} = I\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (2-7)$$

$$\text{où } I = \frac{E}{Z_{cc}}, \quad (2-8)$$

$\alpha$  = angle électrique qui caractérise le décalage entre l'instant initial du défaut et l'origine de l'onde de tension.

- L'autre ( $i_{CC}$ ) est une composante continue

$$i_{CC} = -I\sqrt{2} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (2-9)$$

Sa valeur initiale dépend de  $\alpha$ , et son amortissement est d'autant plus rapide que  $\frac{R}{L}$  est élevé.

A l'instant initial du court-circuit,  $i$  est nulle par définition (l'intensité de service  $I_s$  étant négligée),

$$\text{d'où } i = i_{CA} + i_{CC} = 0 \quad (2-10)$$

La figure (2.5) montre la construction graphique de  $i$  par l'addition algébrique des ordonnées de ses 2 composantes  $i_{CA}$  et  $i_{CC}$ .

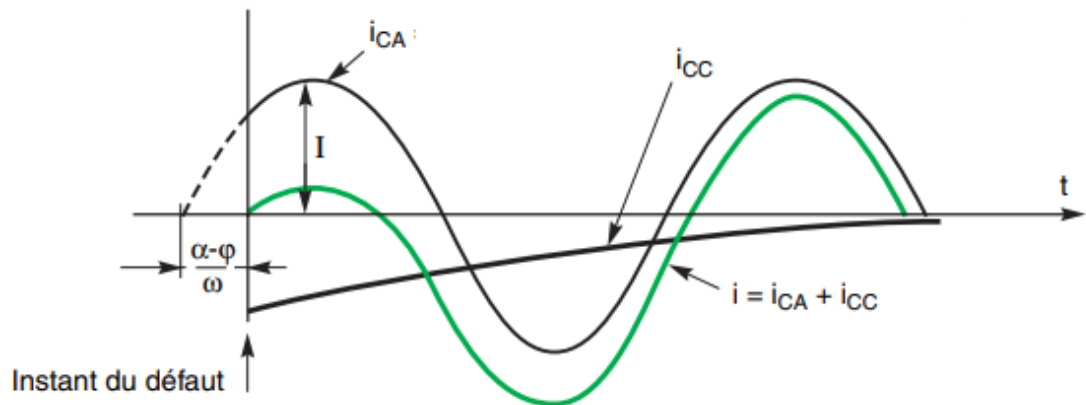


FIGURE 2.5 – présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en un point éloigné d'un alternateur.

### •2. Défaut aux bornes du disjoncteur

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

La figure (3.6) montre de manière schématique le cas d'un défaut aux bornes triphasé à la terre, l'impédance  $Z$  entre le neutre du réseau et la terre peut avoir toute valeur entre 0 (neutre directement à la terre) et l'infini (neutre isolé). La tension entre phase et terre est égale à  $E$ . Les conditions de défaut triphasé à la terre s'expriment par :  $V_1 = 0$   $V_2 = 0$   $V_3 = 0$  On en déduit les valeurs symétriques de tension correspondantes :  $V_0 = 0$   $V_d = 0$   $V_i = 0$  Le calcul des **composantes symétriques de courant** donne :

$$V_0 = \sum X_0 I_0 = 0 \implies I_0 = 0$$

$$V_i = \sum X_i I_i = 0 \implies I_i = 0$$

$$V_d = E \sum X_d I_d \implies I_d = \frac{E}{X_d}$$

Le **courant de défaut aux bornes triphasé** est déduit des expressions ci-dessus :

$$I_1 = I_d + I_i + I_0 = \frac{E}{X_d} \quad (2-11)$$

soit :

$$I_{tri} = \frac{E}{X_d} \quad (2-12)$$

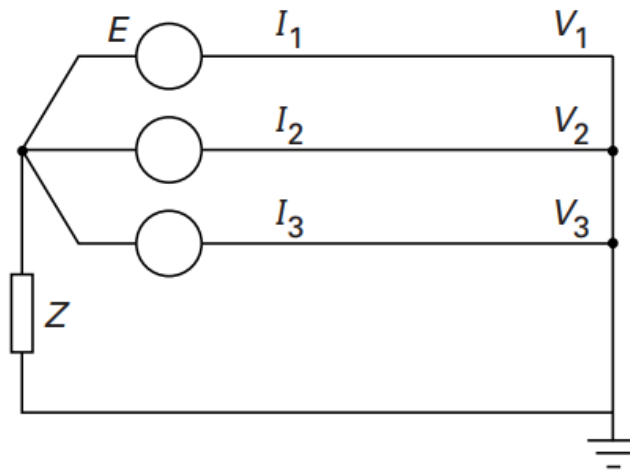


FIGURE 2.6 – Circuit avec un défaut aux bornes triphasé à la terre

### •3. Défaut proche en ligne

Les caractéristiques d'arc des disjoncteurs et des liaisons disjoncteurs, câbles, lignes font que la contrainte est inférieure à celle provoquée par un court-circuit aux bornes.

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

La réactance de la ligne est telle que le courant de court-circuit est égal à 90 % du courant de défaut aux bornes.

Si  $I_{SC}$  est le courant de défaut aux bornes (indice SC = short circuit, d'après la normalisation CEI 60056), la tension d'alimentation peut s'exprimer de la manière suivante en fonction des réactances d'alimentation ( $X_S$ ) et de ligne ( $X_L$ ) :

$$E = X_S I_{SC} = 0.9(X_S + X_L) I_{SC} \quad (2-13)$$

d'où :

$$X_S = 0.9(X_S + X_L) \quad (2-14)$$

soit :

$$X_L = \frac{X_S}{9}. \quad (2-15)$$

Lorsqu'un défaut se produit sur une ligne de transmission à une distance allant de 100 m à quelques kilomètres le long des lignes, un disjoncteur est nécessaire pour éliminer le SLF. Lorsqu'un disjoncteur efface le SLF généré sur la ligne, une TRV avec un taux de montée rapide similaire à une forme d'onde en dents de scie est observée en raison de l'oscillation à haute fréquence générée par les ondes de propagation qui itèrent sur la ligne et des réflexions entre la borne du disjoncteur et le point de faille.

Lorsque le disjoncteur interrompt le courant de défaut dans les conditions SLF, la tension de la borne du disjoncteur côté source revient à la tension du système à la borne du transformateur, ce qui provoque une oscillation avec la fréquence du réseau dans le circuit source.

De l'autre côté, la tension de la borne du disjoncteur côté ligne est abaissée aux niveaux de mise à la terre, ce qui crée une autre oscillation avec une dent de scie forme (triangulaire) due au déplacement et à la réflexion des ondes se propageant le long de la ligne. Le circuit côté ligne peut être assimilé à un petit circuit atténué avec des paramètres distribués. La figure(2.7) montre les formes d'onde TRV à travers la borne du disjoncteur et le côté ligne.

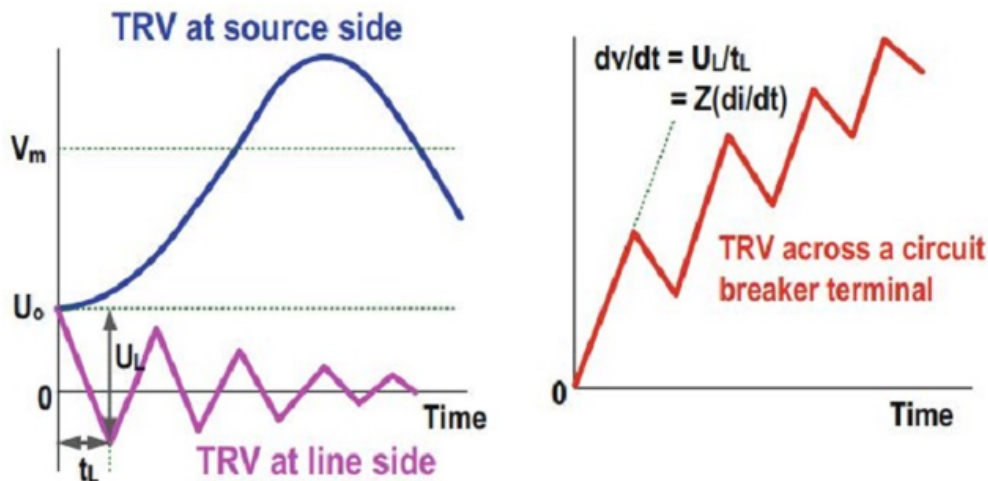


FIGURE 2.7 – les formes d'onde TRV à travers la borne du disjoncteur et le côté ligne.

## 2.6 Caractéristiques assignées des disjoncteurs HT :

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

### a. Pouvoir de coupure assigné

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

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

- la valeur efficace de sa composante périodique.
- le pourcentage de la composante apériodique, par rapport à la composante périodique [26].

### **b. Pouvoir de fermeture assigné**

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

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

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

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

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

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

- 2,5 : pour une fréquence assignée de 50 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.
- 2,6 : pour une fréquence assignée de 60 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.
- 2,7 : pour toutes les valeurs de la constante de temps des applications particulières. La norme CEI 60056 impose de vérifier le pouvoir de fermeture sur court-circuit d'un disjoncteur dans deux situations critiques qui sont censées couvrir tous les cas possibles en service :
  - établir un courant totalement asymétrique, c'est-à-dire lorsque l'instant d'établissement du courant s'effectue à un zéro de tension ;
  - établir un courant symétrique avec une durée de pré-amorçage maximale ; dans ce cas, l'établissement du courant doit se faire au voisinage d'une valeur crête de tension.

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

### **c. Tension transitoire de rétablissement**

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

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

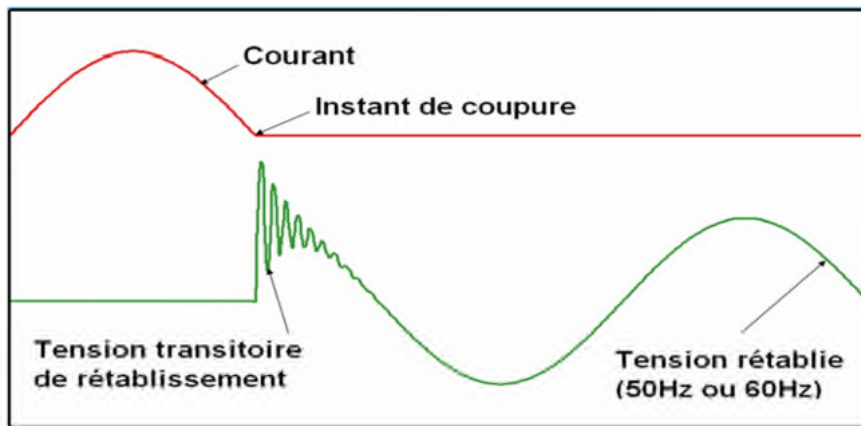


FIGURE 2.8 – tension transitoire de rétablissement

#### d. Processus de coupure avec un arc électrique

##### ● Période d'attente

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

L'arc est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne reste conductrice tant que sa température est suffisamment élevée. L'arc est ainsi "entretenu" par l'énergie qu'il dissipe par effet Joule. La tension qui apparaît entre les deux contacts du fait de la résistance de l'arc s'appelle la tension d'arc ( $u$ ). Sa valeur, qui dépend de la nature de l'arc, est influencée par l'intensité du courant et par les échanges thermiques avec le milieu.

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

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

$$w = \int_{t_0}^{t_{arc}} u \cdot i dt \quad (2-16)$$

Où

$t_0$  : est l'instant d'initiation de l'arc ;  $t_{arc}$  : est l'instant de la coupure.

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

##### ● Période d'extinction

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

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

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

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

**e. Période post-arc**

Pour que la coupure soit réussie, il faut que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que celle l'évolution de la tension transitoire de rétablissement TTR, sinon un claquage diélectrique apparaît voir la figure (2.9) [7].

A l'instant où se produit la rupture diélectrique, le milieu redevient conducteur. Ces échecs diélectriques post-coupure sont appelés :

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

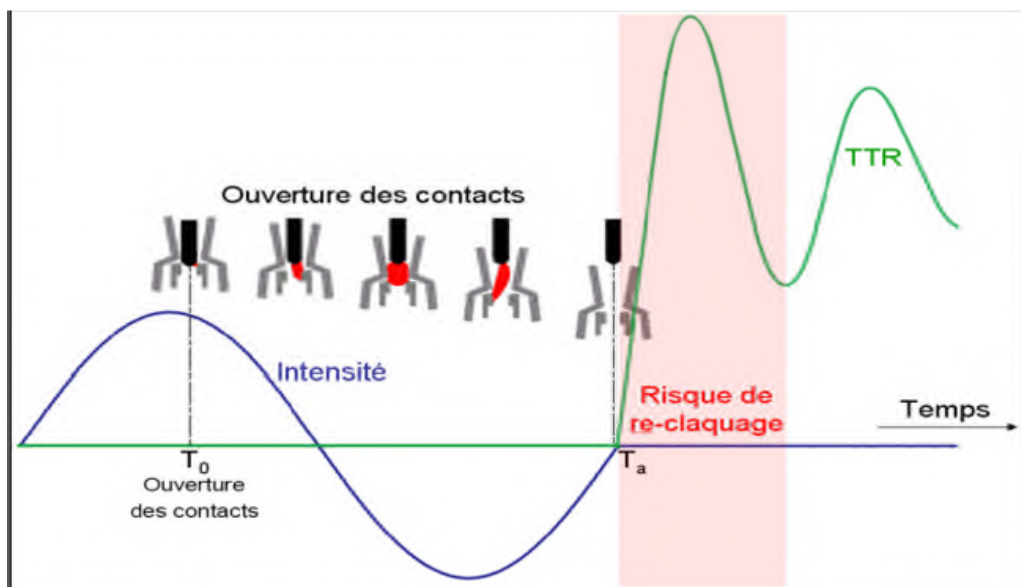


FIGURE 2.9 – Caractéristiques de l'intensité et de la TTR lors d'une phase d'ouverture des contacts

### 2.6.1 Importance de la constante de temps de désionisation

Si on modélise l'interrupteur et plus spécifiquement l'arc électrique dans un disjoncteur  $SF_6$  haute tension par le modèle de Mayr, on peut écrire :

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r}{\tau} \left(1 - \frac{ui}{P_0}\right) \quad (2-17)$$

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

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

Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure utilisant divers milieux de coupure l'air, l'huile, le vide et le  $SF_6$ . Si la coupure dans l'air ou l'huile a tendance à disparaître, il n'en va pas de même de la coupure dans le vide ou le  $SF_6$ , généralement en haute tension la coupure s'effectue dans le  $SF_6$ .

Le gaz  $SF_6$  est caractérisé par une constante de désionisation la plus faible, autrement dit par une vitesse très grande de régénération du milieu de coupure [29].

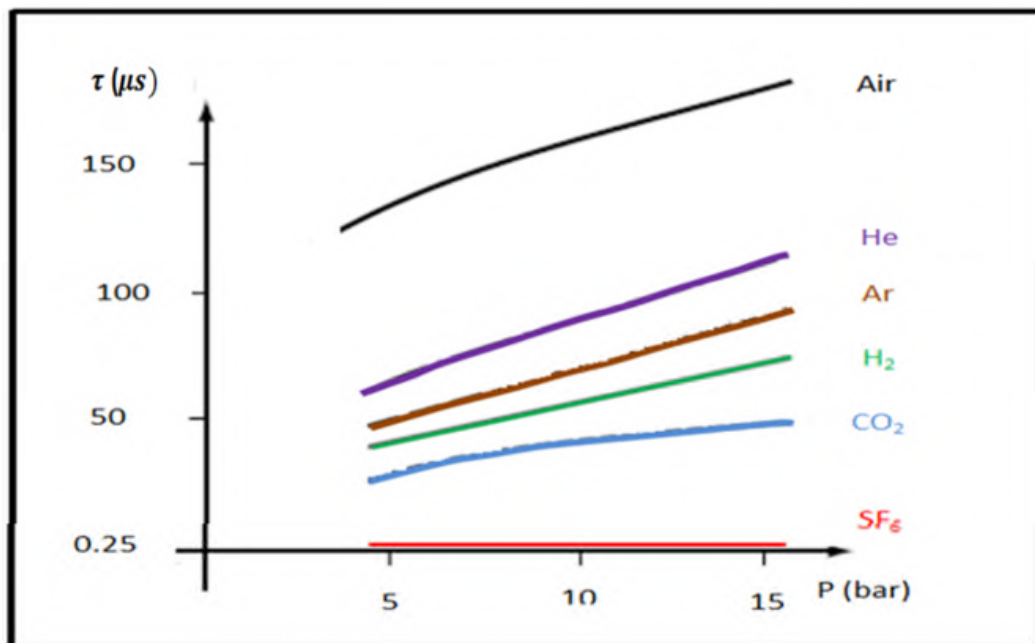


FIGURE 2.10 – Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz



●La durée de coupure

La figure (2.11) montre la durée de coupure d'un courant alternatif qui varie selon la fréquence de courant, elle varie entre la réception d'un signal d'ouverture des contacts et l'extinction finale de l'arc.

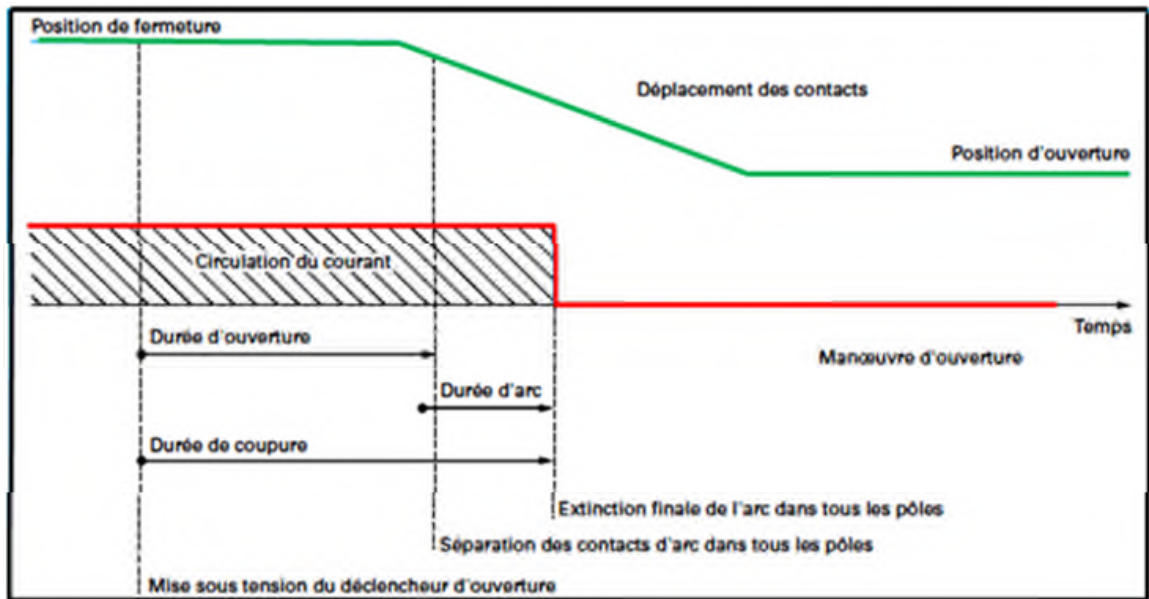


FIGURE 2.11 – L'évolution et la durée de l'arc dans la phase ouverture du disjoncteur.

## 2.7 conclusion

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

On conclut que la réussite ou l'échec de la coupure, dépend des contraintes électriques appliquées à l'appareil de coupure et des caractéristiques du milieu de coupure.

### 3.1 Introduction

La réussite de l'interruption d'un courant par le disjoncteur  $SF_6$  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 d'étudier l'interaction arc-circuit.

### 3.2 Aperçu sur la modélisation d'arc électrique

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

- **Modèles diélectriques et thermiques** : ces modèles sont basés sur la description de l'évolution de l'arc par rapport à la variation en fonction du temps de :
  - ses dimensions (section, longueur).
  - sa température.
  - la vitesse de désionisation du milieu environ gazeux.
  - la pression et le volume du milieu environnant gazeux.
  - l'influence de rayonnement lumineux émit par l'arc sur le gaz environ.
- **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.
- **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 environnant .

### 3.3 Représentation des modèles d'arc à boite noire

Les modèles d'arc à boite 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 décrit comme des paramètres indépendants du modèle d'arc à boite noire.

### 3.4 Les modèles de base

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

#### 3.4.1 Le modèle de Mayr

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

Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses.

• **Première hypothèse**

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

$$g = F(w) \tag{3-2}$$

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 :

$$\frac{dg}{dt} = F'(w) \frac{dw}{dt} \tag{3-3}$$

La puissance fournie à l'arc par effet Joule est  $(ri^2)$ . La puissance cédée par l'arc au milieu environnant est  $(P)$ , on l'appelle aussi puissance de refroidissement. A chaque instant l'une et l'autre peuvent varier, la puissance accumulée dans l'arc est donc  $(ri^2 - P)$ .

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

$$\frac{dw}{dt} = Ri^2 - P \tag{3-4}$$

L'équation (3-3) devient :

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

• **Deuxième hypothèse**

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

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

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

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

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

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

D'où :

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

• **Troisième hypothèse**

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

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

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

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

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

D'après la relation (3-9), il devait exister une variation linéaire de  $(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt})$ . 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 constantes durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc [24].

### 3.4.2 Le modèle de Cassie

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

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

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

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

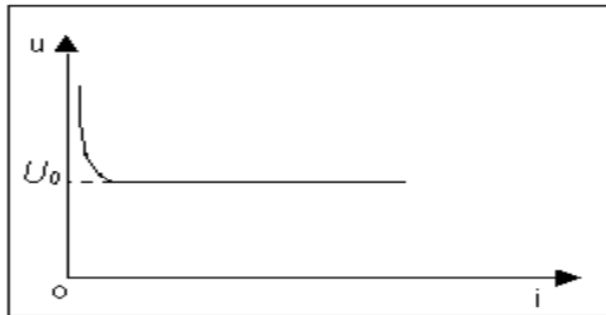


FIGURE 3.1 – Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.

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.

### 3.4.3 Comparaison des deux modèles

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

TABLE tab1 – 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].

## 3.5 Les modèles d'arc améliorés

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

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

Tous ces modèles gardent l'idée de base de la description du comportement de l'arc en utilisant les

paramètres  $\tau$  et  $P$  avec différentes interprétations physiques [25]. Les modèles d'arc améliorés les plus utilisés sont les suivants :

### 3.5.1 Le modèle de Mayr modifié

C'est une version très répandue de l'équation de Mayr modifiée, la puissance de refroidissement est en fonction du courant de l'arc [25-28].

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P_0 + U_0|i|} - 1 \right) \quad (3-12)$$

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

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{p(P_0 + U_0|i|)} - 1 \right) \quad (3-13)$$

$g$  : la conductance de l'arc.

$u$  : la tension de l'arc.

$i$  : le courant de l'arc.

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

$p$  : la pression de remplissage du disjoncteur.

$P_0$  : la puissance de refroidissement.

$U_0$  : le pourcentage constant de la caractéristique  $u$ - $i$  de l'état statique figure(3.1). Les paramètres indépendants de ce modèle sont ( $\tau, P_0$  et  $U_0$ ).

### 3.5.2 Le modèle e 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 (figure 3.2) [27, 28].

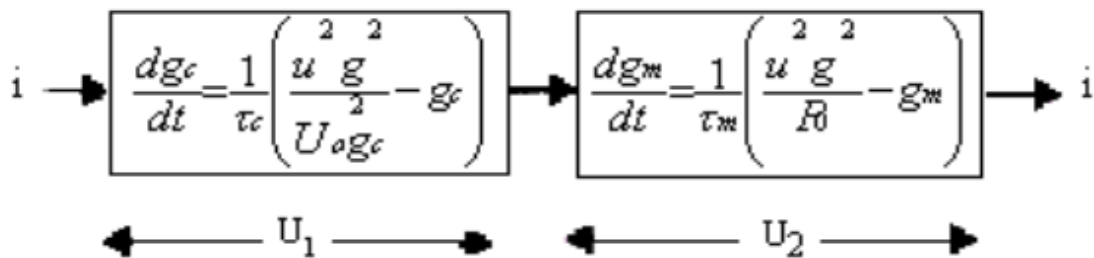


FIGURE 3.2 – Le modèle de Habedank

Les équations du modèle sont :

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{u^2 g^2}{U_0^2 g_c} - g_c \right) \quad (3-14)$$

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

avec :

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

$g$  : la conductance de l'arc.  $u$  : la tension de l'arc.

$i$  : le courant de l'arc.

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

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

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

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

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

$\tau_m$  : la constante de temps de Mayr.  $g$  : la conductance de l'arc.

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

### 3.5.3 Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique [31–33]. La constante de temps et la puissance de refroidissement dépendent de la conductance de l'arc :

$$\tau = \tau_0 \cdot g^\alpha$$

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

L'équation de ce modèle est :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau_0 \cdot g^\alpha} \left( \frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (3-16)$$

$g$  : la conductance de l'arc.  $u$  : la tension de l'arc.

$i$  : le courant de l'arc.

$\tau_o$  : la constante de temps de l'arc

$P$  : la puissance de refroidissement



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

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

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

**Pour  $\alpha=0$  et  $\beta=1$**

on aura le modèle de Cassie :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{ui}{P_0 \cdot g} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{u^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3-17)$$

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

**Pour  $\alpha = \beta = 0$**

on aura le modèle de Mayr :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-18)$$

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 ( $\tau_0, \alpha, P_0$  et  $\beta$ ), 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) [27, 28].

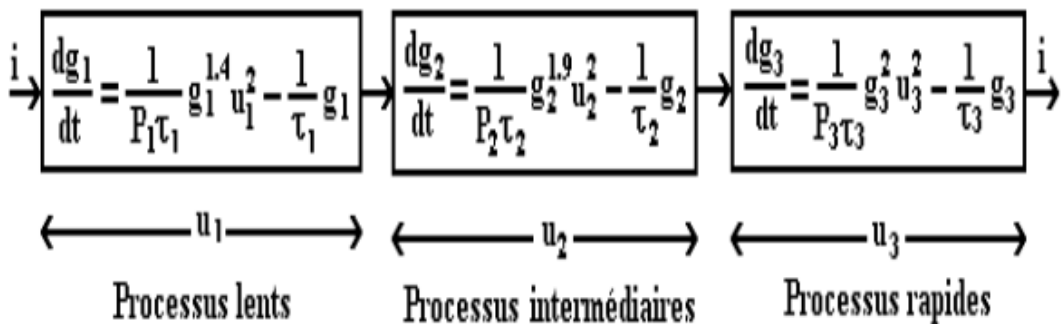


FIGURE 3.3 – Le modèle de KEMA

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

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

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.

$\lambda_j$  : 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 d'essais :

- 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 :

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

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

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

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

### Les paramètres du modèle

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

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{K_1} \quad \tau_3 = \frac{\tau_2}{K_2} \quad P_3 = \frac{P_2}{K_3}$$

$(K_1, K_2, K_3)$  sont des paramètres constants propres à chaque disjoncteur.

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

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

### 3.5.5 Le modèle de Schavemaker

C'est le modèle le plus récent, avec le paramètre  $\tau$  constant et la puissance de refroidissement en fonction de la puissance électrique d'entrée [16, 20, 21] :

$$P = P_0 + P_1 ui$$

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

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

L'équation du modèle est alors :

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

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

### 3.5.6 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 figure (3.4) [27].

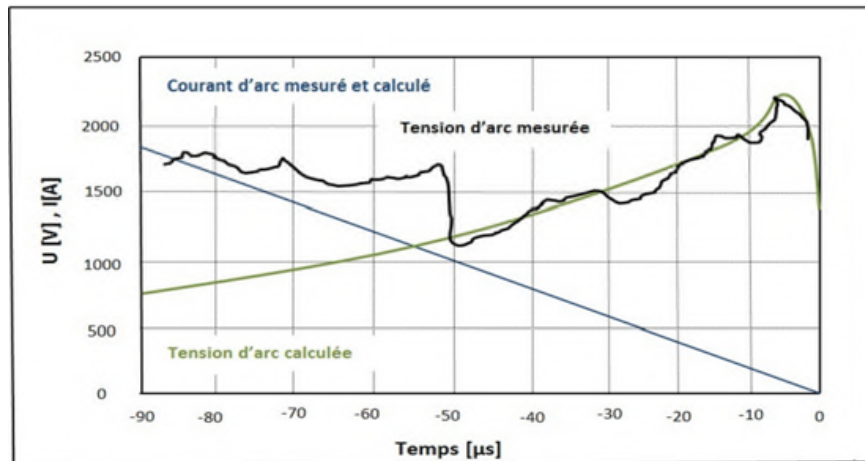


FIGURE 3.4 – : Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés .

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 :

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

★**Domaine des courants forts**

L'équation (3-21) sera réduite à :

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

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

★**Domaine des courants faibles**

• **Avant le zéro du courant**

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

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

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

• **Après le zéro du courant**

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

## 3.6 Conclusion

Tous les modèles d'arc à boite noire ont pour origine de deux modèles de base de Cassie et de Mayr. Les modèles d'arc à boite 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 , ils sont appréciés par les chercheurs dans le domaine de la modélisation des disjoncteurs  $SF_6$  HT, car ils expriment bien la dynamique de l'arc .

## CHAPITRE 4

# SIMULATION DE LA COUPURE D'UN DÉFAUT PROCHE EN LIGNE EN UTILISANT LE MODÈLE DE MAYR MODIFIÉ

### Introduction

Les modèles d'arcs ont été initialement développés pour une meilleure compréhension du processus d'interruption de courant dans les disjoncteurs à haute tension et d'être en mesure de modéliser le comportement dynamique de l'arc électrique dans les chambres de coupure. Le modèle de Mayr modifié a été développé en combinant les deux modèles de base ; le modèle de Mayr qui a prouvé son efficacité seulement dans le domaine des courants faibles et celui de Cassie qui a prouvé son efficacité seulement dans le domaine des courants forts de l'arc électrique.

Les phénomènes physiques qui ont lieu lors de la coupure des courants de défaut sont très compliqués et particulièrement dans le cas du défaut proche en ligne et du défaut aux bornes. Des essais dans un laboratoire à haute puissance sont indispensables pour s'assurer que le disjoncteur HT est capable d'interrompre ces défauts. Cependant ces essais sont très coûteux et prennent beaucoup de temps, les modèles d'arc à boîte noire sont utilisés pour faciliter la compréhension des phénomènes de coupures et aussi d'étendre les informations obtenues durant les essais.

Dans ce chapitre on va faire la simulation de la coupure d'un défaut kilométrique en utilisant le modèle de Mayr modifié.

Ce travail est constitué de trois étapes :

- \* Dans la première étape, on fait la conception d'un " disjoncteur HT " dans le Simulink de Matlab en se basant sur le modèle de Mayr modifié.
- \* Dans la deuxième étape, on fait la conception du circuit d'essai dans lequel on place le " disjoncteur HT ".
- \* Et dans la troisième étape on fait la simulation du processus de la coupure d'un défaut kilométrique et l'interprétation des résultats obtenus.

## 4.1 Conception d'un " interrupteur " dans le Simulink de Matlab, en se basant sur les équations du modèle de Mayr modifié

### 4.1.1 Description du modèle de Mayr modifié

Le modèle de Mayr modifié décrit l'évolution dynamique de l'arc par une équation mathématique donnant la variation de la conductance électrique dans le temps en fonction du courant et la tension de l'arc. On reprend l'équation (3-13) du chapitre 3.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{p(p_0 + U_0|i|)} - 1 \right) \quad (4.1)$$

$g$  : la conductance de l'arc ;

$u$  : la tension de l'arc ;

$i$  : le courant de l'arc ;

$r$  : la constante de temps de l'arc ;

$p$  : la pression de remplissage du disjoncteur ;

$P_0$  : la puissance de refroidissement ;

$U_0$  : le pourcentage constant de la caractéristique  $u.i$  . Les paramètres indépendants de ce modèle sont ( $r$ ,  $P_0$  et  $U_0$ )

## 4.2 Implantation du modèle de Mayr modifié dans le Simulink de MATLAB

**Les entrées du modèle :**

$U(1)$  : la première entrée est égale à la tension d'arc( $u$ ) ;

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

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

**La variable d'état :**

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

$u(3)=g$

**La sortie du modèle :**

$y=i=u(3).u(1)=g.u$

$y=i=u(1).g$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{p(p_0 + U_0|i|)} - 1 \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{dg}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{uig}{p(p_0 + U_0|i|)} - g \right) \quad (4.3)$$

$$\frac{du(3)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{u^2 g^2}{p(p_0 + U_0|g.u|)} - g \right) \quad (4.4)$$

$$\frac{du(3)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{u(3)^2 u(1)^2}{p(p_0 + U_0|u(3).u(1)|)} - u(3) \right) \quad (4.5)$$

$$u(3) = \int_0^t (u(3)) dt = g(t) - g(0) \quad (4.6)$$

$$g(0) = x_0$$

$x_0$  : la valeur initiale de la variable d'état, à s'avoir la valeur initiale de la conductance de l'arc  $g$ .

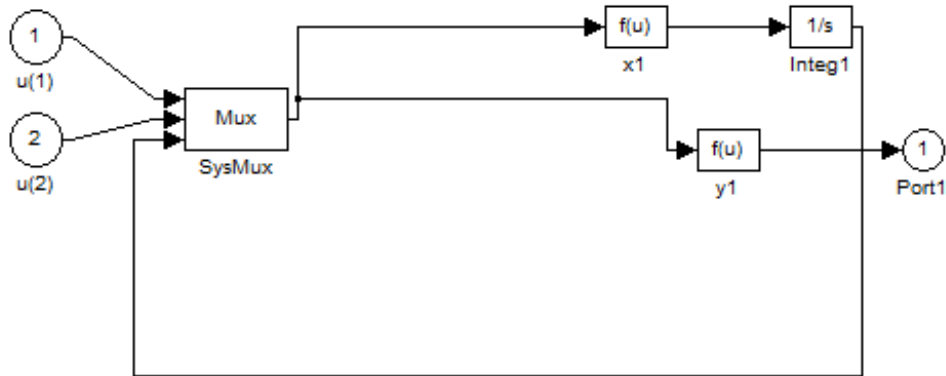


FIGURE 4.1 – Systeme d'equation du modele de Mayr Modifie dans Matlab/Simulink .

Puis, on crée le sous-système de ce système d'équation que montre la figure (4.2) avec deux entrées et une sortie.

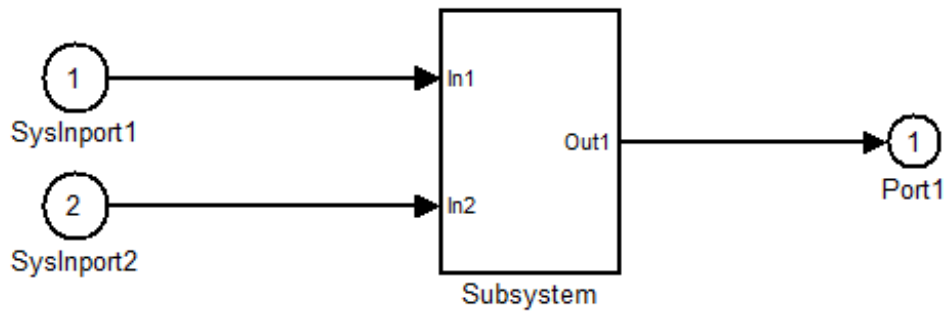


FIGURE 4.2 – le sous système du système d'équation du modèle de Mayr Modifié dans le simulink de Matlab.

Pour obtenir le modèle de Mayr modifié, on ajoute au sous-système ci-dessus les blocs de Simulink suivants comme le montre la figure (4.3) :

- **voltage measurement** : pour mesurer la tension de l'arc.
- **controlled current source** : Ce bloc convertit le signal d'entrée Simulink en une source de courant équivalent. Le courant généré est entraîné par le signal d'entrée du bloc.
- **Hit crossing** : Ce bloc est utilisé pour détecter le zéro du courant. Le bloc assure que la simulation trouve le point de passage du courant par zéro. Ceci est important pour la coupure.
- **Step** : Ce bloc est utilisé pour contrôler l'état des contacts du disjoncteur, Soit les contacts sont fermés ou ouverts.

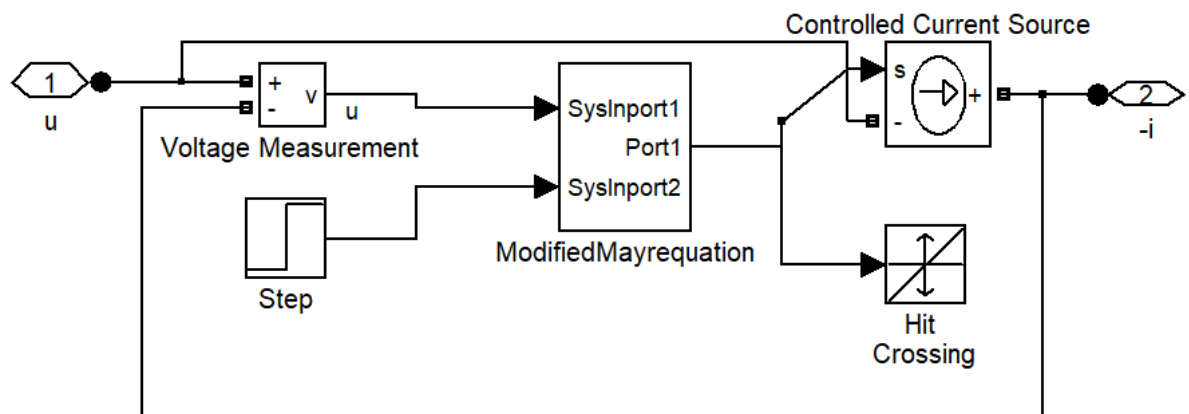


FIGURE 4.3 – Le bloc du modèle de Mayr Modifié.



Après avoir terminé cette étape, on a créé un sous système qu'on a nommé Modified Mayr arc model figure.(4.4), qu'on va insérer dans le circuit d'essai de la figure (4.5).

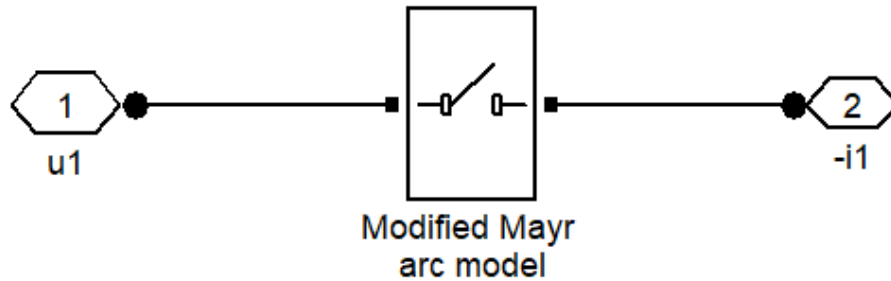


FIGURE 4.4 – Le modèle de Mayr Modifié dans le Simulink/Matlab.

### 4.3 Dimensionnement du circuit d'essai

On va faire la simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne en utilisant le modèle de Mayr modifié .Un essai a été réalisé dans le laboratoire haute puissance de KEMA avec un disjoncteur de tension 72.5 kV 60 Hz pour couper un courant de ligne de valeur efficace 21.2kA .

Les résultats de l'essai sont présentés sur la figure(4.5).

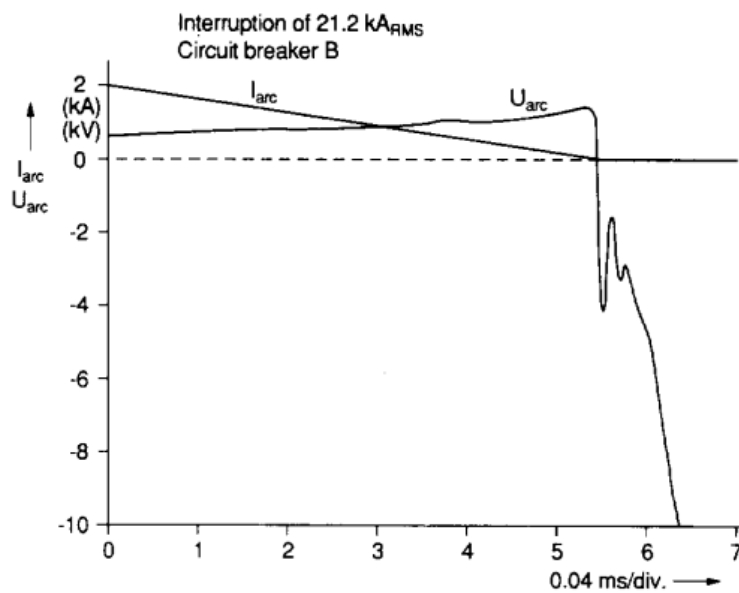


FIGURE 4.5 – Tension et courant d'arc pour une interruption réussie de 21.2 kA<sub>eff</sub> [37].

## CHAPITRE 4. SIMULATION DE LA COUPURE D'UN DÉFAUT PROCHE EN LIGNE EN UTILISANT LE MODÈLE DE MAYR MODIFIÉ

Une interruption réussie était obtenue car le courant s'est annulé après le passage par zéro et la TTR s'est amortie.

Pour faire les simulations ,on vas dimensionner le circuit d'essai selon le disjoncteur utilisé.Le circuit d'essai est freprésenté sur (figure 4.6)

- a . Le disjoncteur modélisé par le modèle de Mayr Modifié.
- b .Le circuit côté source est constitué de :
  - la source de f.e.m E.
  - de l'inductance  $L_s$  qui représente l'inductance équivalnte en amont du disjoncteur.
- c . la branche de la TTR .
- d .La ligne artificielle R,L ,C.

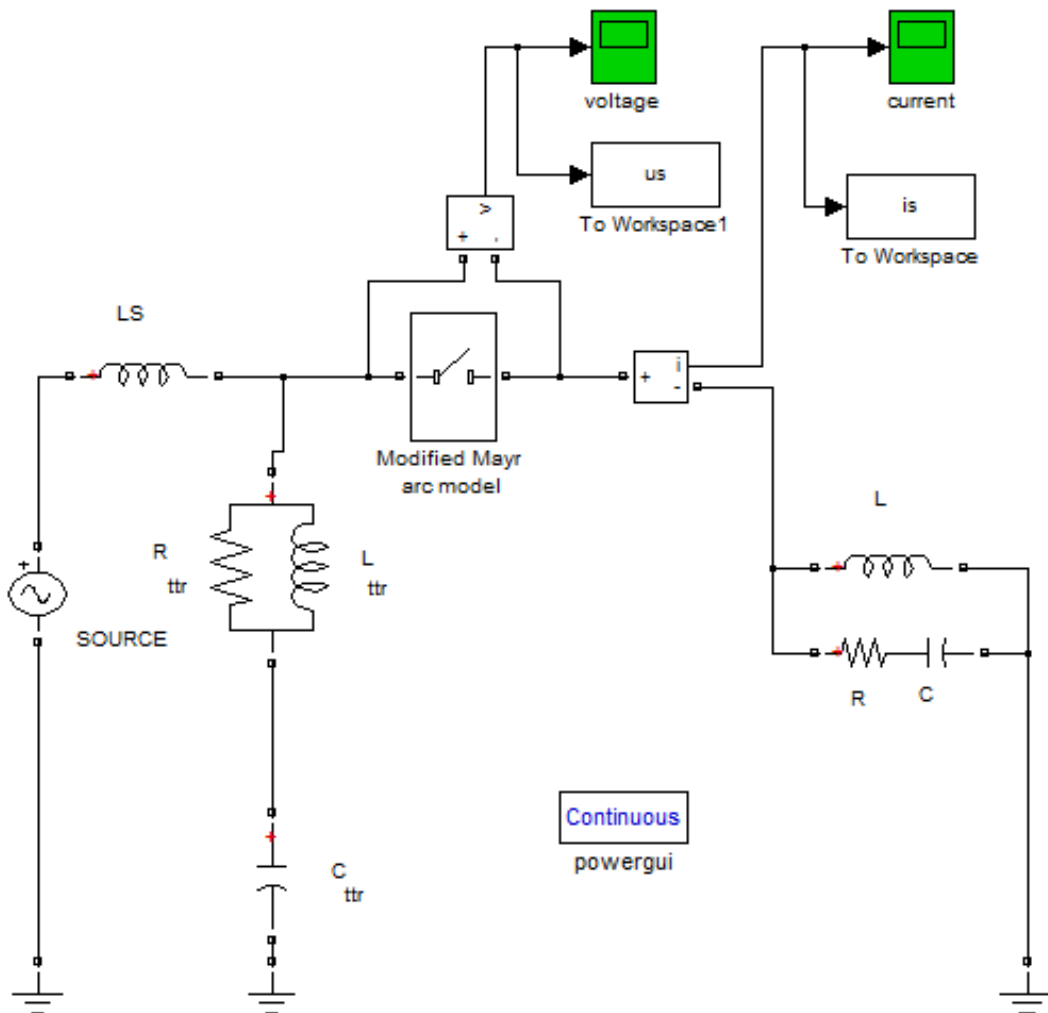


FIGURE 4.6 – Modèle de Mayr Modifié inséré dans le circuit d'essai.

Le calcul des paramètres se fait comme suit [36] :

**a. Le circuit côté source**

$$U_r = 72.5kV$$

$$f = 60Hz$$

$$I_{SC} = \frac{21.2}{0.9} = 23.56kA$$

$$\hat{E} = \frac{U_r}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}$$

$$\hat{E} = \frac{72.5}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 59.196 \text{ kV}$$

$$X_S = \frac{E}{I_{SC}}$$

$$X_S = \frac{59.196}{23.56} = 1.777\Omega$$

$$L_S = \frac{X_S}{2\pi f}$$

$$L_S = \frac{1.777}{2\pi \times 60} = 4.716mH$$

**b. La branche de la TTR ( $R_{TTR}, L_{TTR}, C_{TTR}$ )**

$$\frac{di}{dt} = \frac{\hat{E}}{L_S} = \frac{59.196}{4.716 \times 10^{-3}} = 12.552 \times 10^6 A/s$$

$$R_{TTR} = \frac{0.5kV/\mu s}{\frac{di}{dt}} = \frac{500 \times 10^6}{12.552 \times 10^6} = 39.83\Omega$$

$$L_{TTR} = 1.5L_S = 7.165mH$$

$$C_{TTR} = \frac{L_S}{2R_{TTR}^2} = 14.96\mu F$$

**c. La ligne artificielle RLC**

$$M = 90/100 = 0.9$$

$$I_L = 21.2kA$$

D'après la relation :

$$L_L = \frac{(1 - M)}{M} L_S$$

$$L_L = L_S \left( \frac{(1 - 0.9)}{0.9} \right) = 0.523mH$$

Les paramètres de la ligne RLC sont :

$$R = Z_L = 450\Omega$$

$$L = L_L = 0.523mH$$

$$C = 0.8 \frac{L}{Z_L^2} = 2.066\eta F$$

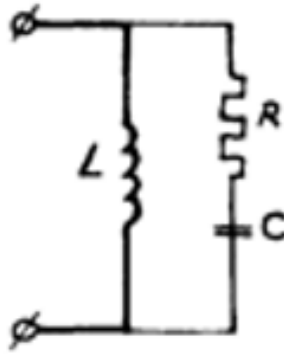


FIGURE 4.7 – La branche RCL

#### 4.4 Simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne en utilisant le modèle de Mayr modifié

On ouvre la boîte de dialogue du modèle et on introduit les paramètres du modèle de Mayr modifié comme le montre la figure (4.7).

$$\tau = 0.6[\mu s];$$

$$P_0 = 15000 [W];$$

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

$$C_i = 248 [V/\text{bar}].$$

Ces paramètres sont extraits des courbes mesurées de la tension et du courant de l'arc de la figure(4.5) On introduit aussi l'instant de séparation des contacts qu'on a choisi  $t_s = 0.006[s]$  et la valeur initiale de la conductance d'arc  $g_0 = 10^4[S]$ .

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

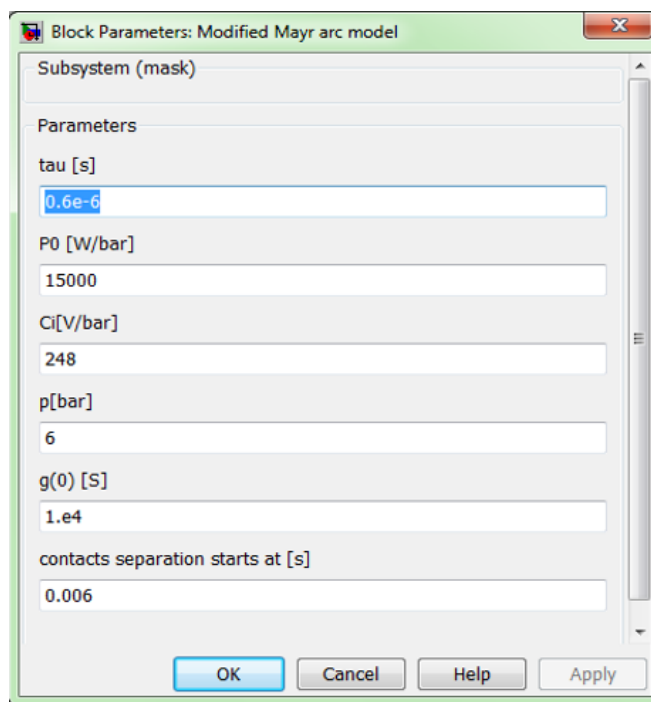


FIGURE 4.8 – Boite de dialogue du modèle Mayr Modifié.

## 4.5 Résultats de simulation

Les Figures (4.9, 4.10) représentent respectivement la tension et le courant simulés de l'arc.

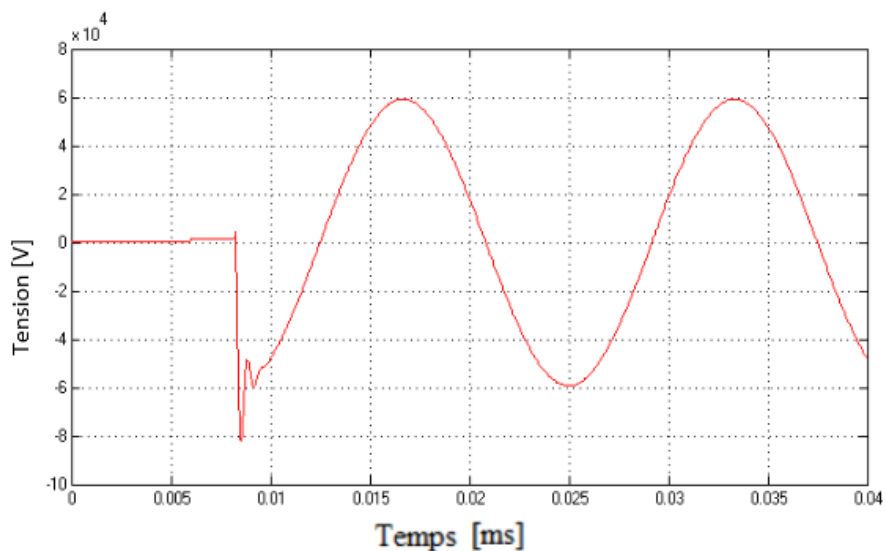


FIGURE 4.9 – Tension simulée en utilisant le modèle de Mayr Modifié en fonction du temps .

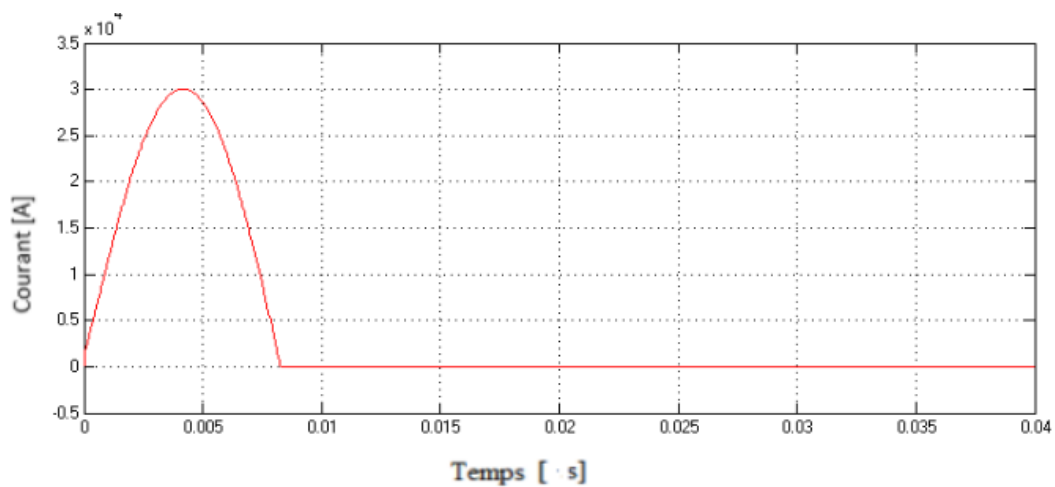


FIGURE 4.10 – Courant simulé en utilisant le modèle de Mayr Modifié en fonction du temps .

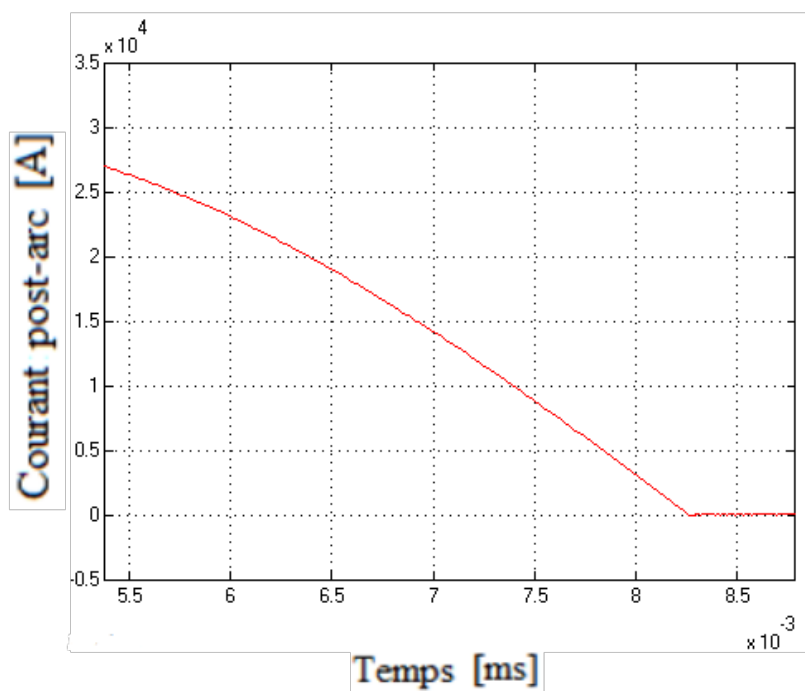


FIGURE 4.11 – Tension d'arc en fonction du temps .

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

- Un faible courant poste arc de : -0.64 A

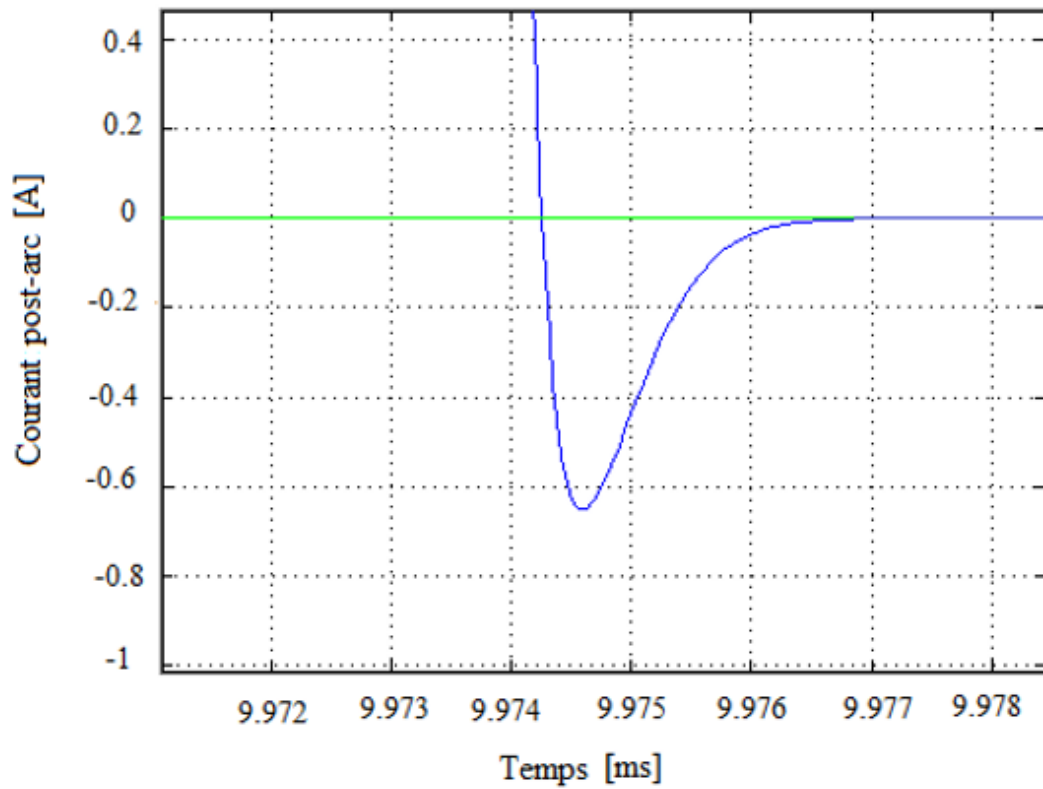


FIGURE 4.12 – Courant post arc .

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

- Une TTR maximale de : -84.13 kV.
- Un pic d'extinction : 2.746 kV.

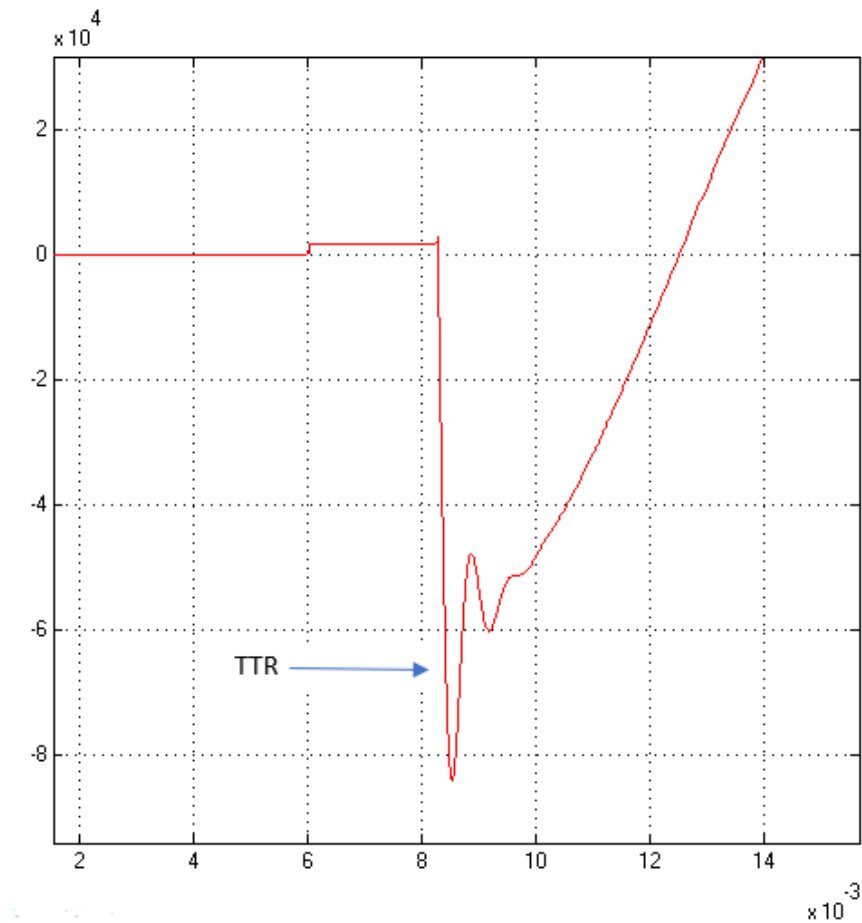


FIGURE 4.13 – Tension transitoire de rétablissement (TTR) en fonction du temps.

et on a obtenue ce courant et cette tension d'arc pour une interruption d'arc de 21.2 KA .

On Compart avec les résultats réel obtenue par Lou Van Der Sluis dans un laboratoire a haute tension [35].

Ce modèle donne une interruption réussie d'un défaut proche en ligne comme c'est le cas dans dans l'essai , car le courant s'annule après son passage par zéro et la tension transitoire de rétablissement (TTR) s'amortie.

## 4.6 Conclusion

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

La modélisation des disjoncteurs  $SF_6$  haute tension, plus précisément la modélisation de l'arc dans le disjoncteur SF6 haute tension, est une aide appréciable à la compréhension des phénomènes de coupure.



#### CHAPITRE 4. SIMULATION DE LA COUPURE D'UN DÉFAUT PROCHE EN LIGNE EN UTILISANT LE MODÈLE DE MAYR MODIFIÉ

---

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

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le disjoncteur  $SF_6$  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.

Le phénomène d'interruption d'un courant par le disjoncteur  $SF_6$  HT engendre l'apparition d'un arc électrique sévère dans sa chambre de coupure, que le disjoncteur est chargé de maîtriser et d'éteindre pour réussir l'interruption et le fonctionnement.

L'arc électrique est un phénomène important qui détermine le fonctionnement du disjoncteur à haute tension. L'utilisation d'outils de modélisation et de simulation peut contribuer à améliorer ces dispositifs. Le type de modèle à appliquer peut varier selon l'objet de la simulation. La modélisation à boîte noire est suffisante pour étudier l'interaction arc-circuit.

La modélisation et la simulation de l'arc électrique par le modèle d'arc à boîte noire de Mayer modifier, nous ont permis de donner une description assez précise sur le comportement dynamique du courant et de la tension de l'arc électrique, qui seront pris en considération afin de déterminer pour un emplacement donné dans le réseau électrique :

- \* Le dimensionnement de la chambre de coupure afin d'assurer la bonne isolation.
- \* Le choix des différentes techniques afin d'optimiser et de réussir la coupure.
- \* La valeur de la tenue diélectrique en tension, qu'il faut qu'elle soit supérieure au  $\max(U_{arc})$ .
- \* La nécessité d'inclure le comportement électrique des disjoncteurs comme des éléments de réseaux électriques afin de mieux appréhender leur rôle et leur comportement.
- \* L'amélioration de la capacité d'interruption des disjoncteurs.
- \* Le couplage entre les expériences et la modélisation, afin de diminuer le nombre de test pour l'amélioration et la validation du disjoncteur.

- [1]  $\diamond$   $\diamond$  ART.065191 Schneider Electric - Cahier technique édition février 2008.
- [2] METZ-NOBLAT Calcul des courants de court-circuit Cahier technique no 158, édition octobre 2000.
- [3] BENHAMIDA HAKIM contribution à l'identification des courts-circuits, mémoire magister ANNABA 2007.
- [4] NADIR GHANEMI Etude de la tenue aux courants de court-circuit pour le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT, mémoire magister constantine 2008.
- [5] BENOIT DE METZ-NOBLAT Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques Cahier technique n° 18.
- [6] Dufournet " **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 2)** ", Dossier techniques de l'ingénieur d4692 document délivré le 09/05/2012. P4-5-6-15.
- [7] SERGE THEOLEYRE " **Les techniques de coupure en MT** ", Cahier technique n° 193 édition septembre 1998. P6-7-8-9—16-24-25.
- [8] DENIS DUFOURNET(**Appareillage électrique d'interruption HT partie2**) dossier Techniques de l'Ingénieur d4692 Document délivré le 09/05/2012.p 5-6.
- [9] S.VAQUIE, "L'arc électrique ", CNRS éditions, Paris, 2000, pp : 188-189.
- [10] J.A. MARTINEZ-VELASCO, "Modeling of circuit breakers using the type-94 component ", EEUG News February 1997, pp 55-66.
- [11] L. VAN DER SLUIS and W.R RUTGERS, "**The comparison of Tests Circuits with Arc Models**", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue : 2 1994 pp 137-142.
- [12] L. VAN DER SLUIS, W.R Rutgers, C.G.A. Koreman " **A physical arc model for the simulation of current zero behaviour of high-voltage circuit breakers**", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7 Issue : 2, April1992 pp 1016-1022.

- [13] J.A. MARTINEZ-VELASCO, "**Circuit Breaker Representation for TRV Calculations**", EEUG News Aug-Nov 1998, pp 77-87.
- [14] C. GUILLOUX, V. Therme, P.G. Scarpa, "**Measurement of the post-arc current of HV circuit breakers : application to short circuit tests with ITRV**", IEEE Trans. 1993, PWRD-8, (3), pp 1148-1153.
- [15] B. BLEZ, C. GUILLOUX, "**Post-arc current in high Voltage SF6 circuit- breakers when breaking at up to 63 KA**", IEEE Trans, 1989, PWRD-4, (2), pp 1056-1062.
- [16] H. A DARWISH and N. ELKALASHY, "**Comparison of Universal Circuit Breaker Arc Representation with EMTP Built-in Model**", International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-6.
- [17] L. R ORAMA and B. R. MEDINA, "**Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations**", International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-5.
- [18] R.P.P SMEETS, S. NISHIWAKI, "**Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers By Means of Current Zero Analysis**", IEEE trans., 2002, pp 424- 429.
- [19] R. P.P SMEETS and V. KERTÉSZ, "**Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a validated arc model**", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp : 121-125.
- [20] P. H SCHAVEMAKER and L. VAN DER SLUIS, "**An improved Mayr-Type arc model based on current-zero measurement**", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue : 2, April 2000 pages : 580-584.
- [21] P. H SCHAVEMAKER and L. VAN DER SLUIS, "**Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers**", IEE Proc. Sei. Meas. Technol., Vol. 149 N° 4, July 2002 pp 153-157.
- [22] D. VIGOUROUX. Études d'un nouveau disjoncteur haute tension. " Mémoire de Master2, Université Joseph Fourier, Siemens - 24 Juin 2008.
- [23] SERGE THEOLEYRE Les techniques de coupure en MT Cahier technique n° 193 édition septembre 1998.
- [24] YVES PELENC " **Appareillage électrique d'interruption à haute tension** " " **Interruption des circuits alimentés en courant continu** " dossier Techniques de l'Ingénieur D4 700 Document délivré le 09/05/2012, P 14-15- 16- 29-29-30-34. ...36.
- [25] YANN CRESSAULT " **Propriétés des appareils de coupure** " Laboratoire LAPLACE.
- [26] Mr BOUCHAHDANE Mohamed " **Etude des équipements de protection de la nouvelle ligne 400 kV en Algérie** ". Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister Juillet (2009), UMC.

- [27] " J. PASTEAU " **Introduction à l'appareillage très haute tension** ", Cahier technique n° 127 édition juin 1984 Schneider Electric, p11.
- [28] " R.P.P SMEETS et V. Kertész "**Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a valited arc model**", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp : 121-125.
- [29] YVES PELENC " **Interruption des circuits alimentés en courant continu** "DOSSIER Techniques de l'Ingénieur D4 701 Document délivré 1998.
- [30] Mme LAURE REYNARD " Modélisation tridimensionnelle de l'amorçage de l'arc électrique dans un disjoncteur basse-tension " Thèse doctorat à l'école centrale de Lyon. Février 2006 .
- [31] " **Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK**" International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT), Vol. 1, No.2, february 2013 ISSN (Print) 2277-7261.
- [32] L.ROBERT ; LAROCCA " **Personnel protection devices for us appliances**"IEEE Transaction on industrie application Vol,1-2 1992
- [33] ZEGHICHI LEYLA " **Etude D'une Décharge Electrique par la Méthode de Monte Carlo** " mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de magister à l'université de Batna. Avril 2010.
- [34] EEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 4, April 1983.
- [35] L.Van Der Sluis,Senior Member IEEE Power System Laboratory,Delft University of Technology,Mekelweg 4,2628 CD Delft the Netherlands.
- [36] High Valtsy-circuit-breaker-digital testing.
- [37] W.R Rutgers, Non Member KEMA, Transmission and Distribution Utrechtsweg 310, 6812 AR Arnhem the Netherlands.