

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2025



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER Académique

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par:

- FERRAG Borhan Eddine
- BENAYACHE Ahmed Badreddine

Thème

**Étude des performances des différentes techniques de coupure
dans les réseaux moyenne et haute tension.**

Soutenu publiquement, le 23/06 /2025, devant le jury composé de:

M. LEMZADMI Ahcenc	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BELOUCIF Faissel	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous remercions nos familles et nos proches pour leur soutien inconditionnel, leur encouragement et leur présence tout au long de cette aventure.

Nous remercions vivement notre encadreur Dr. Beloucif Faissel, pour ces orientations et ces conseils tout le long de ce travail.

Notre remerciement s'adresse aussi aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur en acceptons de juger ce travail.

Tous les enseignants du département d'électrotechnique, qui ont participé à notre formation durant tout notre cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de notre plus profond remerciement.

Résumé :

1. Effets de l'arc électrique dans les réseaux électriques :

Dans ce chapitre, nous discutons du réseau électrique ainsi que des défauts courants tels que les surtensions, les surintensités et les courts-circuits. Nous analysons ensuite le phénomène de l'arc électrique.

2. Différentes techniques de coupure :

Dans ce chapitre, nous présentons les principales technologies de coupure utilisées en moyenne et haute tension, notamment les disjoncteurs à huile, à vide, à air comprimé et au gaz SF₆. Nous discutons de leur principe de fonctionnement et de leurs avantages à travers une analyse technique et un tableau comparatif.

3. Caractérisation de quelques gaz utilisés en isolation électrique :

Dans ce chapitre, nous étudions les gaz isolants, principalement l'air et le SF₆. Nous présentons leurs propriétés physiques, chimiques et diélectriques, ainsi que leur comportement face à l'arc électrique. Nous abordons également les enjeux environnementaux liés à l'utilisation du SF₆. Ensuite, nous effectuons une série de calculs pour déterminer la puissance et l'énergie thermique dégagée par l'arc, en fonction de la durée et du courant. Enfin, nous modélisons un exemple de réseau pour calculer l'impédance équivalente et le courant de court-circuit.

Summary:

1.Effects of Electric Arc in Power Networks:

In this chapter, we discuss the structure of electrical power networks and common faults such as overvoltages, overcurrents, and short circuits. We then analyze the phenomenon of the electric arc, its causes, and its effects on the network.

2.Different Interruption Techniques:

In this chapter, we present the main interruption technologies used in medium and high voltage networks, including oil circuit breakers, vacuum circuit breakers, compressed air breakers, and SF₆ gas breakers. We discuss their operating principles and advantages through technical analysis and a comparative table.

3. Characterization of Gases Used in Electrical Insulation:

In this chapter, we study insulating gases, mainly air and SF₆. We present their physical, chemical, and dielectric properties, as well as their behavior during arc extinction. We also

address the environmental issues related to the use of SF₆. Then, we carry out a series of calculations to determine the power and thermal energy released by the arc, based on its duration and current. Finally, we model a sample electrical network to calculate the equivalent impedance and the short-circuit current.

الملخص :

1. تأثير القوس الكهربائي في الشبكات :

في هذا الفصل، نناقش بنية الشبكات الكهربائية والأعطال الشائعة مثل زيادة الجهد، وزيادة التيار، والدوائر القصيرة. ثم نقوم بتحليل ظاهرة القوس الكهربائي وتأثيرها على الشبكة.

2. تقنيات القطع المختلفة :

في هذا الفصل، نستعرض تقنيات الفصل المستخدمة في شبكات الجهد المتوسط والعالي، مثل قواطع الزيت، وقواطع الفراغ، والقواطع الهوائية، وقواطع غاز SF₆. نناقش مبدأ عمل كل نوع، ومميزاته وعيوبه، من خلال تحليل تقني وجدول مقارنة.

3. خصائص الغازات المستخدمة في العزل الكهربائي:

في هذا الفصل، ندرس الغازات العازلة، وخاصة الهواء و SF₆. نعرض خصائصها الفيزيائية والكيميائية والعازلية، وسلوكها أثناء إطفاء القوس، بالإضافة إلى الآثار البيئية المترتبة على استخدامها. بعد ذلك، نقوم بحساب الطاقة الحرارية الناتجة عن القوس اعتماداً على مدته وشدة التيار، ثم نقوم بنمذجة شبكة كهربائية لحساب الممانعة المكافئة وتيار القصر.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale1

Chapitre I : Effets de l'arc électrique dans les réseaux électriques

I.1 Introduction4

I.2 Généralités sur les réseaux électriques4

I.2.1 Transport de l'énergie4

I.2.1.1 Centrale électrique4

I.2.1.2 Distribution de l'énergie électrique5

I.2.1.3 Les équipements en places5

I.2.2. Installation électrique6

I.2.2.1. Les choix d'une installation de dispositifs de protections6

I.2.2.2. Les jeux de barre6

I.2.3. Les phénomènes liés au courant et tension6

I.2.3.1 Variations de tension7

I.2.3.2 Les surtensions7

I.2.3.2.1 La classification des surtensions7

I.2.3.3 Les surintensités8

I.2.3.4 La surcharge9

I.2.3.5 Court-circuit9

I.2.4 Rigidité diélectrique et les isolants9

I.2.4.1 La rigidité diélectrique9

I.2.4.2 Les isolants10

I.2.5 Claquage électrique10

I.2.5.1 les problèmes liés au claquage de tension11

I.2.5.1.1 Défaillances des équipements électriques11

I.2.5.1.2 Risques pour la sécurité des personnes11

I.3 l'arc électrique11

I.3.1. Théorie de l'arc électrique12

I.3.2 Naissance d'un arc électrique à la coupure d'un circuit12

I.3.3 Rôle de l'arc électrique14

I.3.4 Les propriétés de l'arc électrique	14
I.3.4.1 Propriétés physiques	14
I.3.4.2 Propriétés électriques	15
I.3.5 Coupure par l'arc électrique	16
I.3.6 Processus de coupure avec l'arc électrique	17
I.3.6.1 La période d'attente	17
I.3.6.2 La période d'extinction	18
I.3.6.3 La période Post-Arc	18
I.4 Conclusion	18
Chapitre II : Différentes techniques de coupure	
II.1 Introduction	20
II.2 Les appareils de coupure	20
II.2.1 Les différents types d'appareils	20
II.2.2 Principales caractéristiques de l'appareillage électrique	21
II.2.3 Les sectionneurs	21
II.2.3.1 Constitution	21
II.2.3.2 Commande	21
II.2.3.3 Emploi	22
II.2.3.4 Conditions à remplir	22
II.2.4 Interrupteur	23
II.2.4.1 Rôle	23
II.2.4.2 Pouvoir de coupure	23
II.2.4.3 Pouvoir de fermeture	23
II.2.5 Interrupteur aérien à commande mécanique (IACM)	23
II.2.5.1 Rôle	24
II.2.6 Disjoncteur	24
II.2.6.1 Caractéristiques fondamentales du disjoncteur	24
II.2.6.2 Constitution du disjoncteur	25
II.3 Différent type de disjoncteur en (MT/HT)	25
II.3.1 Disjoncteur à huile	25
II.3.1.1 Principe de fonctionnement des disjoncteurs à huile	26
II.3.1.2 les avantages de disjoncteur à huile	26
II.3.1.3 les Inconvénients de disjoncteur à huile	27
II.3.2 Disjoncteurs avec ampoules à vide	27

II.3.2.1 Principe de fonctionnement des disjoncteurs à vide	28
II.3.2.2 les avantages de disjoncteur à vide	28
II.3.2.3 les Inconvénients de disjoncteur à vide	28
II.3.3 Disjoncteur à air comprimé	29
II.3.3.1 Principe de fonctionnement des disjoncteurs à air comprimé	29
II.3.3.2 les avantages de disjoncteur à air comprimé	30
II.3.3.3 les Inconvénients de disjoncteur à air comprimé	30
II.3.4 Disjoncteur à gaz SF6 (Hexafluorure de soufre)	30
II.3.4.1 Historique	30
II.3.5 Disjoncteur auto-pneumatique	31
II.3.5.1 Principe de fonctionnement de Soufflage auto-pneumatiques	32
II.3.5.2 Caractéristiques des disjoncteurs SF6	32
II.3.6 Disjoncteur à auto-soufflage	33
II.3.6.1 Caractéristiques des disjoncteurs SF6	34
II.3.6.2 Principe de fonctionnement d'auto-soufflage	34
II.4 Comparaison des Techniques de Coupure Électrique	35
II.5. Conclusion	36
Chapitre III : Caractérisation de quelques gaz utilisés en isolation électrique	
III.1. Introduction	38
III.2. L'air	38
III.2.1. Composition de l'air	38
III.2.2. Quelques propriétés de l'air	38
III.2.2.1. Volume et pression de l'air	38
III.2.2.2. L'air est compressible et expansible	39
III.2.2.3. Propriétés diélectriques de l'air	39
III.3. L'hexafluorure de soufre SF6	46
III.3.1. Définition	46
III.3.2. Propriétés physicochimiques	46
III.3.3. Propriétés diélectriques	47
III.3.4. Rigidité diélectrique	48
III.3.5. Pureté	48
III.3.6. Effet de serre	49
III.4 Méthode de calcul de l'énergie thermique évacuée par l'arc dans le SF6	50
III.4.1 Déterminer la puissance de l'arc	50

III.4.2 Intégrer la puissance sur la durée d'arc	51
III.4.3 Évaluer l'énergie thermique évacuée	51
III.4.3.1 Masse de SF ₆ concernée	51
III.4.4 Rendement thermique et pertes	52
III.5 Calcul de l'énergie évacuée	52
III.5.1 Relation entre le courant de court-circuit et le courant d'arc	54
III.6. Etude et calcule un réseau électrique	54
III.6.1. Calcule de l'Empédance équivalent	55
III.6.2. Calcule courant de défaut	57
III.7 Conclusion	57
Conclusion générale	58

Liste des figures

Figure I.1 Organisation du transport et de la distribution d'énergie électrique.

Figure 1.2 : Jeu de barres MT

Figure 1.3 : Décharge électrique dans l'air

Figure I.4 : circuit électrique

Figure I.5 : Explication simplifiée relative à un fonctionnement sur court-circuit ($Z_c=0$)

Figure I.6 : l'arc électrique, son phénomène physique (a) et sa tension caractéristique tension d'arc U_a (b).

Figure I.7 : schéma simplifié d'un réseau électrique

Figure II.1 : différents types de Sectionneurs

Figure II.2 : Interrupteur aérien à commande mécanique (IACM).

Figure II.3 : Disjoncteur à vide

Figure II.4: Disjoncteur à huile

Figure II.5 : Disjoncteur à air comprimé.

Figure II.6: Principe des disjoncteurs auto-pneumatiques

Figure II.7 : Disjoncteur 115 kV au Canada

Figure II.8 : Principe des disjoncteurs à auto-soufflage

Figure II.9 : Principe des disjoncteurs à auto-soufflage et double volume

Figure II.10 : Disjoncteur à auto-soufflage à double mouvement des contacts

Figure III.1: Tracé de tension de claquage pour quelques gaz en fonction du produit pd

Figure 1II.2 : Tension de claquage de l'Air pour ; a) $P = 1\text{bar}$, b) $P = 4\text{ bars}$, c) $P = 6\text{ bars}$.

Figure 1II.3 : Structure moléculaire de SF_6 .

Figure III.4 : Fuite du gaz pendant le mouvement des contacts.

Figure III.5 : Schéma éclectique du réseau

Figure III.6 : LE réseau positif équivalent d'ordre de 34.5 KV.

Liste des tableaux

Tableau I-1 Caractéristiques des différents types de surtension

Tableau II.1 : Principales caractéristiques de l'appareillage électrique

Tableau II.2: Tableau Comparatif des Technique coupure

Tableau III.1 : Spécification de la pureté pour le SF₆ utilisé dans les dispositifs haute tension

Tableau III.2 : Les constantes A et B pour différents gaz ; et les gammes de E/p où la formule est valide

Liste des symboles

THT : Les réseaux de transport à très haute tension.

HT : Haute Tension

MT : Moyennes tensions

BT : Basses tensions

U : Tension en unité réelle (kV)

α^* : coefficient d'ionisation primaire effectif

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne (Ω).

E : le champ en kV/cm

F : Section du conducteur.

CC : Court-circuit

TGBT : tableau général basse tension

J : la densité de courant

TRV : tension de récupération transitoire

PDC : distribution du courant basé sur la puissance

XLPE : polyéthylène réticulé

Wa : Energie d'arc

Ua : la chute de tension

HTA : haute tension A

HTB : haute tension B

IACM : interrupteur aérien à commande mécanique

Ue : Tension assignée d'emploi

Ir : Courant de réglage

Ie : Courant assignée d'emploi

In : Courant de fonctionnement

Icu : le pouvoir de coupure des disjoncteurs industriels

Icn : le pouvoir de coupure des disjoncteurs domestiques.

SF6 : Hexafluorure de soufre

V_t : volume d'expansion thermique

V_p : volume d'expansion pneumatique

N₂ : l'azote

CO₂ : dioxyde de carbone

ε₀ : permittivité relative

α : premier coefficient de Townsend

CCF : composé complètement fluoré

CNTP : conditions normales de température et de pression

PEG : potentiel d'échauffement global

CEI 60376 : la norme de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre SF₆ pour utilisation dans les appareils électriques

CEI 61634 : la norme de l'appareillage à haute tension – Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre SF₆ dans l'appareillage à haute tension

CEI 62271 : la norme de l'appareillage à haute tension, précise les conditions d'étanchéité requises pour les installations à gaz

SOF₂ : le fluorure de thionyle

SO₂F₂ : le fluorure de sulfuryle

S₂F₁₀ : le déca fluorure de soufre

F_p : Le taux de fuite

CEI 60068-2-17 : la norme des procédures de contrôle du taux de fuite

t₀ : instant d'amorçage de l'arc.

t_f : instant d'extinction (souvent au passage par zéro du courant).

P_{arc} : comme constant sur la durée t_{arc}.

U_{arc}(t) : tension d'arc instantanée [V]

I_{arc}(t) : courant d'arc instantané [A]

Q_{SF6} : L'énergie thermique évacuée

η : efficacité d'évacuation thermique

ρ_{SF6} : densité volumique du gaz (environ 6,17 kg/m³ à 1 bar et 20°C)

V_{chambre} : Volume de la chambre d'interruption (~10⁻³ à 10⁻² m³ selon le disjoncteur)

m_{SF6} : Masse de SF₆ concernée

C_p : capacité calorifique spécifique ($\approx 0,65$ kJ/kg·K à P~1 bar).

T_{arc} : température finale (peut atteindre 20,000 K).

T_0 : température initiale (~ 300 K).

Δh_{diss} : énergie spécifique de dissociation (≈ 1 à 2 MJ/kg)

U_{arc} : Tension d'arc

t_{arc} : Durée de l'arc

U : est la tension du réseau

Z_{cc} : est l'impédance du circuit au moment du court-circuit.

N_0'' : le nombre total des nouveaux électrons arrachés de la cathode dans le deuxième processus

I_0 : est le courant initial crée à la surface cathodique

N_d : le nombre d'électrons

γ : deuxième coefficient de Townsend

pd : fonction du produit

p : pression exprimée en Torr

I_{nom} : courant nominal

Z_{bas} : l'impédance équivalent

Introduction générale :

Les techniques de coupure constituent l'un des éléments essentiels pour la protection des réseaux électriques, car la fiabilité, la sécurité et la continuité de l'alimentation électrique dépendent en grande partie des dispositifs de coupure utilisés dans ces réseaux, en particulier pour moyenne et haute tension.

Ces techniques sont utilisées pour couper le courant électrique du réseau pour plusieurs raisons, notamment la réparation des pannes au sein du réseau et l'amélioration de la qualité du réseau à travers la mise à jour des équipements. Cela vise à protéger les personnes et à garantir la sécurité des installations.

Avec l'augmentation continue de la consommation énergétique et la croissance du nombre d'installations industrielles nécessitant une forte énergie électrique, les centrales électriques se voient dans l'obligation d'accroître considérablement leur production d'énergie. Cette hausse de la production peut avoir des répercussions négatives sur les dispositifs de coupure si les différentes techniques de coupure ne sont pas étudiées de manière approfondie dans le cadre des réseaux électriques.

Le phénomène d'arc électrique constitue l'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés les réseaux électriques, car il peut gravement endommager les systèmes de coupure en place. C'est pourquoi le premier chapitre de ce travail sera consacré à l'étude de l'impact de l'arc électrique sur les réseaux électriques. Nous commencerons par une synthèse générale sur les réseaux électriques, en évoquant les différentes pannes et perturbations causées par certains phénomènes, parmi lesquels l'arc électrique occupe une place centrale. Ce phénomène fera ensuite l'objet d'une analyse détaillée visant à évaluer son impact sur les réseaux ainsi que ses principales causes, qu'elles soient d'origine interne ou externe au réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté plusieurs techniques de coupure électrique, telles que les disjoncteurs à huile, à air comprimé, à vide, ainsi que ceux utilisant le gaz SF₆, ce dernier étant considéré comme l'une des techniques de coupure les plus efficaces et les plus sûres pour réduire la probabilité d'apparition de l'arc électrique.

Dans le troisième chapitre, nous procéderons à une étude des caractéristiques propres à chaque technique de coupure, en mettant particulièrement l'accent sur les disjoncteurs à gaz SF₆, qui constituent l'élément clé, notamment dans les réseaux à moyenne et haute tension. Cela nous

permettra d'acquérir une compréhension globale et approfondie des niveaux d'isolation offerts par chaque technique.

Dans ce cadre, cette étude vise à réduire les phénomènes ayant un impact négatif sur le réseau électrique, en comparant les performances des principales techniques de coupure utilisées dans les réseaux moyenne et haute tension. L'objectif est de mettre en lumière les critères de sélection permettant d'identifier la technique la plus apte à garantir un niveau d'isolation optimal.

Chapitre I

Effets de l'arc électrique dans les réseaux électriques

I.1 Introduction :

Les réseaux à haute tension constituent l'un des éléments les plus importants des systèmes électriques, et garantir la continuité de l'alimentation en leur sein représente un défi majeur. Au cours de mes études, j'ai constaté que l'un des risques les plus notables auxquels ces réseaux sont exposés est constitué par les pannes soudaines, telles que **l'arc électrique**, qui peut provoquer des dommages considérables. Ainsi, dans ce chapitre, j'aborderai l'impact de ce phénomène sur les systèmes électriques, en examinant ses causes, ses conséquences, ainsi que les moyens utilisés pour en limiter les effets, en particulier les dispositifs de coupure.

I.2 Généralités sur les réseaux électriques

I.2.1 Transport de l'énergie

L'énergie électrique est fournie du réseau principal au consommateur selon des critères à la fois techniques et économiques, conformément aux conditions connues, à savoir : la continuité du service et le maintien des caractéristiques et de la qualité de la tension électrique.

Maintien des normes de sécurité.

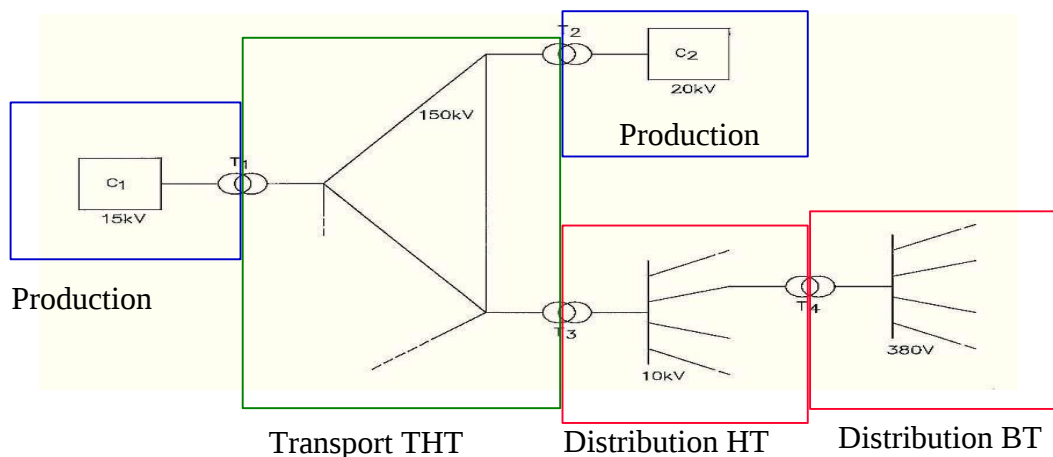


Figure I.1 : Organisation du transport et de la distribution d'énergie électrique

I.2.1.1 Centrale électrique

La centrale électrique : c'est une installation industrielle destinée à convertir une forme d'énergie (thermique, hydraulique, solaire, nucléaire, éolienne, etc.) en énergie électrique. Cela se

fait à l'aide d'équipements et de dispositifs spécifiques tels que les turbines, les générateurs, les transformateurs, etc.

Les centrales électriques constituent un élément très important dans la production d'électricité, et elles sont généralement reliées au réseau de transport et de distribution pour fournir de l'énergie électrique aux consommateurs.

I.2.1.2 Distribution de l'énergie électrique :

La distribution de l'énergie électrique est l'étape finale de la livraison de l'énergie électrique ; elle transporte l'électricité du système de transmission aux consommateurs individuels. Les lignes de distribution primaires acheminent cette énergie à moyenne tension vers les transformateurs de distribution situés près des locaux des clients.

I.2.1.3 Les équipements en places :

Nous parlons plus en détail de tous les équipements de la phase 3.

Nous commençons par le transformateur de puissance :

- Transformateur :

Un transformateur est un composant passif qui transfère l'énergie électrique d'un circuit électrique à un autre circuit, ou à plusieurs circuits. Un courant variable dans une bobine du transformateur produit un flux magnétique variable dans le noyau du transformateur, qui induit une force électromotrice variable dans toutes les autres bobines enroulées autour du même noyau.

- Disjoncteur :

Un disjoncteur est un dispositif de sécurité électrique conçu pour protéger un circuit électrique contre les dommages causés par une surintensité ou un court-circuit. Sa fonction de base est d'interrompre le passage du courant pour protéger les équipements et prévenir les risques d'incendie.

- Sectionneur :

Le sectionneur est un appareil électromécanique permettant de séparer, de façon mécanique, un circuit électrique et son alimentation, tout en assurant physiquement une distance de sectionnement satisfaisante électriquement. L'objectif peut être d'assurer la sécurité des personnes travaillant sur la partie isolée du réseau électrique ou bien d'éliminer une partie du réseau en fonctionnement pour pouvoir en utiliser les autres parties.

I.2.2. Installation électrique :

I.2.2.1. Les choix d'une installation de dispositifs de protections :

Le choix d'un disjoncteur doit se faire en fonction [1] :

- Des caractéristiques du réseau sur lequel il est installé.
- De la continuité de service.
- Des diverses règles de protection à respecter.

On peut citer quatre types de disjoncteur [2] :

- Disjoncteur magnétothermique ;
- Disjoncteur différentiel ;
- Disjoncteur électrothermique ;
- Disjoncteur électromagnétique ;

I.2.2.2. Les jeux de barre :

Les jeux de barre à basse tension sont destinés à assurer le transport d'énergie électrique entre élément d'une installation la fournissant (générateur, transformateur...) et la répartissant, tableaux général basse tension (TGBT)

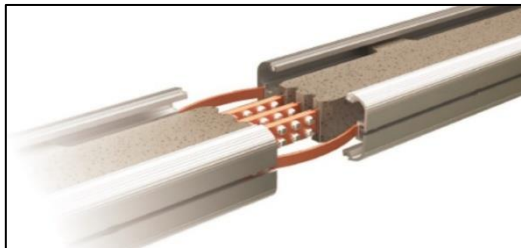


Figure I.2 : Jeu de barres MT.

I.2.3. Les phénomènes liés au courant et tension :

Dans une installation électrique, l'énergie nécessaire au fonctionnement des récepteurs est délivrée de manière appropriée. Ces récepteurs consomment une puissance électrique qui dépend directement de l'intensité du courant les traversant et de la tension présente à leurs bornes.

Ces deux grandeurs électriques influencent directement la conception des appareillages :

- **Intensité du courant :**

Elle détermine les capacités de coupure et de fermeture des dispositifs. En effet, lors de l'ouverture d'un circuit électrique, un arc électrique se forme systématiquement, posant un défi majeur pour les appareillages électromécaniques.

- **Tension d'alimentation :**

Elle définit les distances d'isolement requises entre les bornes et les contacts des dispositifs.

I.2.3.1 Variations de tension :

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.

Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25Hz. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme Flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs. [3]

I.2.3.2 Les surtensions :

Les surtensions correspondent à des pics temporaires de tension qui dépassent la tension normale d'un système électrique. Elles peuvent être de nature impulsive (comme celles causées par la foudre) ou transitoires liées à la manœuvre (lors de l'ouverture ou fermeture de circuits). Elles constituent un danger significatif pour l'isolement des équipements et peuvent provoquer des courts-circuits, des pannes d'appareils ou une détérioration accélérée des matériaux isolants.

I.2.3.2.1 La classification des surtensions :

La classification des surtensions permet de les regrouper selon certains critères, comme la durée, la nature de la variation.

- **Manœuvre** : surtension causée par des opérations de coupure ou de commutation dans le réseau (ex. : ouverture ou fermeture d'un disjoncteur).

- **Temporaire** : surtension qui dure plus longtemps (de quelques cycles à plusieurs secondes), souvent liée à un déséquilibre ou à un défaut à la terre.
- **Rapide** : surtension de courte durée (quelques microsecondes à millisecondes), souvent liée à des commutations rapides.
- **Très rapide** : surtension de très courte durée (quelques nanosecondes), généralement d'origine impulsive (ex. : décharge de foudre).
- **Apériodique** : variation non répétitive, souvent en forme d'impulsion (comme une surtension due à la foudre).
- **Périodique** : variation répétitive dans le temps (ex. : oscillation suite à une perturbation dans le réseau).

Types de Surtension	coefficient de surtension MT-HT	durée	raideur du front fréquence	amortissement
A fréquence industrielle (défaut d'isolement)	$\geq \sqrt{3}$	Longue >1s	fréquence industrielle	faible
De manœuvre interruption de court-circuit	2 à 4	Courte 1ms	moyenne 1 à 200 kHz	moyenne
Atmosphérique (coup de foudre directe)	>4	très courte 1 à 10 μ s	très élevée 1000 Kv/ μ s	fort

Tableau I-1 Caractéristiques des différents types de surtension.

I.2.3.3 Les surintensités :

Une surintensité est un phénomène électrique se manifestant par un courant dont l'intensité dépasse la valeur maximale admissible par un circuit, un câble ou un appareil électrique. Elle est le résultat d'une sollicitation anormale du réseau, pouvant être d'origine accidentelle ou due à un dysfonctionnement d'un équipement.

I.2.3.4 La surcharge :

Une surcharge électrique se produit lorsque l'intensité du courant dans un circuit dépasse la valeur nominale prévue pour les conducteurs, les appareils ou les équipements. Cela peut entraîner une élévation excessive de la température, provoquant un échauffement, un vieillissement prématuré, voire un risque d'incendie si la surcharge persiste.

I.2.3.5 Court-circuit :

Il s'agit d'un contact accidentel de faible impédance entre deux points d'un circuit normalement isolés (par exemple entre phase et neutre, ou phase et terre). Ce type de défaut provoque une élévation très rapide et importante du courant pouvant atteindre plusieurs kilo ampères. Il représente un danger majeur pour les équipements, les installations et les personnes.

I.2.4 Rigidité diélectrique et les isolants :

I.2.4.1 La rigidité diélectrique :

Un phénomène de division diélectrique est observé lorsque des tensions de croissance sont utilisées en continu ou alternativement entre deux électrodes situées de chaque côté de l'isolation. Du point de vue du génie électrique, ce dernier se traduit par l'apparence brutale des courants de haute intensité. Cela indique un passage presque instantané dans l'état de ligne entre les électrodes connectées aux électrodes avec des circuits courts. En utilisant des matériaux fixes, cette évaluation conduit généralement à une perforation irréversible du diélectrique

La rigidité diélectrique est définie comme la valeur limite du champ électrique que peut supporter un isolant avant que le claquage ne se produise. Elle s'exprime classiquement en kilovolts par millimètre (kV/mm), en volts par micromètre (V/ μ m), ou encore en méga volts par mètre (MV/m), en fonction des protocoles normalisés et des conditions expérimentales de mesure. La rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

I.2.4.2 Les isolants :

En raison du manque virtuel d'électrons libres, les matériaux dits isolants ou diélectriques se distinguent par une très haute résistance par ordre de 10^{12} à 10^{22} . Cette caractéristique devient un élément essentiel pour contrôler les phénomènes électriques.

La performance d'une isolation est évaluée par plusieurs critères :

- Ses propriétés électriques (résistance, rigidité diélectrique)
- Mécanique (résistance à l'effort physique),
- Chimique (stabilité face à l'humidité, à la corrosion ou à l'agent agressif).

I.2.5 Claquage électrique :

En réseaux électriques, les cotes diélectriques correspondent à la rupture des matériaux d'isolation électrique des matériaux qui sont soumis à des champs électriques dépassant la rigidité diélectrique. Ce phénomène se manifeste par la formation d'arches électriques par des diélectriques qui affectent les propriétés inductives



Figure I.3 : Décharge électrique dans l'air

Avec les condensateurs, si la tension appliquée dépasse le seuil critique, le courant atteint la tension qui permet au diélectrique de circuler. Ce dernier dépend à la fois de la structure géométrique de l'élément et des propriétés inhérentes de l'isolation, en particulier sa rigidité diélectrique. Ceci est généralement exprimé en KV / mm. Le passage du courant entraîne des décharges brutales qui peuvent endommager irréversiblement l'isolation. Cependant, certains diélectriques tels que l'air et le SF₆, ont des capacités d'auto -réglage, permettant une récupération partielle de l'isolation après une collision.

L'oscillogramme connecté met en évidence ce mécanisme du circuit dans lequel le condensateur est connecté en parallèle avec la charge inductive. Lorsque le circuit est ouvert, l'énergie stockée dans l'inductance est transférée au condensateur, provoquant une augmentation rapide de la tension terminale. Lorsque cette tension dépasse la tension d'évaluation, de

nombreuses puces consécutives produiront des vibrations relaxées. Chaque rapport important aborde une baisse soudaine de la tension. Après certains cycles, une dégradation irréversible du condensateur se produit, conduisant à une défaillance globale.

I.2.5.1 les problèmes liés au claquage de tension :

I.2.5.1.1 Défaillances des équipements électriques

Le claquage compromet l'intégrité de nombreux équipements :

- Transformateurs de puissance

Défaillance catastrophique jusqu'à l'explosion du dispositif suivi des transformateurs, peut évaluer l'isolation interne, généralement composée de papier imprégné d'huile minérale. Entre le rouleau ou les courbes, il peut entraîner un incendie.

- Câbles électriques

Les câbles d'isolation solide (tels que XLPE) sont exposés à des quantités excessives lorsqu'elles sont affectées par des erreurs de fabrication, des dommages mécaniques ou des limites de tension excessives associées au vieillissement immature. Une défaillance peut entraîner une panne de courant difficile à repérer et à réparer.

- Condensateurs

Dans les condensateurs, l'étendue critique de la diélectrique interne provoque une décharge soudaine, parfois suivie par l'échauffement et l'effondrement du boîtier. Les matériaux auto-préventifs peuvent limiter les dégâts, mais au-delà de nombreux ongles, l'appareil devient irréversible.

I.2.5.1.2 Risques pour la sécurité des personnes

Un claquage peut générer un arc électrique extrêmement chaud ($>20\,000\text{ °C}$), entraînant :

- des brûlures graves,
- des projections de métal fondu,
- une surpression pouvant causer des blessures physiques,
- des risques d'incendie ou d'explosion, en particulier dans des environnements industriels.

I.3 l'arc électrique :

L'arc se crée par une ionisation du milieu isolant (généralement l'air), cette ionisation a lieu d'autant plus facilement que les surfaces conductrices sont proches.

Une fois ionisé, le gaz crée un canal conducteur qui entraîne le reste de la charge présente sur la surface de départ. L'arc continue alors, même si les surfaces s'écartent l'une de l'autre et pour autant que la différence de potentiel reste suffisante, mais plusieurs ordres de grandeurs sous le **champ électrique** critique sont nécessaires pour ioniser l'air. [4]

I.3.1. Théorie de l'arc électrique :

Les activités d'exploitation, de maintenance et de protection des réseaux électriques, peu importe leur genre, ont poussé les constructeurs à porter un intérêt particulier sur la conception des dispositifs de coupure, tant en haute qu'en basse tension. Il a ainsi évolué en une composante essentielle de contrôle et de sécurité qui s'est capable d'interrompre le courant pendant les situations de besoin ou d'anomalies. L'appareil doit, au moment d'ouvrir le circuit, neutraliser l'énergie électromagnétique qui a été stockée dans le réseau pendant son fonctionnement tout en soutenant les surpressions qui sont estompées. Accompagnant l'énergie, l'over voltage est le facteur de l'arc électrique au lieu de coupure de disjoncteur. Le but d'un disjoncteur est de mieux tirer parti des performances de cet arc afin d'émouvoir puissamment l'énergie. Ce but est amplement de transférer la charge thermique avec le milieu extérieur à travers une ventilation disloquée par des électrodes électriques tout en réduisant les surpressions à la fermeture de disjoncteur. L'atteinte de la construction rationnelle de ces machines d'expérience affine les concepteurs des sous terrains, il est primordial de comporter l'arc électrique lors qu'il est simulé comme confertiens l'arc électrique.

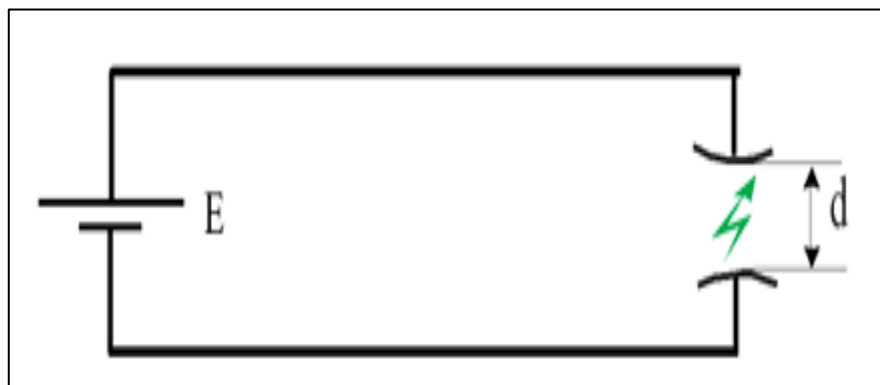


Figure I.4 : circuit électrique.

I.3.2 Naissance d'un arc électrique à la coupure d'un circuit :[5]

A la coupure d'un circuit d'impédance Z_c , naît généralement un arc électrique entre les contacts de l'organe de manœuvre (interrupteur, disjoncteur). Ce fait marquant, qui intervient principalement sur forte surcharge (ou court-circuit) lorsque la séparation des pôles est dépendante

des éléments de contrôle de la surintensité, se produit également sur ouverture non spontanée et - à un degré moindre- sur fermeture.

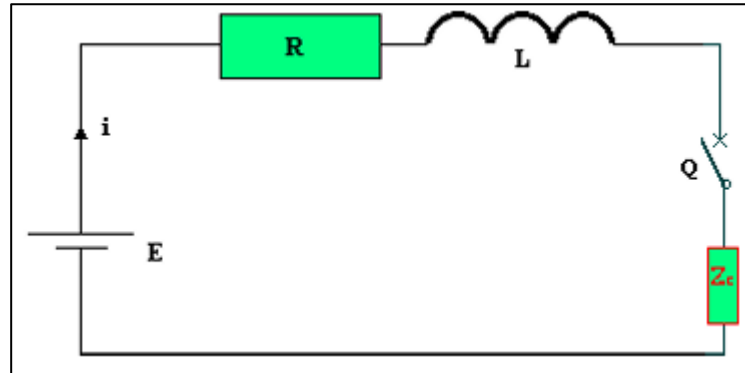


Figure I.5 : Explication simplifiée relative à un fonctionnement sur court-circuit ($Z_c=0$).

L'interrupteur « idéal » devrait assurer une coupure quasi instantanée ($t=0$) avec une énergie dissipée ses pôles :

$$R \times I^2 \times T = 0 \quad (\text{I.1})$$

En réalité, au moment de la coupure, la résistance r des pôles du disjoncteur Q ci-dessus va passer d'une valeur presque nulle à une valeur très élevée.

- L'énergie de coupure prend la forme :

$$\int r i^2 dt = \int (E - R \times i) \times i dt + \int L i di \quad (\text{I.2})$$

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

D'autre part, dès les premiers instants de l'écartement des pôles, la densité de courant $j = \frac{i}{s}$ va considérablement augmenter du fait de la diminution de la surface de contacts. Ceci entraîne un échauffement très localisé qui a pour effet d'ioniser le fluide isolant en abaissant sa rigidité diélectrique : un arc apparait avec ses effets négatifs.

I.3.3 Rôle de l'arc électrique

L'existence de l'arc électrique est indispensable dans les appareils de coupure. En effet, pour permettre la coupure d'un courant électrique, il suffit que la résistance de l'interrupteur, initialement nulle, augmente et devienne infinie. Ceci est un des principes fondamentaux qui régissent l'interruption des courants électriques. Lorsque cette condition est réalisée, l'appareil devient isolant.

En théorie, pour couper instantanément un courant électrique à l'aide d'un interrupteur idéal, il faudra passer directement d'un état conducteur à un état isolant.

Dans ce cas, l'appareil devra être capable :

- De supporter la surtension infinie ($L \frac{di}{dt}$) qui apparaît à ses extrémités. Ce phénomène conduirait au claquage diélectrique.
- Absorber toute l'énergie électromagnétique accumulée dans le réseau avant la coupure, du fait de la nature inductif du réseau. [5]

I.3.4 Les propriétés de l'arc électrique :

L'arc électrique est composé de deux sortes de propriété qui sont comme suite :

- Propriétés physiques
- Propriétés électriques

I.3.4.1 Propriétés physiques :

Dès la séparation de deux contacts, l'un (cathode) émet des électrons, l'autre (anode) les reçoit. Le phénomène d'émission des électrons étant par nature énergétique, la cathode sera chaude. Le pied d'arc devenant ainsi thermionisé les électrons sont majoritairement émis au point chaud, d'où un phénomène de stagnation de l'arc pouvant créer des vapeurs métalliques. Ces vapeurs et le gaz ambiant vont dès lors être ionisés, d'où :

- D'avantage d'électrons libres.
- création d'ions positifs qui retombent sur la cathode et entretiennent son échauffement.
- création d'ions négatifs qui en bombardant l'anode provoquent son échauffement.

L'ensemble de toute cette agitation se fait dans une colonne de plasma à haute température,

4 000 à 20 000 K, suivant le courant et le Confinement de celle-ci. [6]

I.3.4.2 Propriétés électriques :

La plus notable est de faire apparaître une tension d'arc dont la valeur a : v une partie fixe, $U_{AC} \approx 20$ à 40 V, qui apparaît dès la moindre séparation des contacts (fonction des matériaux utilisés), v une partie variable, $U_L = 50$ à 100 V/cm, quand l'arc est stabilisé en allongement dans son contexte d'équilibre pression-température.

Soit une valeur totale

$$u_a = U_{AC} + U_L. \quad (I.3)$$

A noter que :

- le signe de u_a change en même temps que le signe du courant d'arc,
- la valeur du courant d'arc n'influe pas fondamentalement sur la tension d'arc,

Cela tient au fait que l'arc « travaille » à densité de courant ($j = i/s$) presque constante (les sections des taches anodiques et cathodiques, ainsi que celle de la colonne d'arc sont proportionnelles au

Courant, d'où par analogie avec une résistance :

$$P = RI = \rho \frac{l}{s} i = \rho l j = \text{« Constant »} \quad (I.4)$$

Une énergie d'arc est produite

$$W_a = \int U_a i_a dt \quad (I.5)$$

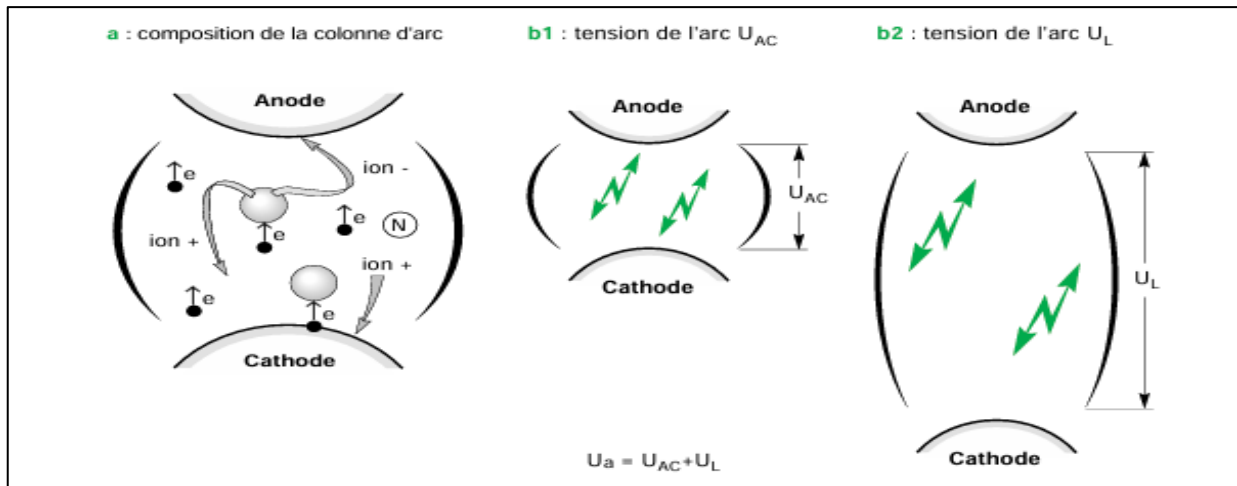


Figure I.6 : l'arc électrique, son phénomène physique (a) et sa tension caractéristique tension d'arc U_a (b).

Si l'arc est placé dans un champ magnétique, il est soumis aux forces de Laplace,

$$F = Bil \sin \alpha \quad (I.7)$$

Ce qui a pour effet de le cintrer si $\vec{B}$ est perpendiculaire à $\vec{i}$ puis de le déplacer transversalement. [7]

I.3.5 Coupure par l'arc électrique [8]:

Dans le circuit de la figure I.7 on a une représentation simplifiée d'un réseau électrique composé d'une résistance R , d'une inductance L et d'un disjoncteur A . On note $e(t)$ la tension du réseau u_a , la tension d'arc qui apparaît dès l'ouverture du disjoncteur et $i(t)$, le courant traversant le circuit.

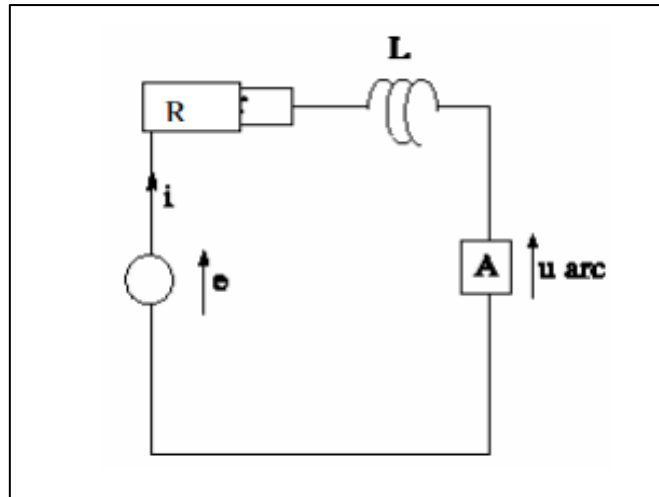


Figure I.7 : schéma simplifié d'un réseau électrique

On a:

$$e(t) - u_a = R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt} \quad (I.8)$$

En négligeant la résistance du circuit :

$$e(t) - u_a = L \frac{di}{dt} \quad (I.9)$$

On peut remarquer que la chute de tension u_a limite la croissance du courant $\frac{di}{dt}$; ce qui explique que nous devons augmenter la tension d'arc pendant la phase de coupure par allongement de la longueur de l'arc. La Figure I.5 représente l'évolution en fonction du temps :

- Du courant présumé,
- De la tension du réseau,
- De la tension d'arc.

I.3.6 Processus de coupure avec l'arc électrique :

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

I.3.6.1 La période d'attente :

C'est la période entre l'ouverture des contacts et le zéro du courant où l'arc électrique est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne est conductrice sous l'effet d'une température élevée due à l'énergie dissipée par l'arc. La tension entre les deux contacts s'appelle la tension d'arc et c'est une composante très importante dans le choix du milieu de coupure, car elle définit la valeur de l'énergie dissipée.[5]

I.3.6.2 La période d'extinction :

Lorsque le courant atteint zéro, l'arc électrique s'éteint, coupant ainsi le canal des molécules ionisées. Le milieu retrouve ses propriétés diélectriques, ce qui interrompt le flux de courant. La résistance de l'arc doit augmenter à mesure que le courant approche de zéro, cette résistance étant associée à l'ionisation du milieu. De plus, la capacité de refroidissement de l'appareil doit dépasser l'énergie libérée par l'arc qui est dissipée sous forme de chaleur en raison de l'effet Joule.

I.3.6.3 La période Post-Arc :

Afin d'assurer une interruption efficace, le rétablissement diélectrique du milieu doit se produire plus rapidement que l'évolution de la Tension de Récupération Transitoire (TRV). Sinon, une ré-étincelle de l'arc pourrait se produire. Le taux d'augmentation de la TRV joue un rôle essentiel dans la capacité d'interruption des dispositifs. Pour chaque tension standard, les réglementations définissent une enveloppe de tension de récupération transitoire (TRV) qui représente les exigences nominales. La Disruption du Courant Basée sur la Puissance (PDC) d'un disjoncteur est définie comme le courant maximum qu'il peut interrompre à la tension et à la TRV assignées. Par conséquent, pour toute TRV inférieure ou égale à la TRV spécifiée, le dispositif doit être capable d'interrompre tous les courants inférieurs à la PDC. Par exemple, pour une tension nominale de 24 kV, la TRV maximale pourrait atteindre 41 kV à un taux d'élévation typique de 0,5 kV/ms.

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence le rôle essentiel que jouent les réseaux à haute tension dans les systèmes de production et de distribution d'énergie électrique, ainsi que les défis inhérents à la garantie de la continuité de service au sein de ces réseaux.

L'étude a également porté sur l'impact du phénomène de l'arc électrique sur ces réseaux, en analysant les causes techniques susceptibles d'engendrer ce type de défaillance, ainsi que ses répercussions négatives sur la stabilité du système électrique.

Chapitre II

Différentes techniques de coupure

II.1 Introduction :

Les appareils de coupure sont des éléments clés du réseau électrique, leur rôle repose sur une approche de sécurité préventive. Ils consistent à interrompre le courant dans toutes les situations (normales ou anormales) et garantir la sécurité des installations et protéger les opérateurs. Il existe plusieurs technologies de coupure : disjoncteurs à huile, à vide, à air comprimé et surtout à gaz SF₆, qui constitue aujourd'hui une solution largement utilisée dans les réseaux HTA et HTB. L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement, les avantages et différentes techniques de coupure de l'arc dans chaque technique.

II.2 Les appareils de coupure :

Les appareils de coupure sont des moyens qui permettent de maîtriser une installation électrique en assurant plusieurs fonctions :

- Protection des réseaux contre les défauts.
- Raccordement des réseaux neufs.
- Mise hors tension d'une installation.
- Isolation d'une installation en défaut.

II.2.2 Les différents types d'appareils :

Les disjoncteurs :

- Appareil de coupure et de protection.
- Ayant un pouvoir de coupure très élevé (courant de court-circuit).

Les interrupteurs :

- Appareil de coupure.
- Ayant un pouvoir de coupure (courant nominal).

Les sectionneurs :

- Appareil de coupure.
- N'ayant aucun pouvoir de coupure (courant nul).

II.2.3 Principales caractéristiques de l'appareillage électrique :

Tension nominal	Distance d'isolement
Intensité nominale	Section de passage
Fonction de l'appareil	Coupure à vide, en charge ou en défaut
Technique utilisée	Extinction de l'arc
Lieu d'utilisation	Intérieur ou extérieur
Constructeur	Conception
Génération de l'appareil	Technologie et technique

Tableau II.1 : Principales caractéristiques de l'appareillage électrique.

II.2.4 Les sectionneurs :

Les sectionneurs sont des dispositifs électriques qui permettent de contrôler l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique à vide. Ils sont conçus sans dispositif de coupure d'arc, ce qui les distingue des autres équipements de sécurité électrique. En outre, ils sont dotés d'une capacité de fermeture qui permet de sécuriser l'installation en cas de défaillance du système. La coupure est visible à l'œil nu, ce qui facilite le diagnostic et la maintenance.

Le sectionneur remplit deux fonctions principales. D'une part, il permet d'isoler de façon visible un circuit, un appareil, une ligne ou un câble. D'autre part, il réalise un aiguillage.

II.2.4.1 Constitution :

Le sectionneur se compose des éléments suivants :

- Un ou 3 pôles principaux portés par des isolateurs.
- Un mécanisme de commande.
- Un châssis.
- Des contacts auxiliaires.

II.2.4.2 Commande :

La manœuvre d'un sectionneur est toujours provoquée par l'opérateur, La commande peut être :

- Manuelle et directe (BT).

- Manuelle par perche (HTA).
- Mécanique par tringlerie et poignée de manœuvre.
- Electrique, hydraulique ou pneumatique.

II.2.4.3 Emploi :

Les sectionneurs sont utilisés pour effectuer :

- A vide, des manœuvres d'isolement de la ligne ou de réseaux pour : entretien, visite, réparation.
- Des aiguillages électriques entre différents réseaux.
- En :BT, HTA, HTB.

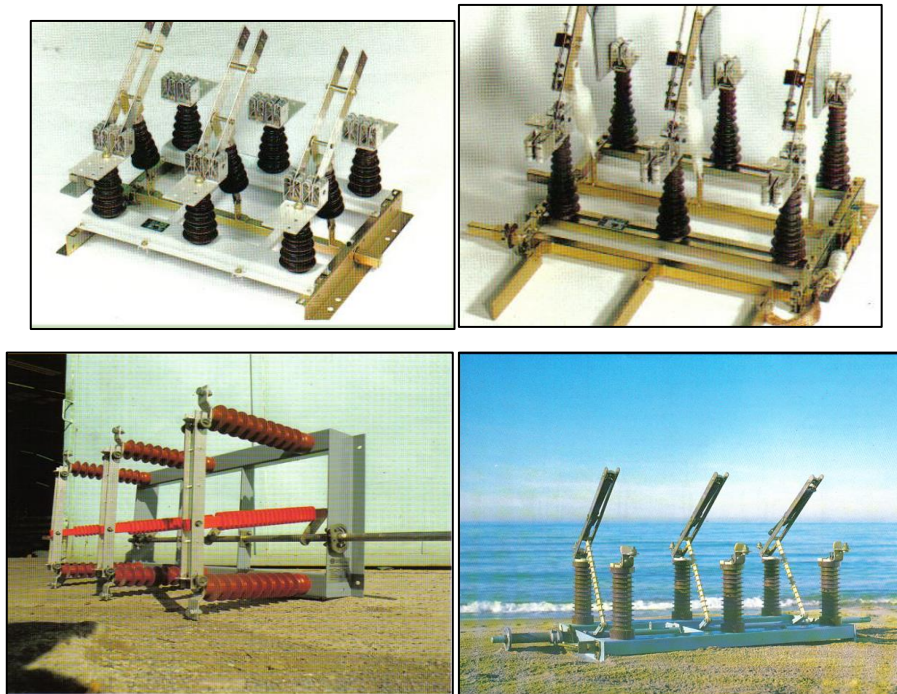


Figure II.1 : Différents types de Sectionneurs.

II.2.4.4 Conditions à remplir :

- Assurer le passage du courant normal sans échauffement ni chute de tension.
- Assurer le passage du courant de court-circuit jusqu'à ouverture du disjoncteur.
- L'isolement des contacts est assuré par des isolateurs appropriés.
- Comporter un dispositif de commande.
- Le sectionneur comporte généralement un dispositif verrouillage n'autorisant sa manœuvre que si le disjoncteur est ouvert.
- Doit être un appareil robuste, très résistant aux chocs, aux vibrations, aux intempéries, d'un entretien très facile et réduit que possible.

II.2.5 Interrupteur:

II.2.5.1 Role:

- Ouvrir ou fermer un circuit électrique dans les conditions normales.
- La manœuvre est volontaire et généralement manuelle.
- Les interrupteurs peuvent couper des courants nominaux très élevés.
- Ils ne peuvent pas couper des courants de court-circuit.

II.2.5.2 Pouvoir de coupure :

Les interrupteurs doivent avoir un dispositif d'extinction de l'arc :

- Allongement de l'arc soit par cornes soit par pare-étincelles.
- Soufflage magnétique.
- Auto-soufflage d'air comprimée.
- Chambre de soufflage a parois déionisantes.
- Mécanisme de rupture brusque (ressorts, fouets).

II.2.5.3 Pouvoir de fermeture :

Les interrupteurs sont dotés d'un dispositif de fermeture brusque leur permettant de se fermer en charge normal. Ils doivent supporter les courants de court-circuit jusqu'à la fusion des fusibles ou déclenchement des disjoncteurs.

II.2.6 Interrupteur aérien à commande mécanique (IACM) :

Un interrupteur aérien à commande mécanique (IACM), est un dispositif de coupure destiné à être utilisé dans les réseaux de distribution d'énergie électrique à haute tension (HTA).

Conçu pour permettre aux opérateurs de contrôler manuellement l'ouverture ou la fermeture d'une liaison électrique à haute tension, il se présente sous la forme d'un levier, d'un bouton ou d'un autre mécanisme de commande situé sur l'appareil lui-même.

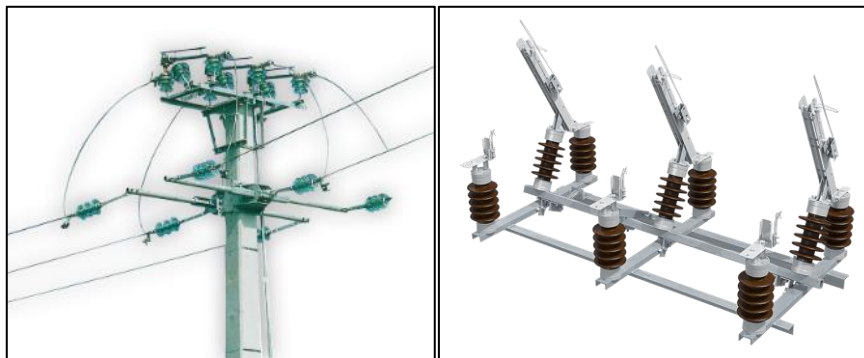


Figure II.2 : Interrupteur aérien à commande mécanique (IACM).

II.2.6.1 Role:

- Permet la coupure manuelle d'une ligne électrique aérienne.
- Sert à isoler un tronçon de réseau pour des travaux ou interventions.
- Utilisé principalement dans les réseaux moyenne tension (MT).
- Monté sur poteau, accessible via une commande mécanique au sol ou en hauteur.
- Assure la sécurité du personnel lors des opérations de maintenance.

II.2.7 Disjoncteur :

Les premiers disjoncteurs à haute tension ont été introduits à la fin des années 1890 et au début du XXe siècle. Ils utilisaient l'huile, l'eau ou l'air comprimé pour la coupure. Le premier brevet de disjoncteur pour la Haute Tension B, basé sur la séparation de deux contacts dans l'huile (et dans l'air), a été déposé en juillet 1895 par Sebastian Ziani de Ferranti. Ce principe sera ensuite perfectionné, donnant naissance aux disjoncteurs à huile.

La technique de coupure dans l'air atmosphérique s'est développée en Haute Tension A, l'idée étant d'allonger suffisamment l'arc électrique dans l'air afin de provoquer son refroidissement, son extinction, et d'assurer ensuite la tenue de la tension du réseau.

Cependant, la coupure dans l'huile a progressivement été supplantée par d'autres technologies, notamment la coupure dans l'air comprimé, le SF6 et le vide.

II.2.7.1 Caractéristiques fondamentales du disjoncteur [9] :

- Tension assignée d'emploi U_e : c'est la tension au quelle l'appareil peut être utilisé.
- Courant assignée d'emploi I_n : c'est la valeur maximale du courant que peut supporter un disjoncteur équipé d'un déclencheur à une température ambiante précisée par le constructeur.
- Courant de réglage I_r : courant maximal que peut supporter le disjoncteur, sans déclenchement. Il peut être réglable de $0.7 I_n$ à I_n pour les déclenchements thermiques, de $0.4 I_n$ à I_n pour le déclenchement électronique.
- Courant de fonctionnement I_m : courant qui provoque le déclenchement pour les fortes intensités. Il peut être fixe ou réglable et peut varier entre $1,5 I_n$ et $20 I_n$.
- Pouvoir de coupure I_{cu} ou I_{cn} : plus grande intensité de courant de court-circuit qu'un disjoncteur peut interrompre sous une tension donnée. Il s'exprime en kA efficace. I_{cu} est le pouvoir de coupure des disjoncteurs industriels, ainsi que I_{cn} est le pouvoir de coupure des disjoncteurs domestiques.

- Pouvoir de limitation : c'est la capacité d'un disjoncteur à ne laisser passer qu'un courant inférieur au celui de court-circuit.

II.2.7.2 Constitution du disjoncteur :

Un disjoncteur comporte toujours :

- Des contacts fixes et des contacts mobiles
- Un dispositif de coupure de l'arc
- Un mécanisme de fermeture et le verrouillage des contacts mobiles
- Un mécanisme d'ouverture automatique de ces contacts (max de I)
- Des pôles auxiliaires de contrôle, de commande, d'asservissement
- Un châssis

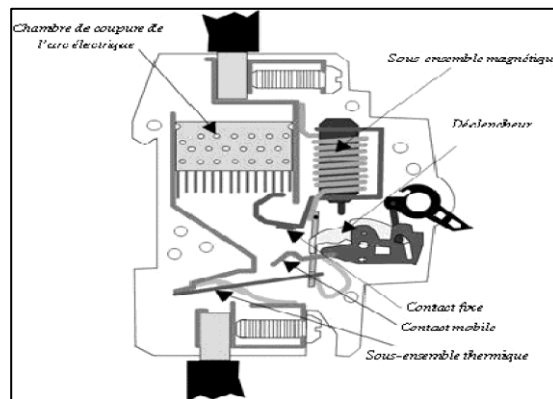


Figure II.3 : Disjoncteur à vide.

II.3 Différent type de disjoncteur en (MT/HT) :

Les disjoncteurs en (HT) et (MT) jouent un rôle essentiel dans les réseaux électriques. Malgré leur principe de fonctionnement commun, ils diffèrent dans la technique et la technologie utilisées pour l'extinction de l'arc électrique.

II.3.1 Disjoncteur à huile :

Les premiers disjoncteurs à huile, appelés « disjoncteurs à gros volume d'huile », utilisaient des contacts de coupure immergés dans de l'huile contenue dans une cuve métallique au potentiel de la terre d'où leur appellation de Dead tank. Certains de ces disjoncteurs sont encore en service aujourd'hui, notamment aux États-Unis.

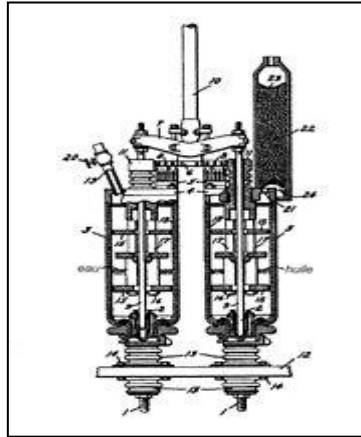


Figure II.4: Disjoncteur à huile.

Dans les années 1950, une nouvelle génération de disjoncteurs, dits « à faible volume d'huile », a été développée pour réduire la quantité d'huile utilisée et, surtout, limiter les risques d'incendie liés aux gros volumes. Dans ces modèles, l'arc se développe dans un cylindre isolant, ce qui permet de mieux contrôler sa longueur et l'énergie dégagée. Cette énergie est utilisée pour vaporiser l'huile, générant un soufflage naturel de l'arc un principe connu sous le nom d'auto-soufflage.

Ce principe d'auto-soufflage sera plus tard repris pour les disjoncteurs utilisant le SF6. La technique a permis de concevoir des disjoncteurs pour des tensions assignées atteignant 765 kV et des courants de défaut très élevés, jusqu'à 50 kA.

II.3.1.1 Principe de fonctionnement des disjoncteurs à huile :[10]

Les contacts sont immergés dans une huile diélectrique. Lors de la séparation, l'arc provoque la décomposition de l'huile qui libère de l'hydrogène (environ 70 % en volume), de l'éthylène (environ 20 %), du méthane (environ 10 %) et du carbone libre. Une énergie d'arc de 100 kJ produit environ 10 L de ces gaz. Ces gaz forment une bulle qui, par inertie de la masse d'huile, se trouve soumise pendant la coupure à une pression dynamique qui peut atteindre 50 à 100 bars.

II.3.1.2 les avantages de disjoncteur à huile :[11]

- Il consomme moins d'huile.
- La rigidité diélectrique de l'huile est élevée.
- L'huile contenue dans le disjoncteur absorbe l'énergie de l'arc lors de sa décomposition.
- Moins d'espace.

- Le risque d'incendie peut être réduit.
- La maintenance est également réduite.

II.3.1.3 les Inconvénients de disjoncteur à huile :[11]

Ces disjoncteurs présentaient plusieurs inconvénients majeurs :

- Ils nécessitaient de nombreux éléments de coupure montés en série pour assurer la tenue en tension.
- Leur entretien était à la fois complexe et fréquent, en raison du remplacement nécessaire de l'huile usagée
- Il utilise moins d'huile, ce qui augmente la carbonisation.
- L'élimination des gaz dans l'espace de contact est difficile.
- La rigidité diélectrique de l'huile diminue rapidement en raison de la forte carbonisation.
- La durée d'arc est élevée.
- Ne pas permettre d'interruption à grande vitesse.
- Le contrôle de l'interruption de l'arc peut être effectué en fonction de sa longueur.
- N'importe quel mélange volatil peut se former dans l'air.

Ils ont progressivement été remplacés par les disjoncteurs à SF₆, qui offrent l'avantage de nécessiter peu de maintenance tout en bénéficiant d'une durée de vie prolongée.

II.3.2 Disjoncteurs avec ampoules à vide :

Les recherches et brevets initiaux relatifs aux ampoules (ou interrupteurs) à vide ont été menés dès 1926 par le California Institute of Technology. Cependant, ce n'est qu'à la fin des années 1950 que ces dispositifs ont trouvé leurs premières applications industrielles, une fois les principales difficultés techniques surmontées, notamment la nécessité de garantir un vide poussé pendant au moins vingt ans, ce qui requiert une étanchéité parfaite de l'ampoule.

Actuellement des disjoncteurs intégrant des ampoules à vide sont en service jusqu'à 84 kV, au Japon, la capacité de coupure d'un disjoncteur à vide peut atteindre 63 kA. Des recherches sont en cours pour développer des ampoules à vide de tension supérieure.

II.3.2.1 Principe de fonctionnement des disjoncteurs à vide :

En fonctionnement normal, les contacts sont fermés, ce qui permet le courant à circuler. Quand un problème se produit (court-circuit ou surcharge), le système de sécurité identifie le problème et déclenche l'ouverture du disjoncteur et les contacts commencent à ouvrir, ce qui provoque la formation d'un arc électrique, lequel est déplacé vers la chambre à vide où, et avec l'absence des particules, l'arc s'extinct rapidement. Dès que l'arc est éteint, la rigidité diélectrique du vide, huit fois supérieure à celle de l'air, garantit que le circuit ne se ferme pas et qu'aucun courant ne le traverse [12].

Une fois le problème est éliminé il peut refermer le disjoncteur manuellement ou automatiquement pour rétablir la circulation normale de l'électricité.

II.3.2.2 les avantages de disjoncteur à vide :

- Grande fiabilité : Les disjoncteurs à vide sont fiables et performants dans différents environnements. Ils garantissent des performances élevées et stables qui minimisent les erreurs dans tous les circuits électriques.
- Longue durée de vie : Ces disjoncteurs peuvent durer entre vingt et trente ans sans usure, voire aucune. En effet, ils fonctionnent sous vide, ce qui évite la plupart des dommages généralement causés par la formation d'arcs électriques.
- Conception compacte : Leur taille facilite grandement leur installation et leur construction. De plus, lorsqu'ils sont placés dans des sous-stations électriques, ils occupent une surface nettement plus petite que les types traditionnels, ce qui permet une construction plus facile.[12]

II.3.2.3 les Inconvénients de disjoncteur à vide :

- Coûts initiaux plus élevés : Les disjoncteurs à vide sont certes supérieurs en termes de technologie et présentent des avantages à long terme. Mais leur coût est nettement plus élevé que celui des disjoncteurs à huile ou à air. Un coût aussi élevé est principalement un obstacle aux applications de petite taille.
- Capacité limitée d'interruption du courant : Les disjoncteurs à vide sont surtout utilisés dans les applications à moyenne tension (11-33 kV), qui ne peuvent pas être utilisées à des niveaux de tension très élevés. Leur utilisation est donc limitée dans certaines applications industrielles ou de réseau électrique.

- Sensibilité aux variations de température : Les disjoncteurs à vide peuvent parfois être trop sensibles à des températures extrêmement chaudes et froides, ce qui peut entraîner un dysfonctionnement. [12]

II.3.3 Disjoncteur à air comprimé :

Pendant les années 1960 et 1970, les disjoncteurs à air comprimé ont dominé le marché des très hautes tensions, en particulier en Amérique du Nord, grâce à leurs performances inégalées à l'époque. Il est important de souligner que, même à l'heure actuelle, la technologie des disjoncteurs à air comprimé demeure la seule capable d'atteindre les plus hauts pouvoirs de coupure (jusqu'à 275 kA sous 36 kV).



Figure II.5 : Disjoncteur à air comprimé.

II.3.3.1 Principe de fonctionnement des disjoncteurs à air comprimé :

Un disjoncteur à air comprimé fonctionne sur le principe de l'extinction d'un arc électrique à l'aide d'un souffle d'air haute pression, le gaz est maintenu sous haute pression entre 20 et 35 bars, grâce à un compresseur. Lorsque les contacts du disjoncteur s'ouvrent, un arc électrique se forme en raison de l'air ionisé entre eux. Cet arc est un chemin hautement conducteur pour le courant, ce qui lui permet de continuer à circuler même après que le circuit est censé être interrompu. Pour éteindre cet arc, le disjoncteur à air comprimé utilise un système d'air haute pression. L'air comprimé est stocké dans des réservoirs et libéré à travers des buses stratégiquement positionnées près des contacts. Ce souffle d'air à grande vitesse sert deux objectifs clés :

- Refroidissement : Le souffle d'air refroidit rapidement l'arc, réduisant sa température et sa conductivité.

- Dispersion : L'air à grande vitesse disperse l'air ionisé, interrompant le chemin du courant.[13]

II.3.3.2 les avantages de disjoncteur à air comprimé :

- Les disjoncteurs à air comprimé sont capables de gérer des courants de court-circuit très élevés, ce qui les rend appropriés pour les applications à grande puissance.
- Ils assurent une coupure fiable et rapide, avec un faible risque de panne ou défaillance mécanique.
- L'air comprimé, ne pose aucun danger pour l'environnement, contrairement aux gaz tels que le SF₆.
- Généralement moins de maintenance en raison de l'absence de produits chimiques ou de gaz qui requièrent une surveillance particulière.

II.3.3.3 les Inconvénients de disjoncteur à air comprimé :

- Relativement une grande taille, ce qui peut limiter leur intégration dans des espaces réduits.
- Au moment de coupure, le bruit significatif produit par l'air comprimé peut être Perturbant dans des lieux sensibles au bruit.
- La maintenance du système de compression coûteux et nécessiter des interventions Régulières pour assurer un bon fonctionnement et éviter le risque de perte de pression.

II.3.4 Disjoncteur à gaz SF₆ (Hexafluorure de soufre) :

II.3.4.1 Historique :

La première mise en œuvre d'un disjoncteur haute tension fonctionnant avec du SF₆ a été réalisée en 1956, également par Westinghouse. Toutefois, à cette époque, les performances étaient encore limitées le pouvoir de coupure n'atteignait que 5 kA sous 115 kV (soit 1000 MVA), et pour atteindre ces caractéristiques, L'appareil devait être équipé de plusieurs dispositifs de coupure en série par pôle, jusqu'à six chambres de coupure.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le gaz de remplissage généralement utilisé dans les disjoncteurs haute tension est l'hexafluorure de soufre (SF₆). Son utilisation dans les appareillages électriques remonte au début des années 1950. Dans des conditions normales de température et de pression, le dioxyde de soufre (SF₆) se présente sous forme d'un gaz incolore, inodore et non inflammable. Ses excellentes propriétés diélectriques, chimiques et thermiques se

sont confirmées au fil du temps, lui permettant de remplacer progressivement d'autres gaz isolants tels que l'air ou le CO₂.

Cependant, malgré ses avantages techniques notables, le SF₆ est reconnu comme un gaz à effet de serre particulièrement puissant. En conséquence, des recherches sont en cours pour étudier la possibilité de le remplacer par d'autres gaz ou technologies moins polluants.

Les excellentes propriétés du SF₆ ont favorisé son adoption et l'extension de sa technologie au cours des années 1960, notamment pour le développement de disjoncteurs à fort pouvoir de coupure sous des tensions de plus en plus élevées, atteignant jusqu'à 800 kV et même 1 100 kV depuis 2009 en Chine.

Le développement des réseaux haute tension et la nécessité d'intégrer ces infrastructures au cœur des agglomérations et des zones industrielles ont conduit à la conception de nouveaux types de postes haute tension à encombrement réduit, dits « blindés » ou « sous enveloppe métallique ». Pour assurer l'isolation dans ces installations compactes, l'air atmosphérique a été remplacé par du SF₆, dont les excellentes propriétés diélectriques ont permis de réduire considérablement l'encombrement des appareillages haute tension.

L'implémentation de cette technologie a facilité la réalisation, dès 1966, du premier poste prototype expérimental blindé 220 kV installé au Plessis-Gassot, dans les environs de Paris. Ce progrès a été suivi par l'installation du premier disjoncteur sous enveloppe métallique en 1967 à Levallois-Perret, puis en 1969 au poste de Vaise à Lyon (France).

II.3.5 Disjoncteur auto-pneumatique :

Le principe du soufflage auto-pneumatique s'est développé au cours des années 1970 et au début des années 1980 afin de répondre aux spécifications les plus exigeantes et de mettre au point des appareils de plus en plus performants.

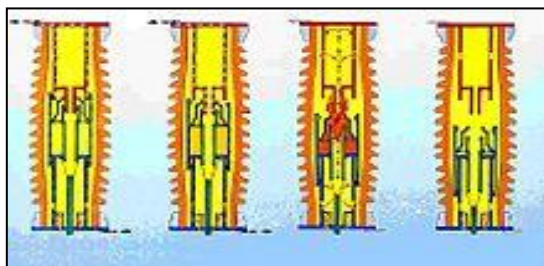


Figure II.6: Principe des disjoncteurs auto-pneumatiques

II.3.5.1 Principe de fonctionnement de Soufflage auto-pneumatiques :

La figure II.6 illustre de manière schématique le principe de fonctionnement de ces disjoncteurs. Lorsque le disjoncteur est en position « fermé », le courant circule à travers des contacts dits « permanents », situés sur le diamètre extérieur de la partie active. Lors du déclenchement du disjoncteur, la partie mobile se déplace vers le bas, provoquant la séparation des contacts permanents. Le courant est alors transféré vers une autre série de contacts, appelés « contacts d'arc ».

Lorsque la partie mobile a parcouru une distance suffisante, ces contacts d'arc se séparent, provoquant l'amorçage d'un arc électrique entre eux. Les contacts d'arc sont fabriqués dans des matériaux à base de tungstène, capables de résister aux effets thermiques et mécaniques de l'arc sans subir de dommages.

Lors de la manœuvre d'ouverture, le disjoncteur génère 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. Ce flux gazeux refroidit l'arc électrique, facilitant ainsi son extinction.

II.3.5.2 Caractéristiques des disjoncteurs SF₆ :

D'un point de vue technique, les disjoncteurs utilisant le gaz SF₆ présentent plusieurs avantages notables :

- Leur chambre de coupure est conçue de manière simple, sans nécessité de chambre auxiliaire, contrairement aux anciens modèles fonctionnant à l'air comprimé ;
- Grâce à la technologie auto-pneumatique, ces dispositifs sont autonomes et n'ont pas besoin de compresseur de gaz ;
- Ils offrent des performances élevées avec un nombre réduit de chambres de coupure : une seule suffit pour du 245 kV, une à deux pour 420 et 550 kV, et généralement quatre pour du 800 kV ;
- Leur rapidité d'intervention en cas de défaut est remarquable, avec des temps de coupure allant de 2 à 2,5 cycles en très haute tension ;
- Leur durabilité électrique est élevée, assurant une exploitation fiable pendant au moins 25 ans ;

- Ils permettent une réduction de l'espace requis, notamment lorsqu'ils sont installés dans des postes à isolation métallique ;
- Il est possible d'intégrer des résistances de fermeture dans les chambres ou de réaliser des manœuvres synchronisées, afin de limiter les surtensions lors des opérations en très haute tension ;
- Leur fonctionnement est fiable et sécurisé ;
- Enfin, ils génèrent peu de bruit pendant leur utilisation.



Figure II.7 : Disjoncteur 115 kV au Canada

Au début des années 1980, une nouvelle génération de disjoncteurs SF₆ à très haute tension a été développée, avec une géométrie simplifiée qui intègre un inséreur de résistance de fermeture dans la chambre de coupure. Dans ce cas, la résistance est située à l'extrémité de la chambre, à l'intérieur d'une enveloppe métallique mais isolée de celle-ci par le SF₆ contenu dans le pôle (figure II.7). Cette résistance sert à limiter les surtensions sur le réseau pendant l'enclenchement ou le réenclenchement de longues lignes à très haute tension.

II.3.6 Disjoncteur à auto-soufflage :

La période 1984–2000 a été marquée par le fort développement des moyens de calcul et de modélisation des disjoncteurs SF₆. Grâce à l'utilisation de ces moyens, de nouveaux appareils à faible énergie de manœuvre a été développés.

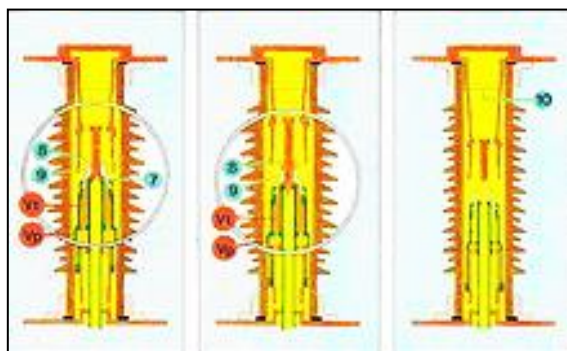


Figure II.8 : Principe des disjoncteurs à auto-soufflage.

II.3.6.1 Caractéristiques des disjoncteurs SF₆ :

Les disjoncteurs à auto-soufflage sont caractérisés par l'utilisation importante de l'énergie d'arc pour la coupure : le soufflage par auto-soufflage s'est substitué en grande partie au soufflage auto-pneumatique pour la coupure des forts courants. La coupure des courants faibles est toujours obtenue par un soufflage auto-pneumatique, l'énergie de l'arc n'étant pas suffisante pour contribuer au soufflage.

II.3.6.2 Principe de fonctionnement d'auto-soufflage :

La figure II.8 montre que pendant la phase de fort courant, l'arc amorcé entre les contacts (7) et (8) transmet une grande partie de son énergie au volume d'expansion thermique V_t . Au passage par zéro du courant la surpression ainsi créée se vidange à travers la buse isolante (9) et à l'intérieur du contact mobile (7). Ce double soufflage permet de refroidir et d'interrompre efficacement l'arc. Pour la coupure des courants faibles un soufflage auto-pneumatique d'appoint est effectué dans le volume V_p , le gaz comprimé venant souffler l'arc par l'intermédiaire du volume V_t .

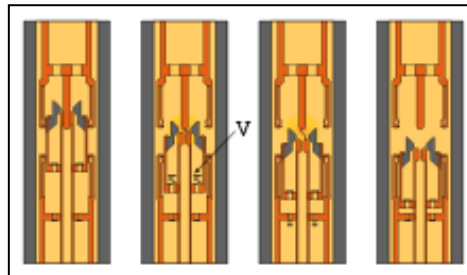


Figure II.9 : Principe des disjoncteurs à auto-soufflage et double volume.

Une évolution des chambres de coupure à auto-soufflage a consisté à introduire un clapet (V) entre le volume d'expansion et le volume de compression. Ce principe est illustré par la figure II.9.

En coupure de faibles courants le clapet s'ouvre sous l'effet de la surpression générée dans le volume de compression. Le soufflage de l'arc s'effectue comme dans un disjoncteur auto-pneumatique grâce à la compression de gaz.

Dans le cas d'une coupure de forts courants, l'énergie d'arc produit une forte surpression dans le volume d'expansion, ce qui entraîne la fermeture du clapet (V) et isole le volume d'expansion par rapport au volume de compression. La surpression nécessaire à la coupure est

obtenue par une utilisation optimale de l'effet thermique et de « l'effet bouchon » qui se produit lorsque la section de l'arc réduit de manière significative l'échappement du gaz dans la buse.

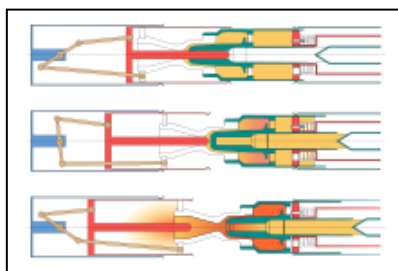


Figure II.10 : Disjoncteur à auto-soufflage à double mouvement des contacts.

Pour éviter une consommation excessive d'énergie par compression de gaz, une soupape limite la surpression dans le volume de compression à la valeur nécessaire pour la coupure des faibles courants de court-circuit.

Une évolution plus récente des chambres de coupure à auto-soufflage a consisté à réduire l'énergie cinétique qui doit être fournie par l'organe de manœuvre pendant l'ouverture du disjoncteur. Ceci est obtenu en déplaçant les deux contacts d'arc en sens opposé, de sorte que la vitesse de chaque partie mobile est la moitié de celle d'un appareil classique. Dans cette configuration, la masse en mouvement est augmentée mais l'énergie de manœuvre est notablement réduite étant donné que l'énergie cinétique varie comme le carré de la vitesse. Ce principe est illustré par la figure II.10.

Le principe de coupure à auto-soufflage a permis d'utiliser des commandes à ressorts de faible énergie pour la manœuvre des disjoncteurs haute tension²⁰. Les appareils à auto-soufflage ont remplacé les appareils auto-pneumatiques pendant les années 1990-2003, tout d'abord en 72,5 kV, puis de 145 kV à 800 KV.

II.4 Comparaison des Techniques de Coupure Électrique :

Technique	Principe	Caractéristiques principales
Huile	Séparation des contacts dans un bain d'huile	-premier brevet(1895) - Refroidissement par décomposition de l'huile - Maintenance importante - Remplacé par SF6, vide

Air comprimé	Soufflage de l'arc avec air comprimé	- Haute pression (20-35 bar) - Très haute performance - Bruyant et nécessite un compresseur
Vide	Arc confiné dans ampoule sous vide	- Haute tenue diélectrique - Rotation de l'arc pour éviter l'usure - Utilisé jusqu'à 84 kV
SF6 (Hexafluorure)	Gaz inerte et isolant	- Excellentes propriétés isolantes - Compact, peu d'entretien - Effet de serre - Dominant de 72,5 kV à 800 kV
Auto-pneumatique	Compression générée par l'ouverture	- Utilisation de l'énergie mécanique pour le soufflage - Remplacé par auto-soufflage
Auto-soufflage	Utilisation de l'énergie thermique et mécanique de l'arc	- Énergie de l'arc pour soufflage - Double volume et double mouvement - Commandes à ressorts

Tableau II.2: Tableau Comparatif des Technique coupure.

II.5. Conclusion:

L'évolution des techniques de coupure a suivi les progrès technologiques et les exigences croissantes en matière de sécurité, de fiabilité et de performances. Chaque innovation – de l'huile à l'air comprimé, du vide au SF6 – a permis d'améliorer l'efficacité des disjoncteurs et de répondre aux défis des réseaux électriques modernes.

Chapitre III

Caractérisation de quelques gaz utilisés en isolation électrique

III.1. Introduction :

Le gaz le plus utilisé de tout temps dans les applications à basse et moyenne tension comme une isolation électrique (lignes aériennes, disjoncteurs, électrostatique...) est l'air. Cependant, d'autres gaz tels que l'azote (N_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et surtout l'hexafluorure de soufre (SF_6) connaissent, depuis 1950, un succès grandissant dans le domaine des systèmes haute tension (postes blindés, câbles à isolation gazeuse, ...). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions.

L'azote et l'air possèdent les champs de décomposition les plus élevés de tous les gaz naturels. Dans des conditions standard dans un champ homogène, on peut s'attendre à un champ de claquage d'environ 30 kV/cm. La résistance électrique dépend également de la géométrie des électrodes.

III.2. L'air :

III.2.1. Composition de l'air :

L'air sec au voisinage du sol est un mélange gazeux homogène. Il est approximativement composé en fraction molaire ou en volume de 80% de molécules de diazote et 20% de molécule de dioxygène, il contient aussi des traces de quelques autres gaz (l'argon, néon, krypton....), il est composé pour 5 molécules de l'air de :

- 4 molécules de diazote
- 1 molécule de dioxygène

III.2.2. Quelques propriétés de l'air :

III.2.2.1. Volume et pression de l'air :

- Le volume d'un gaz mesure l'espace qu'il occupe. Comme un gaz n'a pas de volume propre, son volume est celui du récipient qui le contient. Unité de mesure : le mètre cube (m^3) ou le litre (L).
- Les particules d'un gaz sont toujours en mouvement : il y a des chocs entre les particules du gaz et les objets qu'elles rencontrent ; On dit que le gaz exerce une pression sur ces objets.

la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer dépend essentiellement de la masse de l'atmosphère, celle-ci pouvant évoluer avec la masse moyenne des gaz à concentration variable comme la vapeur d'eau. Elle varie autour de l'atmosphère normale, soit 101,325 kPa. La pression d'un gaz se mesure soit en Pascal (Pa) soit en bar ou le bar (1 bar = 101,3 kPa).

III.2.2.2. L'air est compressible et expansible :

Lorsque l'on comprime l'air, l'espace vide entre les molécules diminue donc le volume occupé par le gaz diminue. Les chocs particules/parois sont plus fréquents et la pression du gaz augmente. On dit que l'air est compressible.

A l'inverse, si on augmente le volume occupé par un gaz, l'espace vide entre les particules augmente. Les chocs particules/parois sont moins fréquents et la pression du gaz diminue. On dit que le gaz est expansible.

Un gaz enfermé dans une enceinte a toujours tendance à reprendre son volume et sa pression initiale. On dit que le gaz est élastique.

III.2.2.3. Propriétés diélectriques de l'air :

Un gaz contient toujours un certain nombre de particules chargées. Celles-ci proviennent principalement des cascades d'électrons et d'ions résultant du rayonnement cosmique dans l'air par exemple, au niveau du sol, elle est d'environ une dizaine de paires d'ions par centimètre cube et par seconde. Par suite de la présence en permanence de ces particules chargées, l'application d'une tension, même très faible (de l'ordre du microvolt), aux bornes d'électrodes plongées dans le gaz se traduit par l'apparition d'un courant dans le circuit extérieur consécutif au déplacement des charges à l'intérieur du gaz.

a- Permittivité :

L'air possède une permittivité relative quasi identique à celle du vide $\epsilon_0 = 8.85.10^{-12} F/m$, ce qui en fait un isolant électrique particulièrement efficace. Cependant, lorsqu'il est exposé à des tensions suffisamment élevées, les électrons situés dans les

couches externes des atomes des molécules d'air peuvent être arrachés, provoquant ainsi une ionisation du gaz et l'apparition d'un courant de conduction.

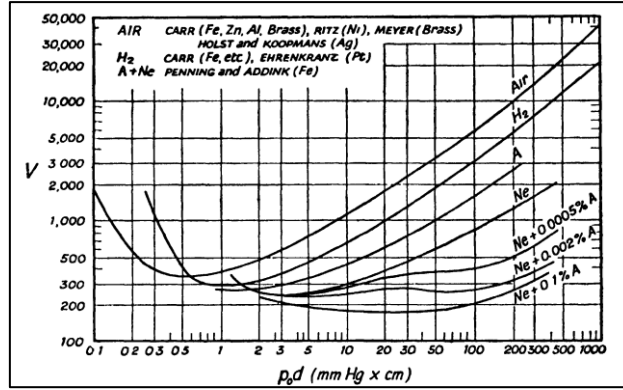


Figure III.1: Tracé de tension de claquage pour quelques gaz en fonction du produit pd [14].

Dans des conditions atmosphériques normales, le champ électrique critique à partir duquel cette rupture diélectrique se produit appelé « champ disruptif » est de l'ordre de 30 kV/cm, comme le montre la figure III.1.

b. Claquage de Townsend :

En augmentant progressivement la tension V , le courant croît linéairement jusqu'à une certaine valeur I_0 dite de saturation. Le phénomène de claquage de Townsend peut se développer en deux phases dont la première est caractérisée par un coefficient α appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Ce coefficient représente le nombre de paires électron-ions produites par centimètre de parcours d'un électron dans la direction du champ électrique.

$$dN_x = N_x \alpha \cdot dx \quad (\text{III.1})$$

À $x=0$ (surface cathodique), $N_x(x=0) = N_0$

D'où ;
$$N_x = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot x} \quad (\text{III.2})$$

Si d est la distance inter électrode, le nombre d'électrons N_d arrivant sur l'anode est :

$$N_d = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.3})$$

De même pour le courant,

$$I_d = I_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.4})$$

I_0 , est le courant initial crée à la surface cathodique.

Dans la deuxième phase d'ionisation de Townsend, chaque ionisation d'un neutre du gaz donne naissance à un électron libre et un ion positif qui se dirige vers la cathode où il donnera à son tour naissance à un nombre γ de nouveaux électrons arrachés de la cathode par son bombardement par ces ions positifs, si son énergie est suffisante (supérieure à l'énergie d'ionisation du matériau constituant la cathode). Le coefficient γ , caractérisant l'ionisation en surface au niveau de la cathode, est appelé deuxième coefficient de Townsend, qui représente donc l'ensemble des effets secondaires et quantitativement fourni par l'expression.

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m \cdots \gamma_n \quad (\text{III.5})$$

Où n indique le type d'effet secondaire.

L'efficacité de ces effets secondaires par leurs actions sur la surface cathodique, dépend à la fois du champ réduit E/P , nature du gaz et fortement du métal qui constitue la cathode et de son état de surface.

En tenant compte maintenant ces effets secondaires représentés par le deuxième coefficient de Townsend γ [17].

$$N''_0 = N_0 + N'_0 \quad (\text{III.6})$$

N''_0 , le nombre total des nouveaux électrons arrachés de la cathode dans le deuxième processus, l'expression de la densité des électrons (III.20) doit être recalculée de la façon suivante.

$$N_d = N''_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} = (N_0 + N'_0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{III.7})$$

remplaçons maintenant $N'_0 = \gamma[N - (N_0 + N'_0)]$, on obtient ;

$$N_d = \frac{N_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}, \quad \text{et pour le courant} \quad I_d = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{III.8})$$

Si I_0 représente un courant dû aux électrons produits par l'agent ionisant extérieur, le courant I d'une décharge qui s'établit entre les électrodes distantes de d est représenté par la relation classique.

c. Critère de claquage de Townsend

Pour avoir une décharge autonome qui ne cesse pas l'absence d'agent ionisant extérieur et génère ainsi un courant suffisamment important à la surface anodique conduit à un claquage du gaz entre les électrodes, le dénominateur des expressions données par (III.8) ne doit être nul, que

lorsque $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$, ce qui signifie que le courant I_0 n'est plus nécessaire à l'entretien de l'ionisation, et la décharge est alors dite autonome.

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{III.9})$$

L'expression (III.9), constitue le critère d'amorçage du claquage de Townsend en champ uniforme, Dans le cas où le champ n'est plus uniforme, le critère de Townsend s'écrit comme suite ;

$$\gamma \left[\exp \left(\int_0^d \alpha dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (\text{III.10})$$

Pour tous les gaz électronégatifs, il suffit de remplacer à chaque étape le premier coefficient de Townsend par :

$$\alpha' = \alpha - \eta \quad (\text{III.11})$$

Le critère de claquage pour un champ uniforme devient alors de la forme suivante :

$$\frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} [\exp(\alpha - \eta)d - 1] = 1 \quad (\text{III.12})$$

Et celui en champ non uniforme la relation (III.10) doit être modifiée pour tenir compte du fait de l'électronégativité du gaz, on aura :

$$\gamma \left[\exp \left(\int_0^d (\alpha - \eta) dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (\text{III.13})$$

d. Tension de claquage

Le mécanisme proposé par Townsend permet d'expliquer de manière théorique la loi empirique de Paschen décrivant la tension nécessaire à l'apparition d'une décharge disruptive en fonction du produit **pd** de la pression **p** et de la distance **d** inter-électrodes.

Le premier coefficient de Townsend α qui décrit le processus d'avalanche caractérisé par les ionisations successives et la création d'électrons dépend de l'intensité du champ électrique E .

L'état du gaz étant déterminé par sa pression et sa température qui restent pratiquement constantes lors de l'ionisation par les électrons, l'expression de α peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp \left(- \frac{B}{E/p} \right) \quad (\text{III.14})$$

Avec:

p : pression exprimée en Torr ;

A et B : deux constantes exprimées respectivement en [Torr⁻¹.cm⁻¹] et [V. Torr⁻¹.cm⁻¹]

E/p : le champ réduit exprimé en [V.Torr⁻¹.cm⁻¹].

Les valeurs A et B sont déterminées expérimentalement pour chaque gaz (Tableau III.2) et elles sont considérées constantes sur un domaine de champ réduit E/p.

Gaz	A (Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)	B (V.Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)	Domaine de validité E/P (V.Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)
H ₂	5	130	150-600
N ₂	12	342	100-600
CO ₂	20	466	500-1000
Air	15	365	100-800

Tableau III.2 : Les constantes A et B pour différents gaz ; et les gammes de E/p où la formule est valide.

A partir de l'équation (III.9) donnant la condition de claquage, on aura :

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (\text{III.15})$$

En champ uniforme la tension est fonction linéaire du champ électrique E :

$$U = E.d \quad (\text{III.16})$$

Substituons les équations (III.15), (III.16) dans (III.14), nous trouvons par la suite une relation entre la tension de claquage U_c et le produit pd exprimée comme suite :

$$U_C = \frac{B.Pd}{\ln \left[\frac{A.Pd}{\ln \left(1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right)} \right]} \quad (\text{III.17})$$

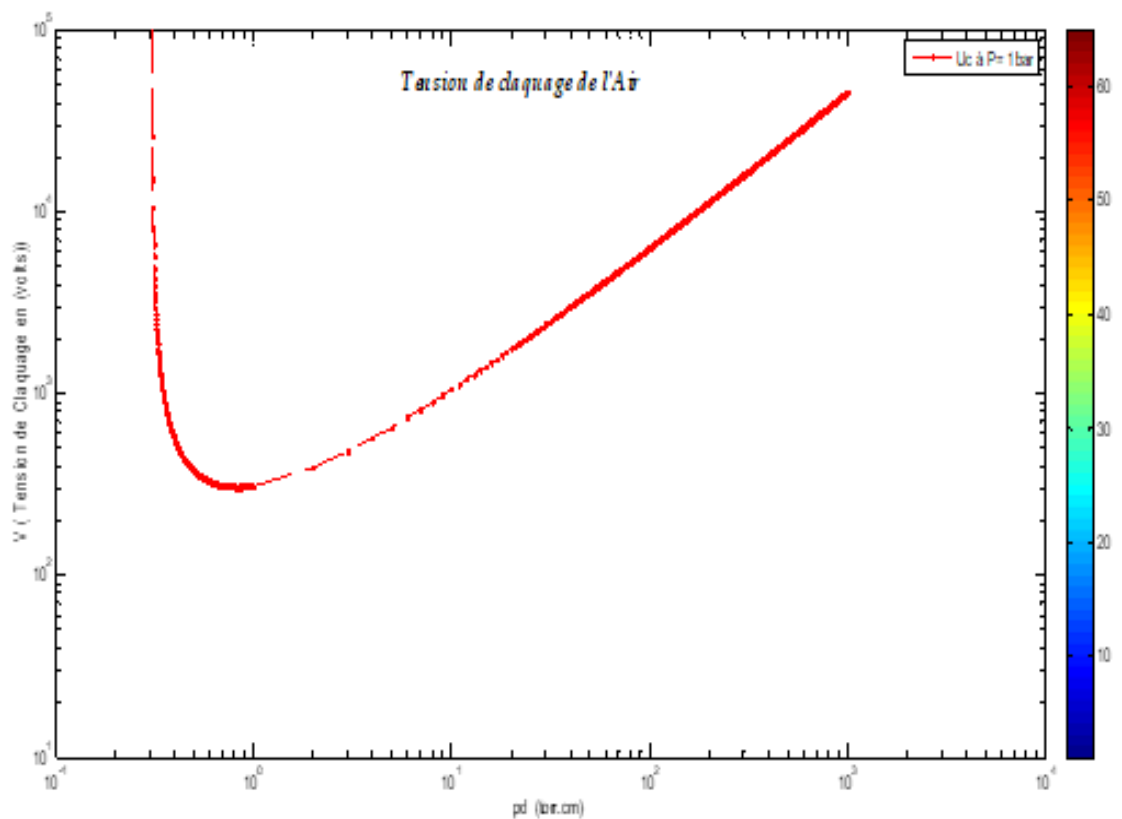
Avec, Pd , facteur produit pression et distance entre électrodes

A, B sont des coefficients spécifiques du gaz

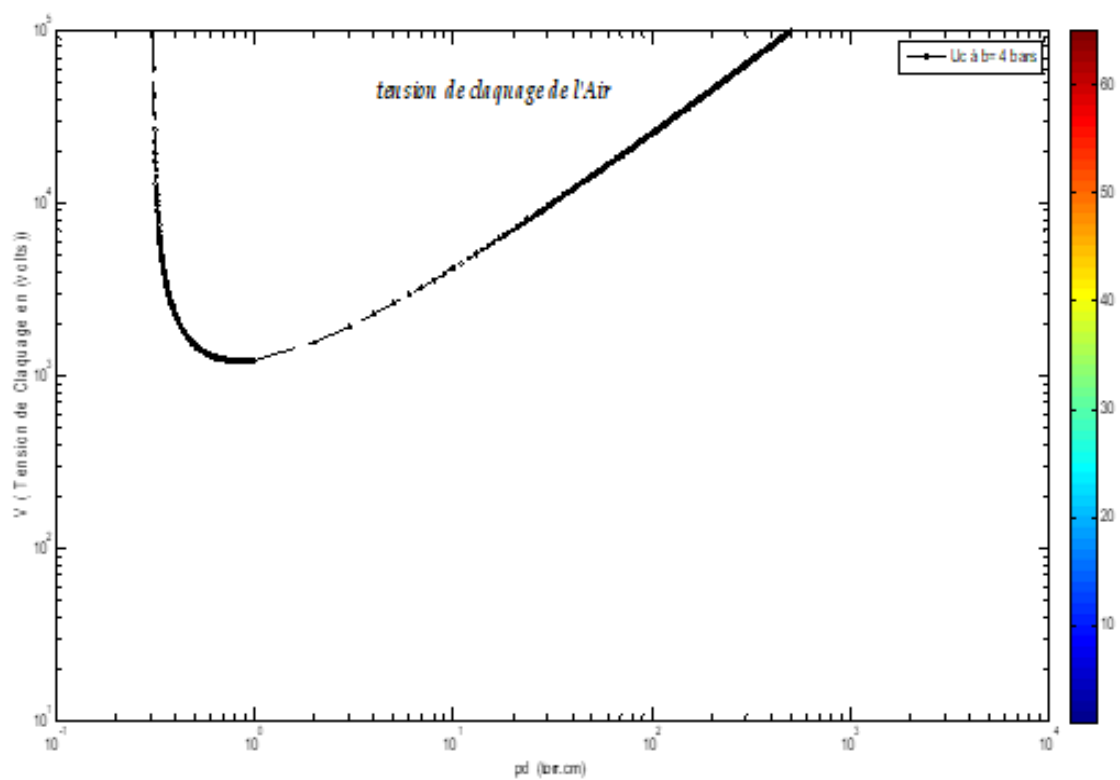
γ , deuxième coefficient d'ionisation de Townsend

U_c , est la tension de claquage du gaz.

a)



b)



c)

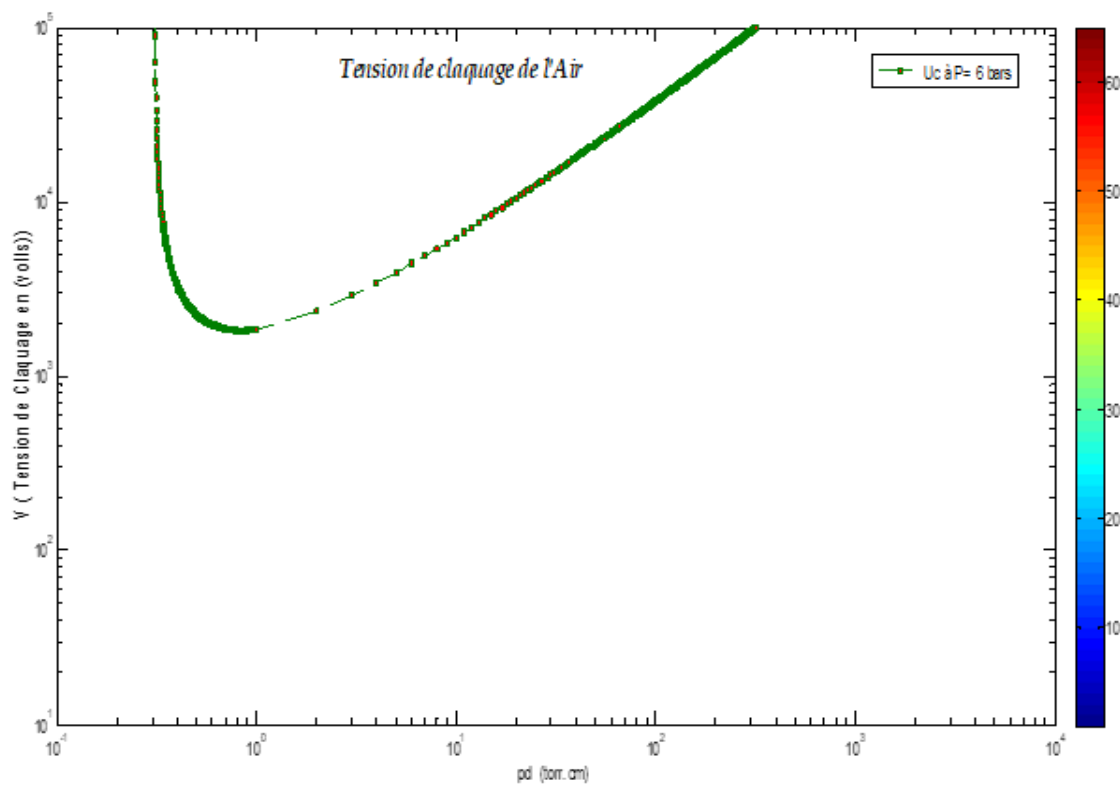


Figure III.2 : Tension de claquage de l'Air pour ; a) $P = 1$ bar, b) $P = 4$ bars, c) $P = 6$ bars[18].

D'après les courbes nous observons que la tension de claquage est augmentée en fonction de l'augmentation de la pression du gaz cela est valable pour presque tous les gaz.

III.3. L'hexafluorure de soufre SF₆ :

III.3.1. Définition :

Le SF₆ est largement utilisé dans la technologie moyenne tension et haute tension (disjoncteurs, sous-stations de transformation) depuis 1960, il est l'un des gaz les plus lourds qui existent.

Au cours des dernières années, l'hexafluorure de soufre (SF₆) a présenté un intérêt technologique considérable comme un milieu isolant dans la conception des systèmes énergétiques, surtout en haute et très haute tension, en raison de ses excellentes propriétés isolantes, même à une pression relativement basse et sa stabilité thermique et chimique.

L'hexafluorure de soufre est considéré comme étant un composé complètement fluoré (CCF), sa molécule est formée d'un atome de soufre et six atomes de fluor.

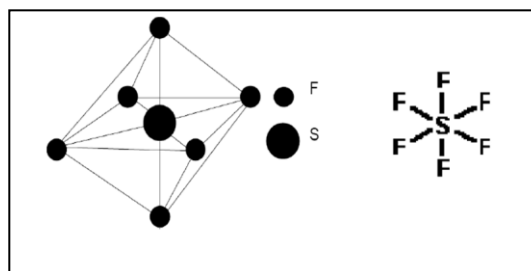


Figure III.3 : Structure moléculaire de SF₆.

Les liaisons entre les atomes sont de distances, $d_{S-F} = 1,56 \text{ \AA}$ et $d_{F-F} = 2,21 \text{ \AA}$. Cette figure montre que la molécule de SF₆ est de forme octaédrique ou les six atomes de fluor sont symétriquement repartis sur les sommets autour de l'atome de soufre.

III.3.2. Propriétés physicochimiques :

L'hexafluorure de soufre SF₆ fut élaboré en 1900 par Moissan et Lebeau selon la réaction suivante : $S (\text{solide}) + 3F_2 (\text{gaz}) \rightarrow SF_6 (\text{gaz}) + 1096 \text{ kJ}$. Et ce sont les travaux du français Berthelot qui sont à l'origine de l'utilisation du SF₆ dans le domaine de l'appareillage électrique comme gaz de coupure et d'isolation, ce gaz présente une très bonne stabilité chimique de ce gaz en présence d'un arc électrique.

C'est un gaz incolore, inodore, stable à la chaleur, non toxique et ininflammable dans les CNTP (conditions normales de température et de pression). Puisque les composés complètement fluorés CCF ont des longévités atmosphériques pouvant aller jusqu'à plus de 3000 ans, le SF₆ pourrait donc contribuer de façon permanente à l'échauffement global du climat si les émissions continuent de croître. Le potentiel d'échauffement global (PEG) du SF₆ est 23900 fois supérieur à celui du CO₂ pris comme référence (PEG = 1).

Lorsqu'il est utilisé comme isolant, certains de ces paramètres physico-chimiques sont susceptibles de jouer un rôle plus ou moins important.

En outre, sa chaleur spécifique est 3,7 fois supérieure à celle de l'air, ce qui limite significativement l'échauffement des équipements.

III.3.3. Propriétés diélectriques :

Grâce au caractère électronégatif du fluor, la molécule du SF₆ a tendance à capturer les électrons pour former des ions négatifs. Sa section efficace élevée permet de ralentir (lors des collisions) les électrons libres subsistant dans le volume, ce qui les empêche d'être trop rapidement accélérés sous l'action du champ électrique retardant ainsi le développement de la décharge.

Sa grande qualité d'isolation (bonne tenue diélectrique), son aptitude à ne pas entretenir l'arc électrique et son excellente stabilité chimique et thermique font de lui SF₆ un gaz de premier plan pour les applications industrielles (disjoncteurs, commutateurs, transformateurs haute tension, lignes de transmission et sous-stations de distribution ...).

Si on prend en compte uniquement l'ionisation par les électrons, on peut calculer le premier coefficient d'ionisation α dans un champ uniforme, mais dans le cas où les ions positifs sont pris en compte dans le processus d'ionisation, on définit un deuxième coefficient d'ionisation le « coefficient d'ionisation primaire effectif α^* ». Plusieurs méthodes ont été proposées pour son calcul tel que.

- La relation de Boyd et Crichton qui donne le coefficient d'ionisation en fonction du champ réduit E/p :

$$\frac{\alpha^*}{P} = 27,8 \cdot \left(\frac{E}{P} \right) - 2460 \quad (\text{III.18})$$

E est le champ en kV/cm, p la en pression bar et α^* en 1/cm. Cette relation est limitée à une plage de champ réduit (E/p) comprise entre 30 et 200 kV/cm. bar.

- Les relations de Balla et Graggs qui permettent de comparer la croissance des coefficients d'ionisation primaire α et d'attachement η sous champ uniforme.

$$\frac{\alpha}{P} = 23 \cdot \left(\frac{E}{P} \right) - 1234 \quad (\text{III.19})$$

$$\frac{\eta}{P} = -4 \cdot \left(\frac{E}{P} \right) + 1135 \quad (\text{III.20})$$

• Et enfin la relation empirique de Nitta [15], elle est valable pour une plage de champ réduit relativement grande.

$$\frac{\alpha^*}{P} = k \cdot \left(\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_{cr} \right) \quad (\text{III.21})$$

Avec $k = 27 \text{ kv}^{-1}$ et $\left(\frac{E}{P} \right)_{cr} = 0.8775 \quad \left(\frac{\text{KV}}{\text{cm.kPa}} \right)$

Donc l'expression (III.21) devient :

$$\frac{\alpha^*}{P} = 27 \cdot \left(\frac{E}{P} - 0.8775 \right) \quad (\text{III.22})$$

Le champ critique réduit $(E/p)_{cr}$ dans le SF_6 est de 89 kV/(cm. bar), valeur obtenue pour une configuration parfaite. Aucune ionisation n'est possible pour toute valeur inférieure à ce champ critique.

Les propriétés diélectriques du SF_6 peuvent être dégradées par une diminution importante de la température à travers une diminution de la valeur critique de (E/p) provoquée par une augmentation du coefficient d'ionisation. Des précautions doivent être donc prises lors de son utilisation (disjoncteur haute tension par exemple) dans les pays où les températures peuvent descendre à des valeurs très basses (climat très froid) pour éviter les condensations.

III.3.4. Rigidité diélectrique :

L'intérêt d'utilisation du SF_6 en isolation électrique surtout en haute tension est qu'il supporte des champs électriques uniformes 2,5 fois supérieurs ceux que l'on peut appliquer dans l'air, à pression atmosphérique. Et dans les champs non uniformes, ce rapport atteint 5 fois à 2 bars, ainsi que la taille des équipements isolés au SF_6 , s'en trouvent considérablement réduites, par rapport à leurs homologues isolés à l'air.

III.3.5. Pureté :

L'hexafluorure de soufre pur n'est pas toxique. En revanche, la fabrication de ce gaz laisse parfois subsister d'autres composés de soufre (SF_4 , SF_2 , S_2F_2 , S_2F_{10}) dont certains peuvent être toxiques. D'autres impuretés sont susceptibles de nuire à la qualité diélectrique du gaz. La norme

CEI 60376, Spécifications de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre SF₆ pour utilisation dans les appareils électriques, spécifie les niveaux suivants pour les impuretés admissibles au moment de la livraison :

Corps étranger	Quantité tolérée
Air	2g/Kg
Huile minérale	10mg/Kg
CF ₄	2.4/KG
Acidité totale	1mg/Kg
H ₂ O	25mg/Kg
Impureté totale	0.3% vol

Tableau III.1 : Spécification de la pureté pour le SF₆ utilisé dans les dispositifs haute tension.

Par ailleurs, des composés nocifs peuvent être engendrés par des arcs électriques qui éclatent dans le SF₆, portant la température du gaz à environ 15000 °C. De tels arcs se produisent forcément dans un disjoncteur, par exemple, où chaque ouverture et fermeture s'accompagne d'un arc. Les sous-produits de décomposition qui en résultent sont principalement le fluorure de thionyle SOF₂, le fluorure de sulfuryle SO₂F₂ et le déca fluorure de soufre S₂F₁₀, ce dernier étant particulièrement toxique.

La norme CEI 61634, Appareillage à haute tension – Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre SF₆ dans l'appareillage à haute tension, indique les procédures à suivre et les précautions à prendre lors de la manipulation et de l'utilisation de ce gaz.

III.3.6. Effet de serre :

Le SF₆ est un gaz à effet de serre 23900 fois plus efficace que le gaz carbonique, à concentration égale ; en outre, il ne se dégrade que lentement et sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de 3200 ans.

La recommandation CEI 62271, Appareillage à haute tension, précise les conditions d'étanchéité requises pour les installations à gaz. Le taux de fuite F_p est défini comme la masse de gaz qui s'échappe de l'installation, en pourcent de la masse totale du gaz, par année [% p.a.]. La

recommandation de la CEI distingue les "systèmes fermés" et les "systèmes étanches" (soudés). Les directives actuelles spécifient, pour les installations de grandes dimensions isolées au SF₆ :

$$F_p < 0,5\% \text{ p.a. (systèmes fermés)}$$

$$F_p < 0,1\% \text{ p.a. (systèmes étanches)}$$

Ces taux ont été définis de manière à limiter autant que possible la quantité de gaz rejeté dans l'atmosphère durant toute la durée de vie de l'installation, qui est de l'ordre de 20 à 40 ans. Les procédures de contrôle du taux de fuite sont spécifiées par la norme CEI 60068-2-17, Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique – Essai Q : étanchéité.

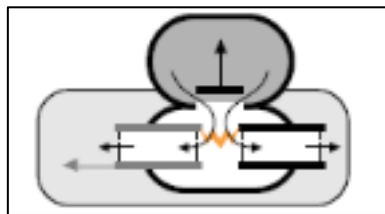


Figure III.4 : Fuite du gaz pendant le mouvement des contacts.

Par ailleurs, les installations électriques équipées d'un système de stabilisation de la pression ne sont plus autorisées, du fait de leur taux de fuite élevé. [16]

III.4 Méthode de calcul de l'énergie thermique évacuée par l'arc dans le SF₆ :

III.4.1 Déterminer la puissance de l'arc :

Puissance et énergie totale de l'arc sont deux grandeurs importantes pour étudier le comportement du gaz en présence de l'arc électrique, donc ;

La puissance thermique de l'arc peut être estimée à partir de :

$$P_{arc} = U_{arc} \cdot I_{arc} \quad (III.23)$$

Remarque :

- La tension d'arc est généralement mesurée ou modélisée.
- Typiquement, pour un disjoncteur en SF₆, U_{arc} est de l'ordre de 200–300 V sous courant nominal.
- Le courant est celui du défaut (souvent de 20 à 63 kA).

III.4.2 Intégrer la puissance sur la durée d'arc :

L'énergie totale fournie par l'arc est donnée par :

$$E_{arc} = \int_{t_0}^{t_f} P_{arc}(t) dt = \int_{t_0}^{t_f} U_{arc}(t) \cdot I_{arc}(t) \cdot dt \quad (III.24)$$

t_0 : instant d'amorçage de l'arc.

t_f : instant d'extinction (souvent au passage par zéro du courant).

Si l'arc est stable, on peut approximer souvent en pratique P_{arc} comme constant sur la durée t_{arc} .

$U_{arc}(t)$: tension d'arc instantanée [V]

$I_{arc}(t)$: courant d'arc instantané [A]

Et avec une durée de l'arc exprimée par :

$$t_{arc} = t_f - t_0 \quad (III.25)$$

Est généralement varie entre 10 -50 ms selon la technologie et le courant, cela conduit à l'expression suivante :

$$E_{arc} = P_{arc} \cdot t_{arc} = U_{arc} \cdot I_{arc} \cdot t_{arc} \quad (III.26)$$

Durée d'arc typique : de 10 ms à 50 ms.

III.4.3 Évaluer l'énergie thermique évacuée :

Une partie de cette énergie est absorbée par le SF6 sous forme de chauffage et de décomposition moléculaire.

Le SF6 a une capacité calorifique élevée et des propriétés diélectriques favorables.

L'énergie thermique évacuée Q_{SF6} est donc approximativement :

$$Q_{SF6} \approx \eta \cdot E_{arc} \quad (III.27)$$

η : efficacité d'évacuation thermique (typiquement entre 50 % et 80 % selon la géométrie et la pression du gaz)[19].

III.4.3.1 Masse de SF₆ concernée :

On estime la masse m_{SF6} impliquée dans la zone d'arc :

$$m_{SF6} = \rho_{SF6} \cdot V_{chambre} \quad (III.28)$$

ρ_{SF6} : densité volumique du gaz (environ 6,17 kg/m³ à 1 bar et 20°C).

$V_{chambre}$: Volume de la chambre d'interruption ($\sim 10^{-3}$ à 10^{-2} m³ selon le disjoncteur).

a) Chaleur absorbée :

Le SF₆ absorbe de l'énergie par :

$$Q_{chauffage} = m_{SF6} \cdot C_p \cdot (T_{arc} - T_0) \quad (III.29)$$

C_p : capacité calorifique spécifique ($\approx 0,65$ kJ/kg·K à P $\sim$ 1 bar).

T_{arc} : température finale (peut atteindre 20,000 K).

T_0 : température initiale (~ 300 K).

Chaleur de dissociation et recombinaison :

L'arc dissocie le SF₆ en ses constituants (S, F, etc.), absorbant de l'énergie latente :

$$Q_{dissociation} = m_{SF6} \cdot \Delta h_{diss} \quad (III.30)$$

Avec Δh_{diss} : énergie spécifique de dissociation (≈ 1 à 2 MJ/kg).

b) Énergie totale absorbée par le SF₆ :

Cette énergie exprime la quantité de chaleur absorbée par les molécules de gaz SF₆ pendant l'apparition de l'arc électrique, elle peut s'exprimer par :

$$Q_{SF6} = Q_{chauffage} + Q_{dissociation} \quad (III.31)$$

III.4.4 Rendement thermique et pertes :

Toute l'énergie fournie à l'arc n'est pas complètement absorbée par le gaz, cependant une partie est évacuée par rayonnement électromagnétique ($Q_{rayonnement}$) et une autre est perdue dans les électrodes ($Q_{électrodes}$) qui dépend principalement du matériau et de l'état de surface de cette électrode.

On introduit un coefficient d'absorption thermique noté (η) et peut s'exprimer par :

$$\eta = \frac{Q_{SF6}}{E_{arc}} \quad (III.32)$$

III.5 Calcul de l'énergie évacuée :

Prenons dans notre travail un poste blindé comprenant un disjoncteur SF₆ exploité à 220 KV, et considérons que ;

Tension nominale : 220 kV.

Courant de court-circuit : $I_{cc} \approx 40 \text{ kA}$ (valeur typique).

Durée de l'arc : $t_{arc} \approx 35 \text{ ms}$.

Tension d'arc : $U_{arc} \approx 300 - 400 \text{ V}$ (arc SF_6) et avec un Volume de la chambre d'arc :

$V_{chambre} \approx 0,001 \text{ m}^3$,

Pression du SF_6 : 5 bars (densité $\approx 30,85 \text{ kg/m}^3$).

Alors :

D'après l'expression (III.26) on trouve :

$$E_{arc} = 380 \times 40,000 \times 0,035 = 532000 \text{ J} = 532 \text{ K joule}.$$

$$\text{La densité } \rho_{\text{SF}_6} \text{ à 5 bar} = 6,17 \times 5 = 30,85 \text{ kg/m}^3.$$

Nous devons aussi déterminer la masse volumique du gaz SF_6 correspond à la chambre dont la quelle est immergé les contacts du disjoncteur afin d'absorber l'arc développé.

Utilisons l'équation (III.28), on trouve ;

$$m_{\text{SF}_6} = 30,85 \times 0,001 = 0,03085 \text{ kg}$$

Donc la quantité de chaleur du Chauffage du SF_6 est alors d'après l'expression (III.29) :

$$C_p \approx 0,65 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, T_{arc} \approx 20,000 \text{ K}, T_0 \approx 300 \text{ K}.$$

$$Q_{chauffage} = 0,03085 \times 0,65 \times (20000 - 300) \approx 0.395 \text{ M Joule}.$$

et l'Énergie de dissociation et recombinaison vaut alors en utilisons l'équation (III.30), sachons que ;

$$\Delta h_{diss} \approx 1,5 \text{ MJ/kg}.$$

$$Q_{dissociation} = m_{\text{SF}_6} \times \Delta h_{diss} = 0,03085 \times 1,5 = 0,0462 \text{ (M Joule)}.$$

Et l'énergie totale absorbé par le gaz SF_6 devient :

$$Q_{\text{SF}_6} = Q_{chauffage} + Q_{dissociation} = 0.395 + 0.0462 = 0.4412 \text{ (M joule)}.$$

En examinons le rendement thermique l'utilisation du gaz SF_6 dans ces conditions élaborées précédemment, il devient :

$$\eta = \frac{0.4412}{0.532} = 0.83 = 83\%$$

Ce rendement offre une interprétation favorable de l'utilisation du gaz SF_6 ce jour-là, car il permet de mieux absorber la chaleur dégagée par la présence de l'arc électrique lors des manœuvres d'interruption réalisées avec ce type de disjoncteur.

II.5.1 Relation entre le courant de court-circuit et le courant d'arc :

Avant l'ouverture des contacts, le courant dans le circuit est le courant de court-circuit I_{cc} , qui peut être calculé à partir de la tension du réseau et de l'impédance du circuit au point du défaut :

$$I_{cc} = \frac{U}{Z_{cc}} \quad (\text{III.33})$$

Où :

- U ; est la tension du réseau,
- Z_{cc} ; est l'impédance du circuit au moment du court-circuit.
- Au moment de l'ouverture des contacts, le disjoncteur interrompt le courant, mais l'arc électrique maintient le passage du courant. Le courant qui circule est donc très proche de I_{cc} , et est généralement noté I_{arc} .
- À la coupure, l'objectif du disjoncteur est de faire chuter le courant à zéro et de maintenir le circuit ouvert (extinction de l'arc).

Remarque :

- Dans les disjoncteurs, on distingue également le courant de fermeture (au moment du contact) et le courant de coupure (juste avant extinction), qui peuvent présenter des variations par rapport à I_{cc} en fonction de la dynamique de l'arc.
- L'énergie dissipée dans l'arc dépend du courant I_{arc} , de la tension aux bornes de l'arc, et de la durée d'extinction.

III.6. Calcul des courants de courts circuits :

Il est nécessaire de déterminer tous les courants de court circuits dans les différents jeux de barres afin de connaître le courant de l'arc électrique qui peut se produire dans ces points, et pour cette raison nous avons choisi un réseau de structures comprenant plusieurs JDB.

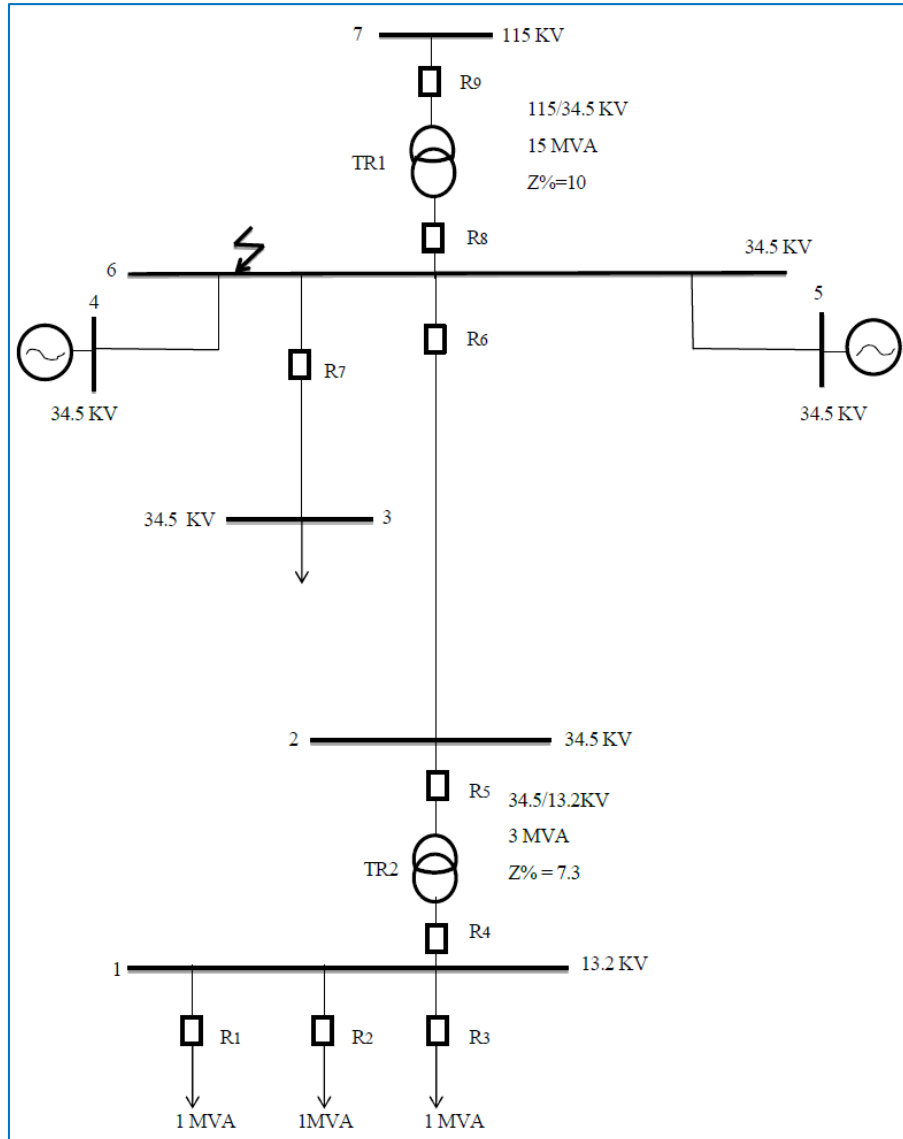


Figure III.5 : Schéma électrique du réseau

III.6.1. Calcul de l'impédance équivalente :

En se basant sur le schéma électrique du réseau, on calcule l'impédance équivalente du système en amont de la barre principale (JDB) comme suit[20]:

$$Z_{bas} = \frac{u^2}{ps} \rightarrow \frac{34500^2}{183.11 \cdot 10^6} = 6.5 \, \Omega \text{ ramenée à la tension 34.5 KV.}$$

$$Z_{tanf1} = x \frac{u^2}{P_s} \rightarrow 0.1 \frac{34500^2}{15 \cdot 10^6} = 7.93 \, \Omega \text{ ramenée à la tension 34.5 KV.}$$

$$Z_{tanf2} = x \frac{u^2}{P_s} \rightarrow 0.073 \frac{34500^2}{3 \cdot 10^6} = 28.96 \, \Omega \text{ ramenée à la tension 34.5 KV.}$$

$$Z_{lig} = z_{ll} \frac{u^2}{P_s} \rightarrow 1.086 \frac{34500^2}{100 * 10^6} = 12.93 \Omega \text{ ramenée à la tension 34.5 KV.}$$

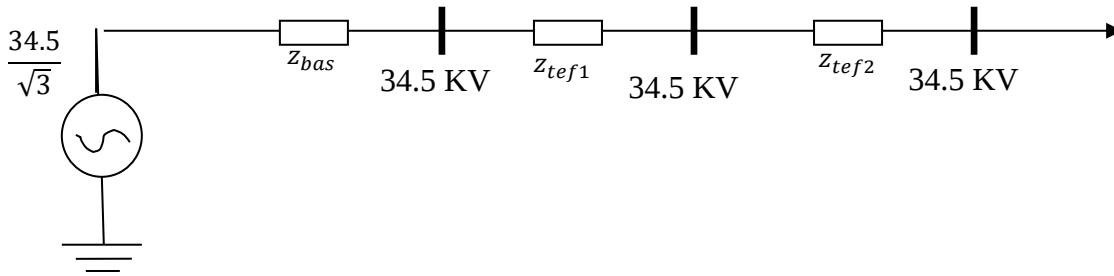


Figure III.6 : Réseau positif équivalent d'ordre de 34.5 KV.

On détermine les courants nominaux associés à chaque jeu de barres ;

$$I_{nom} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{1 * 10^6}{\sqrt{3} * 13.2 * 10^3} = 43.74 \text{ A} \quad \text{et la tension 13.2 KV}$$

$$I_{nom 4} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{3 * 10^6}{\sqrt{3} * 13.2 * 10^3} = 131.22 \text{ A} \quad \text{et la tension 13.2KV}$$

$$I_{nom 5} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{3 * 10^6}{\sqrt{3} * 34.5 * 10^3} = 50.20 \text{ A} \quad \text{et la tension 34.5 KV}$$

$$I_{nom 6} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{3 * 10^6}{\sqrt{3} * 34.5 * 10^3} = 50.20 \text{ A} \quad \text{et la tension 34.5 KV}$$

$$I_{nom 7} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{1 * 10^6}{\sqrt{3} * 34.5 * 10^3} = 16.73 \text{ A} \quad \text{et la tension 34.5 KV}$$

$$I_{nom 8} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{15 * 10^6}{\sqrt{3} * 34.5 * 10^3} = 251.02 \text{ A} \quad \text{et la tension 34.5 kV}$$

$$I_{nom 9} = \frac{P}{\sqrt{3} U} \rightarrow \frac{15 * 10^6}{\sqrt{3} * 115 * 10^3} = 75.31 \text{ A} \quad \text{et la tension 115 KV}$$

Dans une seconde étape, les grandeurs en régime de court-circuit sont calculées.

Les puyissance de court circuit dans chaque point (JDB) est exprimée par :

(Scc) MVA .

$$Z_{cc} = \frac{U_{nom}^2}{S_{cc}} \text{ Donc : } S_{cc} = I_f \cdot U^2$$

$$S_{cc} = \sqrt{3} I_{f8} \cdot U_{nom}^2 \sqrt{3} = 2170.34 (34.5 * 10^3) = 129.69 \text{ MVA}$$

$$Z_{tef1} + Z_{bas} = \frac{U^2 (34.5)^2}{S_{cc} 129.69} = 9.18 \Omega \quad \text{sous la tension de 35.5 KV}$$

$$\text{Et } \frac{(115)^2}{129.69} = 101.97 \, \Omega \quad \text{sous une tension de 115 KV}$$

$$Z_{sys} = 101.97 - 88.17 = 13.80 \, \Omega$$

III.6.2. Calcul du courant de défaut :

$$I_{f1,2,3,4} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3}(Z_{bas} + Z_{tef2} + Z_{lig})} = \frac{34.5 \, 10^3}{\sqrt{3}(6.5 + 12.93 + 28.96)} = 411.63 \, \text{A.}$$

$$I_{f5} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} Z_{bas} + Z_{lig}} = \frac{34.5 \, 10^3}{\sqrt{3}(6.5 + 12.93)} = 1025.15 \, \text{A.}$$

$$I_{f6,7} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} Z_{bas}} = \frac{34.5 \, 10^3}{\sqrt{3}(6.5)} = 3064.40 \, \text{A.}$$

$$I_{f8} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} U_{cc}} = \frac{129.69 \, 10^6}{34.5 \, 10^3} = 2710.34 \, \text{A.}$$

$$I_{f9} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} Z_{syst}} = \frac{115 \, 10^3}{\sqrt{3} \, 13.80} = 4811.25 \, \text{A.}$$

Il convient de souligner que les courants de défaut relevés au niveau des différents jeux de barres du réseau électrique atteignent généralement plusieurs dizaines de kiloampères. Ces valeurs constituent une base essentielle pour les étapes suivantes, notamment le dimensionnement des disjoncteurs utilisant le gaz SF₆. Ce dimensionnement concerne, entre autres, le volume de la chambre d'atténuation de l'arc électrique ainsi que la quantité de chaleur à évacuer vers l'environnement extérieur, comme décrit dans le paragraphe précédent

III.7 Conclusion:

Il ressort de ce chapitre, à l'issue de cette étude approfondie, que le choix de l'isolant constitue un facteur déterminant dans l'efficacité et la sécurité des dispositifs de coupure. Bien que l'air et l'azote aient été historiquement utilisés en raison de leurs bonnes propriétés isolantes, le gaz SF₆ s'est imposé comme la meilleure option technique dans ce domaine. Grâce à sa capacité élevée d'extinction de l'arc électrique et à ses excellentes propriétés diélectriques, ce gaz permet une coupure électrique sûre et efficace, même sous des tensions très élevées. Son utilisation a contribué à améliorer la fiabilité des réseaux électriques et à prolonger leur durée de vie. Toutefois, son impact environnemental doit être pris en compte lorsqu'il s'agit d'envisager l'avenir des techniques de coupure et de développer des alternatives plus durables.

Conclusion générale :

À travers ce mémoire, on s'intéresse aux techniques de coupure de l'arc électrique dans les réseaux à haute tension, en mettant l'accent sur les différents types de disjoncteurs à vide, à huile, à air comprimé, et plus particulièrement à gaz SF₆. L'arc électrique, bien qu'inévitable dans certaines situations de coupure, représente un véritable défi technique et sécuritaire dans les systèmes électriques modernes.

Après avoir présenté, dans le premier chapitre, des généralités sur le réseau électrique puis le phénomène de l'arc : ses propriétés, ses effets et les principes généraux de son extinction. Cela nous a permis de poser un cadre clair pour aborder les solutions techniques qui permettent de maîtriser sa coupure.

Ensuite, nous avons étudié dans le deuxième chapitre les principaux appareils de coupure en haute tension : les sectionneurs, interrupteurs, et nous sommes particulièrement concentrés sur les disjoncteurs (à huile, à air comprimé, à vide et à gaz SF₆). Chaque technologie a ses principes de fonctionnement, ses avantages et ses limites, mais nous avons vu que le disjoncteur à SF₆ s'impose aujourd'hui comme la solution la plus utilisée en haute tension, grâce à sa fiabilité et sa capacité à couper efficacement l'arc.

Enfin, nous avons approfondi dans le troisième chapitre les propriétés du gaz SF₆ et ses propriétés, ainsi que les méthodes de modélisation et de calcul de l'arc, qui permettent de mieux comprendre et prévoir le comportement de l'arc dans les conditions de coupure, ce qui nous permet de choisir le meilleur disjoncteur à partir de la tension de l'arc.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les techniques liées à la coupure de l'arc en haute tension, mais aussi de prendre conscience de l'importance de bien choisir les dispositifs de protection pour garantir la sécurité et la performance des réseaux électriques.

Références bibliographiques

- [1] « Guide de la distribution électrique basse tension et HTA », Schneider Electric, 2009.
- [2] A. BIACOTTO et P. BOYE, « La construction normalisée en électricité », tome 1, Edition AFNOR, 1985.
- [3] IGNATOVA, Vanya. Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : Application aux creux de tension et à la pollution harmonique, Thèse de doctorat, spécialité Génie électrique, Université Joseph Fourier – Grenoble, soutenue le 20 octobre 2006, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble.
- [4] <https://fr.wikipedia.org>.
- [5] CHERIF, Bilal Djamal Eddine. *Chapitre 03 : Phénomènes d'interruption du courant électrique*. Université de M'Sila, Département d'électrotechnique , année universitaire 2019/2020
- [6] Cadarc Bts ETT , « ressource de l'arc électrique » , dossier d'étude
- [7] Robert morel , schneider electric cahier technique N° 154 ; « techniques de coupures des disjoncteurs BT », édition juin 2000
- [8] Ziani A., Étude de l'arc électrique dans les appareils de coupure de haute et moyenne tension, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, 2009.
- [9] : Hadjira kheffache, « Etude des techniques de coupure dans les disjoncteurs », Mémoire de Fin d'études de master, université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou, 2014.
- [10] : Techniques De L'ingenieur : Coupure dans l'huile : Techniques de coupure en moyenne tension. www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/reseaux-electriques-de-distribution-publique_42264210/techniques-de-coupure-en-moyenne-tension-d4705/coupure-dans-l-huile-d4705niv10006.html

- [11] :el-pro-cus :What is an Oil Circuit Breaker : Working & Its Types www.elprocus.com/what-is-an-oil-circuit-breaker-working-its-types/
- [12] : Delixi : Guide complet sur les disjoncteurs à vide : construction, fonctionnement et maintenance. rb.gy/561kuq
- [13]: Tidjma.tn, air-blast circuit breaker Disjoncteurs à air comprimé : Gardiens des systèmes électriques haute tension . www.tidjma.tn/fr/electrical/air-blast-circuit-breaker-/
- [14]: J. M. Meek and J. D. Craggs, "Electrical breakdown of gases", Clarendon, oxford, 1953.
- [15]: M. Taki, D. Maekawa, H. Odaka, H. Mizoguchi and S. Yanabu, "Interruption Capability of CF₃I Gas as Substitution Candidate for SF₆ Gas", IEEE Trans, Dielectr. Electr. Insult. Vol.14, N°2, April 2006.
- [16] S. XIAO, "Research on Insulation Performance of SF₆ Substitute CF₃I/CO₂ under Power Frequency Voltage and the Influence of Micro-moisture on CF₃I", these de doctorate university Toulouse, 2016.
- [17] H. Kasuya, Y. Kawamura, H. Mizoguchi, "Interruption capability and decomposed gas density of CF₃I as a substitute for SF₆ gas", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 17, August 2010.
- [18] F. Beloucif, "Analyse et prédiction des seuils d'apparition des décharges couronnes dans les gaz isolants en haute tension" , these de doctorat , universite 8 mai 1945-Guelma, octobre 2017.
- [19] A. L. Sheldrake, "Handbook ofElectrical Engineering For Practitioners in the Oil, Gas and PetElectrical Power System
- [20] C. Christopoulos, A. Wright, "Electrical Power System Protection",2nd Edition. Originally published by Kluwer Academic Publishers in 1999.