REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du génie électrique



Projet de fin de d'etudes

Présenté Pour l'obtention du diplôme de
Master en Génie électrique

Option : Réseaux électriques

THEME :

Modélisation analytique - Calcul d'un arc électrique dans une huile isolante.

Proposé par :

Mme.CHALIAL KARIMA

Dirigé par :

Pr. ZIANI Abderrahmane
Mme.CHALIAL KARIMA

Préparé et présenté par :

AL_SHAWAFI MOHAMMED
IMENE BAGHDADI



Année universitaire 2019 - 2020

Remerciements

Nos sincères remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné afin de réaliser ce mémoire.

Également, nous remercions notre promotrice Madame

CHALLAL Karima.

Pour son encadrement et sa disponibilité.

Aussi, nous la remercions pour ses encouragements, son indulgence, et sa Sympathie durant le déroulement de ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance aux membres de jury de mémoire qui ont eu l'amabilité de lire et juge ce manuscrit de mémoire.

Nous remercions également ***Mr Ziani*** *Abderrahmane et*

Mr Moulai Houssine *qui nous ont suivies et leurs aides ainsi que leurs judicieux conseils*

qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Nous remercions également tous les enseignants de département d'électrotechnique de l'université

YAHIA FARES DE MEDEA *qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

J'exprime aussi ma gratitude à mes collègues de l'université pour leur soutien et leur aide surtout les membres de l'équipe de recherche MUDJAMEL.

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

Dédicace

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde pour leurs sacrifices :

ma chère mère et mon père vous m'avez accueilli à bras ouverts dans votre famille. En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

A mes frères: belal, Abdullah.

A toute la famille " " sans exception.

A mes chers collègues: rema, Shahrazade. iman

Mon binom : iman.

A mes amis qui ont emporté avec moi aliénation : Hasan, Mujammal Hamidou, Amjad Asakra, mahran ,Khatib , Alhalmi ,emad, Ayham ,Nezar, Firas, Ibrahim, Khaled, Ezzet, Mohammed AL Qutati, Amjad Moulki, ,ayoub, Majed,yeman, Montaser, Zayd, ,Ahmad yahia.

Atout mes amis de la promotion 2019\2020

Alshawafi mohammed

Dédicace

A la lumière et la joie de ma vie ma mère et mon père.

Qui m'ont toujours encouragé, aidé à surmonter tous les obstacles

Que j'ai rencontré dans ma vie et être à mes côtés dans les moments les plus difficiles.

A mes très chers et magnifiques sœur : Halima, Fatiha, Rayhana ,Yousra.

A tous mes amis fidèles : Chahrazed , Rima, Souad , Assma, Et Meriem.

J'oublié pas dans ce contexte de remercier mon binôme Mohamed Al-shawafi qui a su me comprendre durant toute la période de préparation de la thèse.

A tous mes amis de la promotion 2019/2020.

A tous ceux qui m'aiment et a tous ce que j'aime.

Imene bgghdqdi

الملخص:

يحدث انقطاع التيار الكهربائي في قواطع الدائرة ذات الجهد العالي من خلال ظهور قوس كهربائي بين القطبين اللذين يبتعدان عن بعضهما البعض في وسط عازل مثل الزيت أو SF6. . بالإضافة إلى ذلك ، يؤدي انقراض القوس إلى اختلافات كبيرة جدًا في الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوسط الانكسار والظروف الحرارية والديناميكية الشديدة في البلازما الحرارية. نمذجة هذه الظواهر لا تزال معقدة للغاية

درسنا حول الدقة الرقمية لنموذج Mayr لقاطع الدائرة الكهربائية المعزول بالزيت. نحن مهتمون بشكل رئيسي بمحاكاة تطور الموصلية. ساعد هذا العمل في تفسير تأثير معلمات معينة على سلوك القوس أثناء الانقراض ، ولا سيما وقت إزالة الأيونات ، والجهد القوسي وقوة التبريد.

Abstract:

Electric current cuts in high voltage circuit breakers occur through the appearance of an electric arc between the two electrodes which move away from each other in an insulating medium such as oil or SF6. . In addition, the extinction of the arc induces very significant variations in the physic-chemical properties of the breaking medium and the severe thermal and dynamic conditions in thermal plasma. The modeling of these phenomena remains quite complicated

Our study is on the digital resolution of Mary's model for an oil-insulated circuit breaker. We are mainly interested in the simulation of the evolution of conductance. This work explains the influence of certain parameters on the behavior of the arc during extinction, in particular the deionization time τ , the arc voltage $\boldsymbol{u_c}$ and the cooling power $\boldsymbol{P}$.

Résumé :

Les coupures de courant électrique dans les disjoncteurs de haute tension s'effectuent à travers l'apparition d'un arc électrique entre les deux contants qui s'écartent l'une de l'autre dans un milieu isolant comme l'huile ou le SF6. En plus, l'extinction de l'arc induit des variations très importantes des propriétés physico-chimiques du milieu de coupure et des conditions thermiques et dynamiques sévères au sein du thermique. La modélisation de ces phénomènes reste assez compliquée

Notre mémoire porte sur la résolution numérique du modèle de Mayr pour un disjoncteur isolé à l'huile. Nous sommes intéressés essentiellement à la simulation de l'évolution de la conductance. Ce travail a permet d'expliquer l'influence de certains paramètres sur le comportement de l'arc au cours de l'extinction, notamment le temps de désionisation τ la tension d'arc $\boldsymbol{u_c}$et la puissance de refroidissement $\boldsymbol{P}$.

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation
SF6	Hexafluorure de soufre
C_p	carbone paraffinique
C_n	carbone naphténique
C_a	carbone aromatique
ξ	La permittivité
ρ	la résistivité
$tg\sigma$	le facteur de perte
E_c	la rigidité diélectrique
Tau	La constante de temps de l'arc.
P_0	La puissance de refroidissement.
U_0	la tension statique de l'arc.
P_m	La puissance de refroidissement de l'état statique de Mayr
g_m	La conductance de l'arc décrite par l'équation de Mayr.
Tau_m	La constante de temps de Mayr.
Tau_0	La constante de temps de l'arc
$\propto$	Le paramètre qui influe sur Tau en fonction de g

β	le paramètre qui influe sur P en fonction de g.
P	La pression de remplissage du disjoncteur.
G	la conductance totale de l'arc
g_j	La conductance partielle de la $j^{ème}$ portion de l'arc.
Tau_j	La constante de temps de la $j^{ème}$ portion de l'arc.
u_j	La tension partielle de la $j^{ème}$ portion de l'arc.
λ_j	La commande Cassie-Mayr, de la $j^{ème}$ portion de l'arc.
HT	Haute Tension
THT	Très Haute Tension
MT	Moyenne Tension

Liste des tableaux

N⁰ Tableau	Nom des tableaux	Page
Tableau I.1	Différentes catégories d'isolants liquides.	19
Tableau II.1	Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie.	32

Liste des figures

N^0 Figure	Nom des figures	Page
Figure I.1	Parties principale d'un disjoncteur HT.	6
Figure I.2	Deux générations de disjoncteurs ouverts : 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz	8
Figure I.3	Disjoncteur à bain d'huile : coupe schématique.	13
Figure I.4	Constitution du Chambre de coupure.	14
Figure I.5	Effet de l'arc dans la chambre de coupure.	15
Figure I.6	La forme du courant prise en considération pour le pouvoir de coupure.	16
Figure I.7	Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale.	21
Figure I.8	Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.	22
Figure II.1	Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.	31
Figure II.2	Le modèle de Habedank.	34
Figure II.3	Le modèle de KEMA.	36
Figure II.4	Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés.	
FigureIII.1	Le comportement de la conductance avec tau=0.57µs.	39

FigureIII.2	Le comportement de la conductance avec tau=0.27µs.	42
Figure III.3	Le comportement de la conductance avec U=380 (Volt).	43
FigureIII.4	Le comportement de la conductance avec U=1000 (Volt).	44
FigureIII.5	Le comportement de la conductance par trois valeurs tau (0.0002, 0.0003, 0.0004) s.	46
FigureIII.6	Le comportement de la conductance avec U=1000 (Volt).	47
FigureIII.7	Le comportement de la conductance par prendre tau=0.2s.	48
FigureIII.8	Le comportement de la conductance par prendre tau=0.002s.	48
FigureIII.9	Le comportement de la conductance si P0>pm.	49
FigureIII.10	Le comportement de la conductance si P0<pm.	50

Sommaire

Introduction générale…….....1

Chapitre 1 : RAPPELS SUR LES ARC ELECTRIQUE ET LES DISJONCTEURS HAUTE TENSON

I. Introduction…….....3

I. 2 Les disjoncteurs HT ……..……4

I.2.1 Définition d'un disjoncteur HT ……...4

I.2.2 Principe de fonctionnement d'un disjoncteur……...4

I.3 Le rôle des disjoncteurs HT ……5

I.4 Description générale d'un disjoncteur HT ……...5

I.5 Classification des disjoncteurs HT……...7

I.5.1 Selon la destination……...7

I.5.2 Selon l'installation……7

I.5.3 Selon le type de matériel……...8

I.5.4 Selon l'utilisation……..9

I.5.5 Selon le milieu de coupure ……10

I.6 .Coupure dans l'huile ……....12

I.6.1 Formulation d'hydrogène par décomposition de l'huile……12

I.6.2 Théorie de la bulle gazeuse ……12

I.6.3 La chambre de coupure : … ……..…….....13

I.7 Le pouvoir de coupure……..……15

I.7.1 Le pouvoir de fermeture assigné ……..……... …….16

I.8 Isolants liquides ……....17

I.8.1 Rôle des isolants liquides ……...17

I.8.2 Autres fonctions ……18

I.8.3 Principaux types des isolants liquides…….18

I.8.3.1 Huiles minérales …….....19

I.8.3.2 Huiles végétales ou esters naturels……...……21

I.9 Propriétés des huiles…….22

I.9.1 Propriétés électriques…….22

I.9.2 Propriétés chimiques……..22

I.9.3 Propriétés physiques……23

I.10 L'arc électrique dans le disjoncteur…….23

I.11 Caractéristiques de l'arc électrique……..25

I.11.1 Tension d'arc…….25

I.11.2 Température……..26

I.11.3 Les avantage de l'arc électrique……...26

I.11.4 Les inconvénients de l'arc électrique……...26

I.12Conclusion……...…26

Chapitre II : Modélisation d'un arc électrique dans huile isolante.

II.1 Introduction …….....27

II.2 Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique…….....27

II.3 Représentation des modèles d'arc à boite noire…….28

II.4 Les modèles de base ……..……...28

II.4.1 Le modèle de Mayr ……..…….29

II.4.2 Le modèle de Cassie …….31

II.4.3 Comparaison des deux modèles ……...32

II.5 Les modèles d'arc améliorés ……..…….33

II.5.1 Le modèle de Mayr modifié …….33

II.5.2 Le modèle de Habedank ...……34

II.5.3 Le modèle de Schwarz …….....35

II.5.4 Le modèle de KEMA ……...…….……36

II.5.5 Le modèle de Schavemaker …….38

II.5.6 : Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts……..…….38

Conclusion ……..40

Chapitre III : Calcul Numérique et Modélisation analytique de l'arc électrique

III.1 Introduction 41

III.2 Représentation de l'évolution de la conductance de l'arc..... 41

III.2.1 Calcul numérique « sous environnement Matlab » de la conductance en fonction de temps:..... ……41

III.3.2 Calcul numérique du comportement de la conductance pour une puissance de refroidissement plus faible. 46

III.3.3 Calcul analytique de la conductance g en extinction 47

Conclusion 51

Conclusion générale……..……52

Introduction générale

Introduction générale

L'exploitation, la maintenance et la protection des réseaux électriques des installations de toutes natures qui existent aujourd'hui ont conduit les constructeurs à porter une attention toute particulière à la réalisation de matériels de coupure, qu'ils soient de haute ou basse tension.

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

Lors de la coupure, l'appareil doit absorber toute l'énergie électromagnétique stockée dans le réseau et supporter une importante surtension.

Cette puissance, et la surtension qui l'accompagne, sont à l'origine de la naissance d'un arc électrique à l'endroit de la coupure.

Le disjoncteur tente de mettre au maximum à profit les propriétés remarquables de l'arc électrique pour dissiper l'énergie électromagnétique.

Il a principalement pour vocation de renforcer l'échange thermique avec l'environnement lors d'un mouvement forcé d'électrodes et de limiter les surtensions en privilégiant l'allongement de l'arc.

Pour orienter la conception des disjoncteurs et aller dans le sens de l'optimisation, le constructeur doit connaître au mieux le comportement de l'arc dans son environnement.

Les huiles isolantes sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique :

Transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure…), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise... Elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations cellulosiques et/ou comme produit de remplissage des matériels.

Les volumes d'huiles employés varient de quelques litres pour les disjoncteurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance.

Dans les disjoncteurs, les huiles jouent deux rôles essentiels : celui d'assurer l'isolation électrique et celui d'évacuer la chaleur juste après la création de l'arc.

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arc électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées). Sous l'action de l'arc électrique, l'huile est ainsi décomposée et plusieurs types de gaz sont produits (essentiellement de l'hydrogène et de l'acétylène) lors de cette décomposition. L'énergie de l'arc est utilisée pour décomposer et évaporer l'huile, ceci permet d'injecter une puissance pour refroidir le milieu entre les contacts et par suite d'interrompre le courant à son passage par zéro.

Ce travail se comporte de trois chapitres:

Le premier chapitre, nous présentons une brève revue sur les arcs électriques et les disjoncteurs haute tension et améliorer les performances de fonctionnement d'un disjoncteur.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des différents modèles d'arc électrique à boite noire, pour pouvoir exprimer le comportement dynamique de l'arc, sous des hypothèses simplificatrices.

Dans le troisième chapitre, on présente les simulations de la conductance et l'interprétation de nos résultats obtenues.

CHAPTER I

RAPPELS SUR LES ARC ELECTRIQUE ET LES DISJONCTEURS HAUTE TENSON

1.1 Introduction :

L'origine du terme « arc électrique » remonte au début du XIXe siècle notamment avec la fabrication d'une lampe de « sureté » par le physicien Humphry Davy pour les mineurs travaillant dans les atmosphères inflammables des mines. Cette lampe est contenue dans une toile métallique pour l'isoler de l'atmosphère extérieure, protégeant ainsi les mineurs d'une éventuelle explosion. [1]

Elle est composée de deux électrodes en carbone et est alimentée par les piles électriques de Volta.

Lorsque le courant est libéré au travers de ces électrodes, Humphry Davy a observé une « flamme » ou une « lumière électrique » intense reliant ces électrodes sous la forme d'un arc. La forme et la nature particulière de cette lumière donnent ainsi l'enchainement de mots « arc électrique ».

Actuellement, l'arc électrique est considéré comme un outil commun de certaines applications et études, notamment celles des disjoncteurs, de la soudure, de la coupure, des fours métallurgiques, de la dépollution de gaz, du foudroiement des avions ou encore de la fabrication de nanostructures. Pour maitriser les procédés associés à ces applications directement liées à l'arc électrique, les scientifiques se tournent vers le domaine de la physique des plasmas.

Un plasma crée par un arc électrique appartient à la catégorie des plasmas thermiques. C'est un état particulier de la matière électriquement neutre et conducteur, où la température des ions, des électrons et des neutres qui le composent, est considérée comme quasi-identique et est généralement de l'ordre d'une dizaine de milliers de Kelvin. Cette catégorie de plasma est caractérisée par une température élevée, une forte densité d'énergie et un rayonnement important.

Le développement des réseaux de transport et des réseaux industriels place les disjoncteurs haute tension dans des conditions de fonctionnement beaucoup plus sévères.

Un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

Le disjoncteur permet de protéger la partie en aval, soit d'une façon volontaire ou involontaire suite à un défaut dans cette partie.

Sur un réseau électrique, l'interruption du courant s'avère quelques fois nécessaire. Que ce soit de façon volontaire comme lorsqu'il est nécessaire d'isoler une partie du réseau pour y effectuer des travaux ou de façon accidentelle, en cas de foudre, de vents violents ou de séisme par exemple, la présence du disjoncteur prend toute son importance, il permet de rapidement reconfigurer le réseau et minimise les dommages possibles, conséquences directes des excès de courant qui se développent dans ces situations. Des vies humaines et le matériel (assez coûteux) en aval peuvent donc être ainsi protégés [1].

I. 2 Les disjoncteurs HT :

1.2.1 Définition d'un disjoncteur HT :

Selon la définition donnée par la (commission-lélectrotechnique internationales) , un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique.
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit dû à la foudre.

Grâce à ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est le seul capable d' interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

I.2.2 Principe de fonctionnement d'un disjoncteur :

Dans le disjoncteur se trouvent des électrodes, initialement en contact, parcourues par le courant du réseau. Le disjoncteur est calibré de telle sorte que lorsque le courant dépasse une valeur seuil, les électrodes s'écartent(en cas de défaut). L'ouverture du circuit entraîne la formation d'un arc électrique entre les électrodes.

L'arc étant conducteur, le courant électrique continue de circuler. Mais un soufflage énergique de l 'arc par le gaz froid fortement comprimé favorisera l'extinction de l'arc lors du passage à zéro du courant [1].

I.3 Le rôle des disjoncteurs HT :

- Le disjoncteur électrique est l'appareil de contrôle et de sécurité clé sur un réseau

électrique. Il doit laisser passer le courant électrique (conducteur) en absence de défaut

(la plupart du temps) et doit être capable de l'interrompre dès l'apparition d'une anomalie sur le réseau. Il a un rôle d'isolation et de protection des autres dispositifs électriques positionnés en aval sur le réseau défaillant et des personnes pouvant se trouver à proximité de ce dernier.

- Un disjoncteur doit être fiable et efficace de manière quasi-instantanée. Il doit être capable de s'ouvrir sans aucun problème même après une longue période d'inactivité.

De plus, lors du passage du courant permanent, le disjoncteur est soumis à un échauffement élevé. Il doit donc être capable de supporter cet échauffement pour ne pas détériorer ses parties internes. Il doit également avoir de bonnes propriétés mécaniques et être capable de réaliser un grand nombre de coupures sans trop détériorer ses contacts et ses différentes pièces dans l'optique de pouvoir être utilisé de nombreuses fois sans pour autant nécessiter d'interventions extérieures [2].

I.4 Description générale d'un disjoncteur HT :

Un disjoncteur à haute tension est composé de trois parties principales (figure. I.1) :

1. Partie électrique active.

2. Partie commande.

3. Partie Contrôle [3].

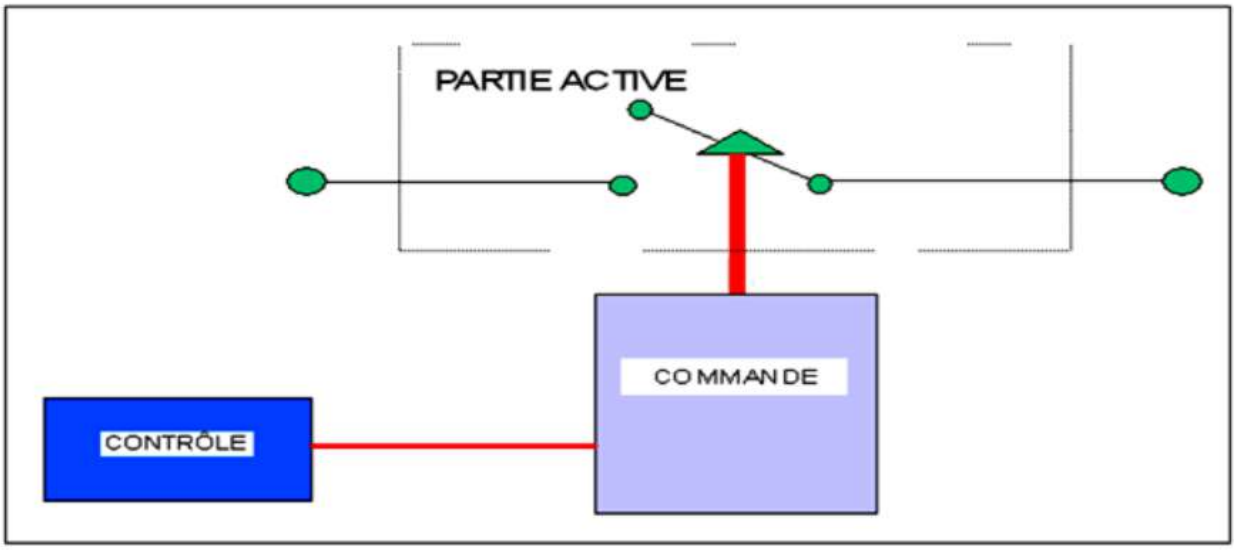


Figure. I.1 Parties principale d'un disjoncteur HT.

a. Partie électrique active :

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

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

b. Partie commande :

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

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

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

- Commande pneumatique
- Commande hydraulique
- Commande mécanique à ressort

c. Partie Contrôle :

C'est la partie où les commandes d'opération sont initiées à partir d'une impulsion électrique d'une durée de fraction de seconde sur une bobine dans le mécanisme de commande. Celui-ci amplifie cet ordre en une opération de la disjonction en libérant l'énergie nécessaire emmagasinée préalablement dans les accumulateurs d'énergie pour effectuer la coupure ou la fermeture. Cette partie comprend aussi les bobines d'enclenchement et de déclenchement, le système de relayage basse tension, les divers capteurs (de pression, de fin de course, etc.) nécessaires pour effectuer la surveillance et le contrôle du fonctionnement.

I.5 Classification des disjoncteurs HT :

I.5.1 Selon la destination :

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

- Réseaux de répartition ou de transport (> 52 kV).
- Réseaux de distribution (< 52 kV).
- Installations industrielles (3,6 à 24 kV). [4]

I.5.2 Selon l'installation :

Selon sa possibilité d'installation, on distingue :

a. Pour l'intérieur : qui est destiné à être installé uniquement à l'intérieur d'un bâtiment, à l'abri des intempéries et de la pollution, avec une température ambiante qui n'est pas inférieure à - 5 °C (éventuellement - 15 °C ou - 25 °C).

b. Pour l'extérieur : qui est prévu pour être installé à l'extérieur des bâtiments, et qui par suite doit être capable de fonctionner dans des conditions climatiques et atmosphériques contraignantes.

I.5.3 Selon le type de matériel :

Deux types de matériels sont distingués :

a. Les disjoncteurs ouverts

Dont l'isolation externe est faite dans l'air



Figure. I.2 : Deux générations de disjoncteurs ouverts : 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz .

b. Les disjoncteurs sous enveloppe métallique ou blindés

Muni d'une enveloppe métallique, reliée à la terre, qui permet d'éviter tout contact accidentel avec les pièces sous tension. Le disjoncteur fait partie d'une cellule isolée au SF6 qui comprend les différents organes nécessaires au fonctionnement du poste : disjoncteur, jeu de barres, sectionneur de

jeu de barres, sectionneur de terre, transformateur de courant. Postes sous enveloppe métallique (PSEM). [4]

c. Les disjoncteurs hybrides

dits « Dead Tank », dont l'isolation des parties actives est faite dans le SF6 à l'intérieur d'une cuve métallique et dont le raccordement au réseau est fait par l'intermédiaire de traversées isolantes. Cette disposition permet de placer les transformateurs de courant directement aux bornes du disjoncteur, en des points qui ne nécessitent pas d'isolation électrique [4].

I.5.4 Selon l'utilisation :

On peut aussi classer l'appareillage en fonction de son utilisation [4] :

a. Disjoncteurs de ligne

Comme leur nom l'indique, ils sont chargés de manœuvrer les lignes des réseaux à haute tension et, à ce titre, ils doivent posséder la plupart des performances pouvant être exigées d'un disjoncteur à haute tension. Dans des conditions normales de service, ils sont utilisés pour l'ouverture ou la fermeture des lignes. Ils doivent être capables d'effectuer ces manœuvres sans provoquer de surtensions excessives sur le réseau. En particulier, un disjoncteur de ligne doit posséder un pouvoir de coupure et de fermeture de lignes à vide. Ces disjoncteurs doivent aussi être capables d'interrompre les défauts qui se produisent sur une ligne, ou directement à ses bornes, et qui donnent lieu à de forts courants de court-circuit [4].

b. Disjoncteurs de générateurs

Ces disjoncteurs sont connectés entre un générateur et le transformateur élévateur de tension. Ils sont généralement utilisés à la sortie des générateurs de forte puissance (100 à 1 800 MVA), pour les protéger de manière sûre, rapide et économique. Des particularités importantes caractérisent ces disjoncteurs et font qu'ils sont notablement différents des disjoncteurs de ligne [4].

c. Disjoncteurs de réactances

Ces disjoncteurs manœuvrent quotidiennement des réactances qui sont utilisées pour le réglage de la charge réactive dans une ligne. Ils doivent être capables d'effectuer ces manœuvres sans provoquer de surtensions sur le réseau. Dans les réseaux à très haute tension où le niveau de surtension

admissible est relativement faible (1,6 pu. en 800 kV), une solution éprouvée consiste à munir le disjoncteur de parafoudres à oxyde de zinc [4].

I.5.5 Selon le milieu de coupure :

a. Disjoncteur à air comprimé

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

Inconvénients : un défaut des disjoncteurs à air comprimé est leur bruit très important à l'ouverture. De plus, ils nécessitent un entretien périodique, en particulier de leurs compresseurs, ceci explique qu'ils ont été progressivement supplantés par une autre génération de disjoncteurs, celle des disjoncteurs à SF6 (ou hexafluorure de soufre).

b. Disjoncteurs avec ampoules à vide

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

Inconvénients : actuellement des disjoncteurs intégrant des ampoules à vide sont en service jusqu'à 84 kV, au Japon, le pouvoir de coupure d'un disjoncteur à vide peut atteindre 63 kA.

c. Disjoncteur à gaz SF6 (Hexafluorure de soufre)

L'utilisation du SF6 pour l'isolation a été brevetée aux États-Unis par Franklin Cooper de General Electric en 1938, et son utilisation pour l'interruption d'un courant a été revendiquée aussi en 1938 dans un brevet allemand par Vitaly Grosse de AEG (Allgemeine Elektrizitäts- Gesellschaft).

La première application industrielle du SF6 pour la coupure date de 1953, elle a été faite par Westinghouse pour des interrupteurs en charge à haute tension 15 kV à 161 kV avec un pouvoir de coupure de 600 A.

La première réalisation d'un disjoncteur SF6 haute tension a été faite en 1956 par Westinghouse mais le pouvoir de coupure était alors limité à 5 kA sous 115 kV (1000 MVA) et cet appareil devait avoir de nombreux éléments de coupure en série par pôle pour assurer les performances (six chambres de coupure en série).

d .Disjoncteur auto-pneumatique

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

e. Disjoncteur à huile

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

Les premiers disjoncteurs à huile avaient des contacts de coupure qui étaient plongés dans de l'huile contenue dans une cuve métallique au potentiel de la terre, d'où leur nom de Dead tank. Ils sont appelés « disjoncteurs à gros volume d'huile ». Par la suite, dans les années 1950, les « disjoncteurs à faible volume d'huile » ont été conçus pour réduire la quantité d'huile nécessaire et surtout limiter le risque d'incendie inhérent aux disjoncteurs à gros volume d'huile. L'arc se développe dans un cylindre isolant afin de limiter sa longueur et de contrôler autant que possible l'énergie contenue dans l'arc. Cette énergie est utilisée pour générer le soufflage par vaporisation de l'huile comme expliqué précédemment.

I.6 .Coupure dans l'huile :

La coupure dans l'huile a fait son apparition lorsque, les puissances croissant, il fut nécessaire d'élever la tension des réseaux .Les classiques interrupteurs à couteaux .montés sur sosies de marbre. Ne parvinrent plus à couper sous des tensions accrues et l'idée la plus simple qui vint naturellement à l'esprit consista à les plonger dans l'huile minérale que l'on utilisait déjà pour isoler les transformateurs [5].

I.6.1 Formation d'hydrogène par décomposition de l'huile :

Le disjoncteur à hydrogène qui venait de faire son apparition ; qu'il n'est ensuite jamais venu à l'idée de personnes de réaliser un disjoncteur alimenté par des bouteilles d'hydrogène, tant ce gaz présente des dangers d'explosion dès qu'il se mélange avec l'air. On donc toujours continué à le fabriquer par décomposition de l'huile .juste au moment où l'on en besoin .ce qui permet en outre de l'obtenir automatiquement sous pression. La décomposition d'une faible quantité d'huile libéré un volume considérablement supérieur de gaz qui forme subitement une bulle au sein du liquide .par inertie de la masse d'huile qu'il faudrait déplacer pour que la bulle se détende librement, celle –ci se trouve sou mise durant la coupure à une pression dynamique qui peut atteindre dans les appareils modernes, des valeur de 100 à150 bar.

I.6.2 Théorie de la bulle gazeuse :

Dans les anciens appareils à bain d'huile, on devait prendre soin que les bulles ne puissent se rejoindre ou atteindre la cuve, afin d'éviter des amorçages indésirables, et la théorie dite de la bulle gazeuse permettait de dimensionner les appareils en conséquence figure. (I.3) avec l'accroissement des valeurs des tension et des contacts à 'interrompre, ces appareils deviennent monstrueux, exigeant à 20000 L d'huile par phase en 200 kV.

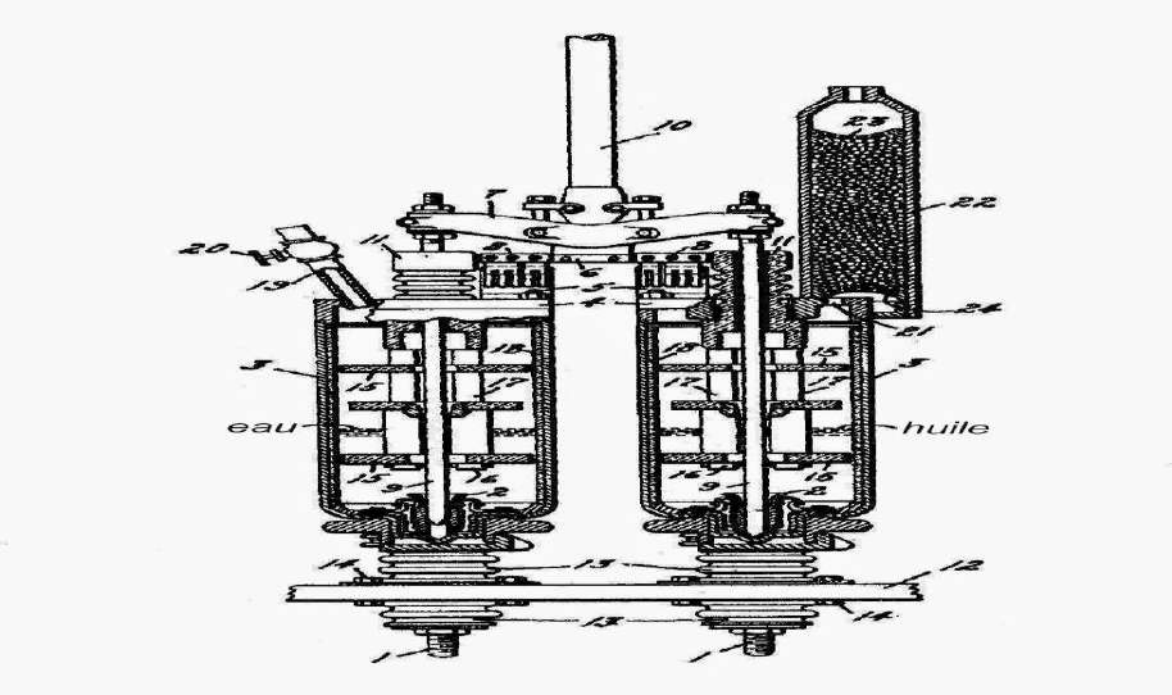


Figure. I.3 **:** Disjoncteur à bain d'huile : coupe schématique.

I.6.3 La chambre de coupure:

Le rôle de la chambre de coupure est d'attirer et d'éteindre l'arc lors d'un court-circuit qui se développe entre les contacts pendant la coupure.

La chambre de coupure est située à l'intérieur de chaque colonne polaire des trois phases, elle a le rôle d'interrompre le passage du courant électrique ou de le rétablir (ouverture ou fermeture du circuit électrique) [5].

a. la Chambre de coupure constitution du:

- joues latérales (1)

- tôle d'arc (2)

- tôles de d'ionisation (3)

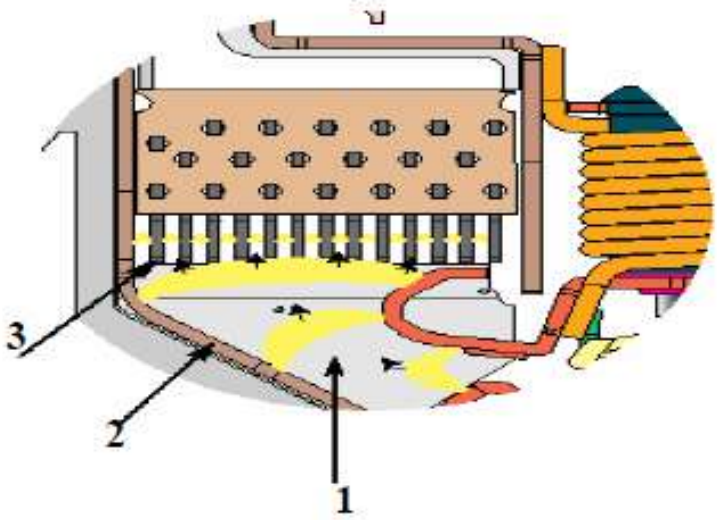


Figure. I.4 **:** Constitution du Chambre de coupure. [5]

b. Fonctionnement de la Chambre de coupure :

Dès la séparation des contacts, l'arc est déplacé vers la chambre de coupure sous l'effet de la force dite de Laplace, induite par la géométrie des contacts fixe et mobile. Au cours du trajet entre les contacts et la chambre, l'arc est canalisé entre deux joues qui permettent :

- D'augmenter sa vitesse de déplacement,

- De guider sa trajectoire,

- De l'allonger.

De par leur constitution et du fait de l'augmentation de température, les joues latérales libèrent un gaz qui contribue à la d'ionisation de l'air. Puis, pénétrant dans les déions (languettes d'acier cuivré), l'arc est divisé en plusieurs arcs élémentaires. La d'ionisation de l'air à l'intérieur de la chambre est également obtenue par refroidissement et évacuation de l'air ionisé hors du produit.

Pour cela, on utilise la masse des déions et l'échappement vers l'extérieur, sur le haut du produit. L'arc peut être assimilé à une impédance qui s'ajoute à celle du disjoncteur et qui a pour effet:

- D'une part de limiter la valeur du courant de court-circuit,

- D'autre part de générer une différence de potentiel appelée "tension d'arc" (Uarc) entre ses bornes.

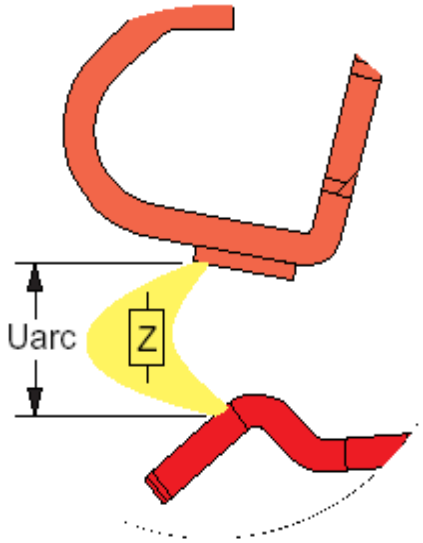


Figure.I.5 : Effet de l'arc dans la chambre de coupure.

I.7 Le pouvoir de coupure :

Le courant de court-circuit est la somme de deux composantes; périodique et apériodique présentées sur la (Figure. I.5), il faut le couper avant de perturber le réseau.

Le pouvoir de coupure assigné est la valeur la plus élevée du courant de court-circuit (le cas court-circuit triphasé car il est le plus sévère) que le disjoncteur doit être capable d'interrompre dans les conditions d'emploi et de fonctionnement fixées par la norme CEI60056.[5]

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

- la valeur efficace de sa composante périodique.
- le pourcentage de la composante apériodique par rapport à la composante périodique.
- la durée entre la détection du défaut et l'instant de séparation des contacts du disjoncteur [2].

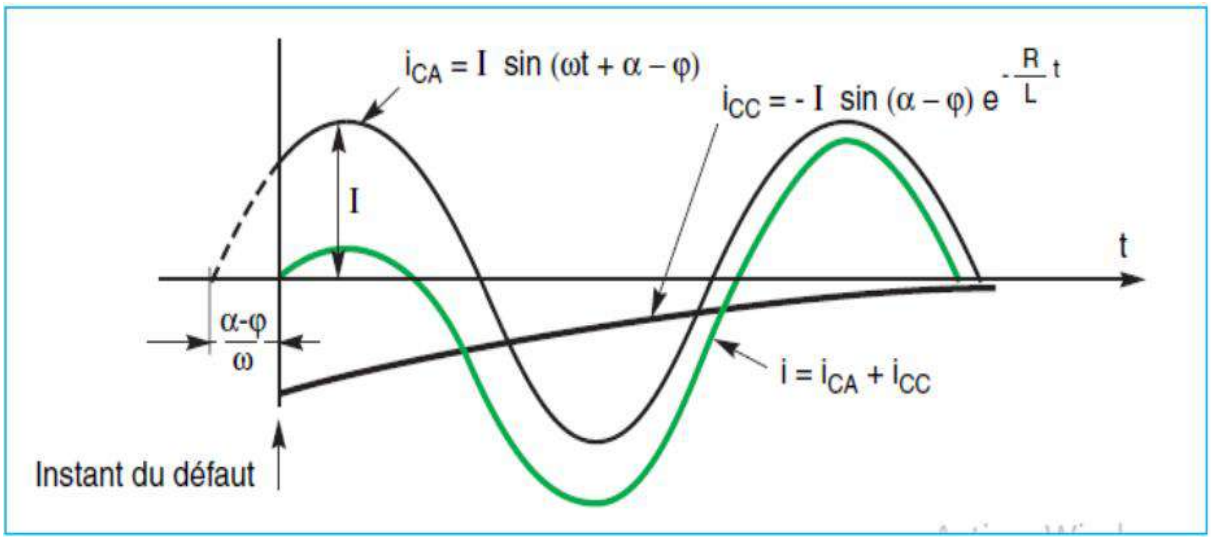


Figure. I.6 : La forme du courant prise en considération pour le pouvoir de coupure.[5]

I.7.1 Le pouvoir de fermeture assigné :

Pendant une manœuvre d'établissement sous tension, l'arc s'amorce entre contacts avant même que ces contacts se touchent .L'arc s'interrompe au moment de l'entrée en contact. L'intervalle de temps pendant lequel un arc de pré-amorçage subsiste s'appelle la durée de pré-arc.

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

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

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

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

2,5 : pour une fréquence assignée de 50 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.

2,6 : pour une fréquence assignée de 60 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.

2,7 : pour toutes les valeurs de la constante de temps des applications particulières.

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

établir un courant totalement asymétrique, c'est-à-dire lorsque l'instant d'établissement du courant s'effectue à un zéro de tension ;

établir un courant symétrique avec une durée de pré-amorçage maximale ; dans ce cas, l'établissement du courant doit se faire au voisinage d'une valeur crête de tension.

La vérification de l'établissement du courant totalement asymétrique peut se faire sous une tension réduite, soit en triphasé, soit en monophasé, en disposant un pôle en série avec les deux autres en parallèle. [2]

I.8 Isolants liquides :

I.8.1 Rôle des isolants liquides :

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage [3]. Les transformateurs remplis d'huile ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance contrairement aux transformateurs de distribution, qui eux peuvent être ''secs''. Aussi, différentes raisons expliquent cette préférence:

- Par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.

- Les solides permettent d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.

- Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.

- Les analyses d'huile (teneur en eau, analyse de gaz...) permettent de diagnostiquer l'état du transformateur à moindre coût.

- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions [4].

I.8.2 Autres fonctions :

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et dans certains cas pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [4].

I.8.3 Principaux types des isolants liquides :

De façon générale, il n'existe pas de liquides isolants pouvant remplir l'ensemble des propriétés requises pour une application donnée. Les caractéristiques électrique, chimique et physique d'un liquide diffèrent donc d'une application à une autre. Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types : les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse (TableauI.1). Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans

certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs.

	Catégorie	Type
(i)	Huiles végétales	Huile de ricin
(ii)	Huiles minérales	Naphténiques
		Paraffiniques
		A masse moléculaire élevée
(iii)	Hydrocarbures de synthèse linéaires insaturés	Polybutènes
	Hydrocarbures aromatiques de synthèse	Alkylbenzènes
		Alkylnaphtalènes
		Alkylbiphéniles
	Hydrocarbures linéaires chlorés	Perchloréthylène
	Hydrocarbures aromatiques chlorés	Trichlorobenzènes
		Polychlorobiphényles (PCB)
		Polychlorophénylalcanes
	Hydrocarbures linéaires chlorofluorés	Trichlorotrifluoroéthane
	Hydrocarbures aromatiques éthyléniques	Alkyldiaryléthylène
	Esters organiques	Néocaprate de benzyle
		Diotylphtalate
		Esters phosphates
		Esters du pentaérythrol
	Ether-oxydes	Diolyléther
	Silicones liquides	Polydiméthylsiloxanes (PDMS)
		Polyméthylphénylsiloxanes

Tableau I.1 : Différentes catégories d'isolants liquides [6].

I.8.3.1 Huiles minérales

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de bruts de pétrole ; elles sont les plus utilisées dans les matériels électriques. Elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de

chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolants cellulosiques. Malgré les tensions sur le marché international, les huiles minérales sont encore disponibles et à des prix assez bas. C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus communément utilisées dans les transformateurs de puissance. Aussi, avec le développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification …), les propriétés des huiles minérales n'ont cessé de s'améliorer depuis leur première utilisation au début du siècle dernier.

La composition chimique des huiles minérales est complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) et est généralement définie par la teneur en carbone paraffinique (Cp), en carbone naphténique (Cn) et en carbone aromatique (Ca) (Figure I.7).

- ✓ Structure paraffinique (Cp):les molécules de ce groupe sont aussi connues sous le nom d'hydrocarbures saturés en chaînes droites ou alcanes, qui peuvent être linéaires (n-alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes) et dont la formule générale est C_nH_{2n+2}.

Les molécules paraffiniques ont une stabilité thermique plus faible que les molécules naphténiques et aromatique.

- ✓ Structure aromatique (Ca): ces molécules sont des composés cycliques, aussi appelées hydrocarbures insaturés, de formule générale C_nH_n. Elles sont totalement différentes des molécules paraffiniques et naphténiques, mais jouent un rôle très important dans les propriétés d'une huile minérale. On les trouve sous deux formes : les mono aromatiques et les poly aromatiques dont certaines sont considérées comme cancérigènes. Ces composés aromatiques permettent à l'huile d'avoir une bonne résistance à l'oxydation (production de phénols qui détruisent les radicaux), de bonnes propriétés de gassing et une bonne rigidité en impulsion [7].

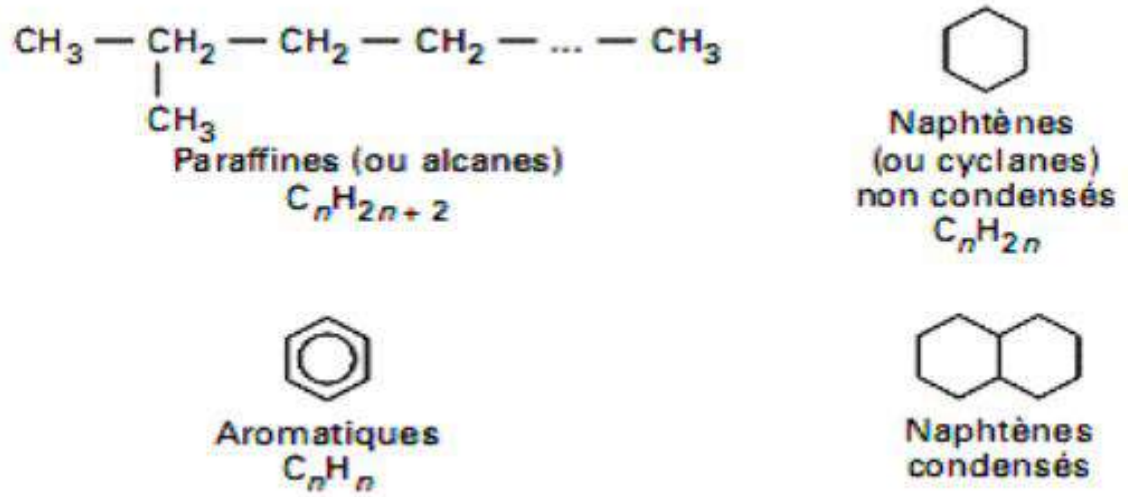


Figure I.7: Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale [8].

I.8.3.2 Huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique ; la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est R-COO-R'. Les huiles végétales portent aussi le nom d'esters naturels ou d'huiles végétales (par opposition aux esters synthétiques ou organiques) car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le tournesol, le colza, le soya….

Les huiles esters végétales sont obtenues par estérification d'un trialcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont mono carboxyliques (de formule R-COO-H), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone. Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines. La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante (Figure I.8).

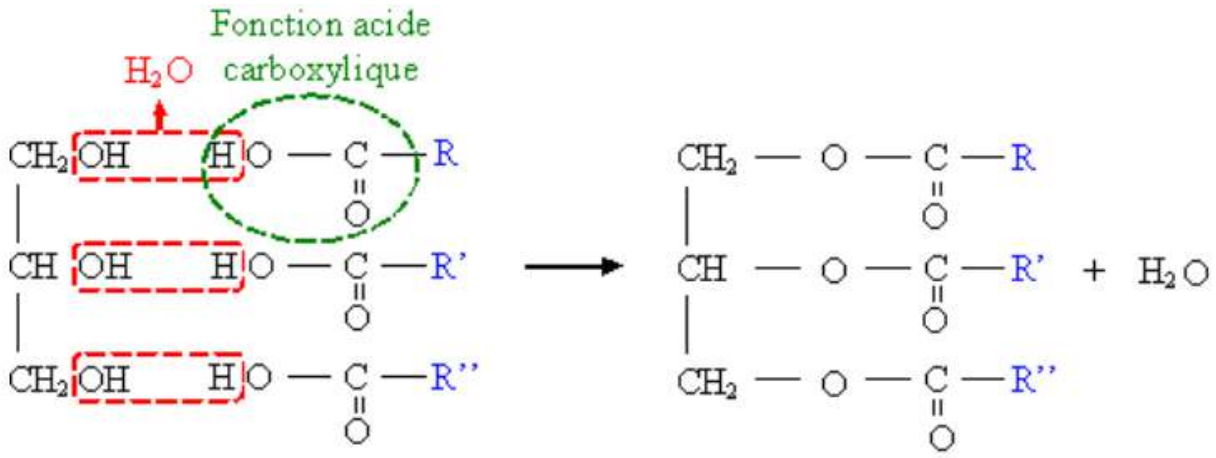


Figure I.8: Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.

I.9 Propriétés des huiles :

I.9.1 Propriétés électriques :

La permittivité (ξ), la résistivité (ρ), le facteur de perte (tgσ) et la rigidité diélectrique (Ec) sont les caractéristiques électriques principales. Outre la structure du liquide et le conditionnement, ces propriétés dépendent de la tension appliquée, de la fréquence et de la température. Dans l'industrie, ces mesures sont souvent rapportées à la température moyenne de fonctionnement d'un transformateur, soit 90°C [9].

Ces propriétés électriques dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire, ...etc.) et de leurs conditions d'utilisation. Il faut donc comprendre l'élimination de tout ce qui ne constitue pas le liquide lui-même comme: résidus de synthèse, particules, gaz ou molécules d'eau. Ces impuretés peuvent être plus ou moins éliminées par des opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et en température, ainsi que des opérations de filtration de l'ordre du µm .

I.9.2 Propriétés chimiques :

Les propriétés chimiques d'huile qui peuvent intéresser l'ingénieur en charge de l'exploitation d'un transformateur sont [10]:

- sa stabilité vis-à-vis de l'oxydation.
- Sa teneur en inhibiteur d'oxydation.
- Sa teneur en soufre corrosif.
- Sa teneur en eau.

I.9.3 Propriétés physiques :

Concernant les propriétés physiques de l'huile, sont données ci-après. [11]:

- la viscosité.
- L'aspect.
- La densité.
- Le point d'écoulement.
- La tension inter faciale.
- le point d'éclair

I.10 L'arc électrique dans le disjoncteur :

Lorsque les contacts du disjoncteur se séparent, le processus d'interruption est lancé, un arc électrique de très haute température est toujours produit et le milieu devient conducteur dans lequel l'interruption du courant va se produire. L'arc électrique est un canal de plasma entre les contacts du disjoncteur formés après une décharge gazeuse dans le milieu d'extinction [12]. Lors de la coupure, l'appareil doit absorber toute l'énergie électromagnétique stockée dans le réseau et supporter une importante surtension. Cette puissance, et la surtension qui l'accompagne, sont à l'origine de la naissance d'un arc électrique à l'endroit de la coupure [13].

L'arc électrique est un milieu dans lequel le passage des électrons est accéléré par les tensions élevées aux bornes des électrodes. La génération et dissipation de l'énergie par effet Joule provoque une augmentation très rapide de la température. La formation du plasma conduit à la libération des électrons dans le fluide, ce qui lui confère d'excellentes propriétés de conduction électrique.

L'annulation du champ électrique entre les électrodes amène à l'annulation du courant, mais pas à la disparition du plasma. La vitesse de récupération de la rigidité diélectrique dans l'espace inter électrode dépend de la vitesse de refroidissement du gaz. Le paramètre qui décrit mieux l'extinction de l'arc électrique dans un disjoncteur est donc sa température [14].

L'arc électrique est considéré comme un plasma thermique qui caractérisé par :

- Une température élevée
- La création d'une différence de pression dans le milieu
- L'ionisation du milieu
- La provocation des réactions (chimique et thermique) dans le milieu
- Un rayonnement important [15].

Le plasma

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

Depuis 1928, le plasma a été défini comme le quatrième état de la matière, où le milieu est partiellement ou totalement ionise et généralement globalement neutre. Il est constitué d'un mélange d'ions, d'électrons et d'espèces neutres, excitées ou non, où les températures sont supérieures à 300°C à la pression atmosphérique, pour ça on peut considérer le plasma conducteur d'électricité. Le plasma possède une grande viscosité et un coefficient d'échanges thermiques élevé d'électrons et qui est globalement neutre [16].

Cette dernière propriété (neutralité du milieu) est une condition nécessaire que doit avoir un état pour pouvoir être qualifié de plasma.

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

L'arc qui se crée dans le boîtier d'un disjoncteur est dans sa globalité un plasma thermique. Il est formé de particules provenant du gaz, de vapeurs métalliques venant des électrodes et de plastiques venant des parois latérales du disjoncteur. Sa température est estimée expérimentalement à 15000 K [13].

La décharge électrique

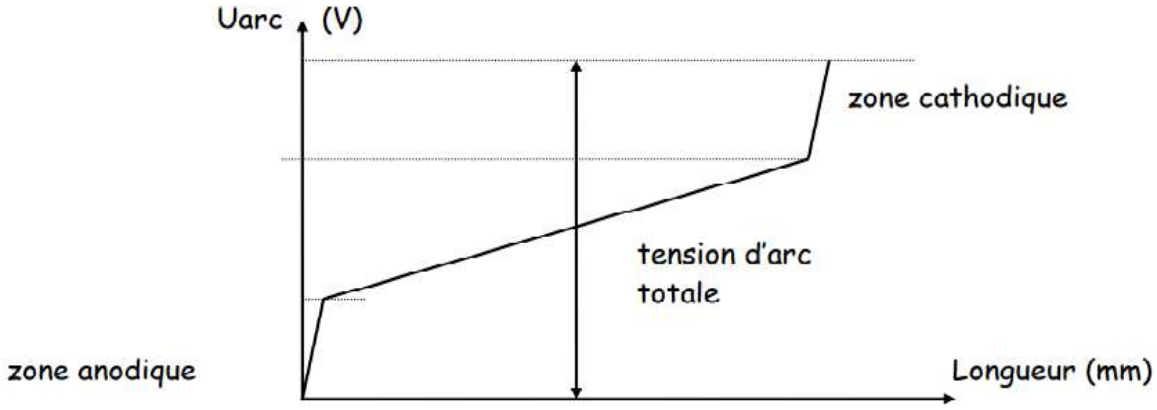
D'habitude une décharge électrique se crée essentiellement par les collisions des électrons avec les molécules du gaz. Il s'en suit la génération de nouveaux électrons et ions dans les avalanches de Townsend qui se développe jusqu'à l'établissement d'un état de maintenance. La décharge alors devient indépendante des sources extérieures qui produisent les charges électriques libres dans le gaz. L'efficacité des électrons comme producteurs de nouveaux ions, dépend de leur énergie et donc de leur libre parcours dans le champ électrique. Et comme les électrons dans une décharge ne sont pas mono-énergétiques on doit déduire leur fonction de distribution des énergies pour une étude quantitative [17].

I.11 Caractéristiques de l'arc électrique :

I.11.1 Tension d'arc :

Quel que soit la nature du courant (alternatif ou continu), à tout instant, la différence de potentiel entre les deux contacts en mouvement.

Arc se divise en 3 parties comme sur le diagramme suivant :



On distingue les chutes de tension aux bornes (anode et cathode) qui dépendent essentiellement des

Matériaux les composant et qui valent environ 15 volts.

La partie médiane dépend elle de la longueur de l'arc.

I.11.2 Température :

La température de l'arc est très élevée (entre 25000 et 50000 °C), c'est la raison pour laquelle il y a volatilisation du métal qui compose les contacts électriques. Cette élévation de température est telle qu'elle entraîne une élévation de la pression si l'arc a lieu dans une enceinte fermée (volume constant) ce qui est le cas d'une armoire par exemple.

I.11.3 Les avantage de l'arc électrique :

L'un des avantages major de l'arc électrique est de dissiper l'énergie le courant sous forme d'une énergie par effet joule lors de son interruption [15].

I.11.4 Les inconvénients de l'arc électrique :

- Emission des rayons dangereux
- Dégradation rapide des appareils électriques
- L'explosion
- La complication de l'interruption d'un courant
- Pas de rupture instantanée du circuit [15].

I.12 Conclusion :

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

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

L'arc électrique de coupure est le phénomène Particulièrement délicat à maîtriser, au point qu'aucune technique d'interruption n'est parvenue jusqu'alors à dominer toute les autres dans tous les domaines d'emploi.

CHAPTER II

Modélisation d’un arc électrique dans une huile isolante

II.1 Introduction

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

Les modèles d'arcs électriques sont souvent applicables à des cas particuliers d'expérimentations. Ainsi, les modèles de type Mayr-Cassie [31] [32] sont la plupart du temps utilises pour modéliser les courants d'arcs dans les disjoncteurs.

II.2 Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique

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

- **Les modèles diélectriques et thermiques** : ces modèles sont basés sur la

Description de l'évolution de l'arc par rapport à la variation en fonction du temps de :

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

- **Les modèles empiriques** : sont des équations mathématiques qui décrivent l'évolution dynamique de l'arc sans un sens physique, ils sont basés sur une très longue expérience dans le domaine et la réalisation d'un grand nombre des essais expérimentaux.
- **Les modèles à boite noire** : ce sont des modèles qui décrivent l'arc comme une composante électrique non linéaire variable en fonction de temps et en fonction de plusieurs paramètres tels que:

- le courant de l'arc.
- la tension de l'arc.
- la puissance électrique.
- la conductance et la résistance du milieu environ.

II.3 Représentation des modèles d'arc à boite noire

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

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

$$\frac{1}{g}\cdot\frac{\mathrm{dg}}{dt}=\frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{p}-1\right) \qquad \text{(II -1)}$$

g : la conductance de l'arc.

u : la tension de l'arc.

i : le courant de l'arc.

Tau : la constante de temps de désionisation.

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

Pour ces modèles (Tau et P) sont décrit comme des paramètres indépendants du modèle d'arc à boite noire. La constante de temps de dés ionisation Tau, permet de faire la distinction entre les milieux de coupures (huile, SF6, air,…).

II.4 Les modèles de base

Historiquement les modèles d'arc à boite noire avaient une base physique, les premières descriptions du comportement de l'arc ont été données par le modèle Cassie (1939) et par le modèle de Mayr (1943). [31,32]

II.4.1 Le modèle de Mayr

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

Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses.

- **Première hypothèse**

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

$$g=F(w) \qquad \text{(II -2)}$$

Cela signifie qu'à une valeur w de l'énergie, il ne correspond qu'une seule valeur

de la conductance g. Ce n'est pas tout à fait exact mais il n'y a pas une différence

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

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

$$\frac{dg}{dt} = F'(W).\frac{dw}{dt} \qquad \text{(II -3)}$$

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

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

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

$$\frac{dw}{dt} = ri^2 - P \qquad \text{(II -4)}$$

L'équation (2-3) devient:

$$\frac{1}{dg}.\frac{dg}{dt} = \frac{F\prime(W)}{F(W)}(ri^2 - P) \qquad \text{(II -5)}$$

- **Deuxième hypothèse**

F(w) est supposée une fonction exponentielle:

$$F(W) = g = Ke^{\frac{W}{W_0}} \qquad \text{(II -6)}$$

W0 : Coefficient constant qui représente la quantité d'énergie qu'il faut apporter à l'arc pour que sa conductance soit multipliée par e (e=2,71828).

A l'inverse si on retire une énergie (w_0) à l'arc, sa conductance sera divisée par e.

K:exprime la valeur absolue de la conductance.

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

$$F(W)' = \frac{1}{W_0} \mathrm{K.\, e}^{\frac{W}{W_0}} \qquad \text{(II -7)}$$

D'où

$$\frac{F'(W)}{F(W)} = \frac{1}{W_0} \qquad \text{(II -8)}$$

- **Troisième hypothèse**

La puissance de refroidissement est supposée constante et égale à P0 et compte tenu de la relation (2-8), la relation (2-5) devient:

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{W_0}(ri^2 - P_0) = \frac{P_0}{W_0}\left(\frac{ri^2}{P_0} - 1\right) \qquad \text{(II -9)}$$

Soit$\tau = \frac{W_0}{P_0}$, la constante de temps de dés ionisation, l'équation (2-9) sera:

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ri^2}{P_0} - 1\right) = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P_0} - 1\right) \qquad \text{(II -10)}$$

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

D'après la relation (2-9), il devait exister une variation linéaire de $(\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt})$ en fonction de la puissance fournit à l'arc (ui) par effet de Joule puisque (Tau et P0) sont considérés comme des

constantes, mais la réalité expérimentale est différente, car (Tau et P0) ne restent pas constantes durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc [18].

II.4.2 Le modèle de Cassie

Ce modèle fut apparu en 1939, Cassie supposa que le plasma de l'arc est un cylindre de rayon variable et de température constante et que les pertes d'énergie ne sont dues qu'à la convection et sont proportionnelles à la section de l'arc. Cassie a déduit l'équation suivante:[32]

$$\frac{1}{g}.\frac{\mathrm{dg}}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{u^2}{{U_0}^2} - 1\right) \qquad \text{(II -11)}$$

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

La courbe $(\frac{1}{g}.\frac{\mathrm{dg}}{\mathrm{dt}})$ en fonction de (U^2) devrait être une droite (Tau, U0) constantes dont l'intersection avec les axes permettrait de déterminer (Tau et U0).

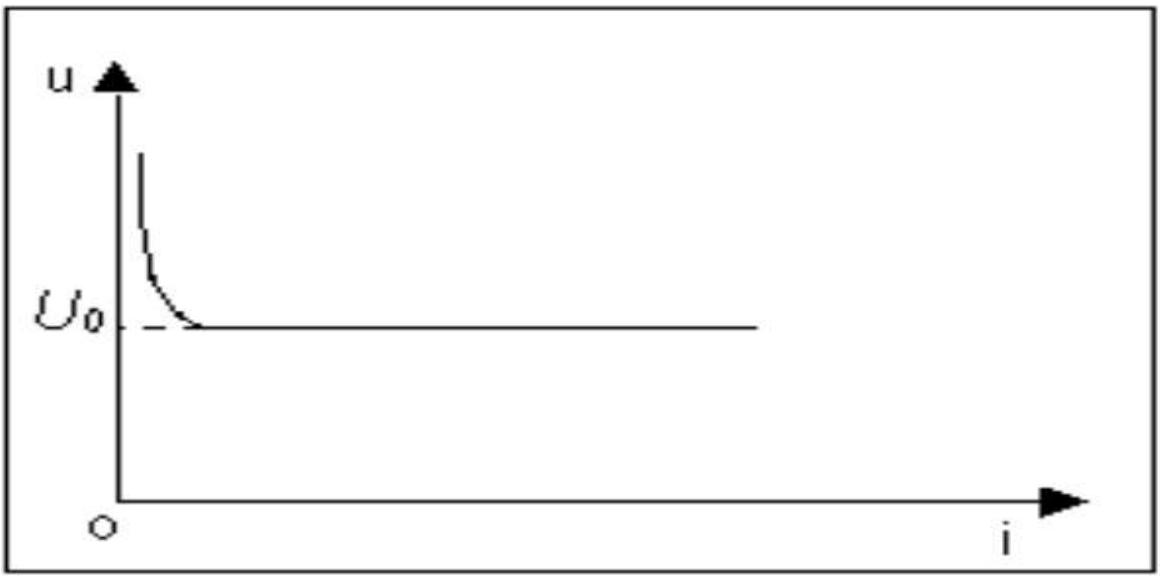


Figure.II.1 : Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.

Ce modèle présente des écarts assez importants avec les résultats expérimentaux, car les pertes ne sont pas uniquement dues à la convection et que l'hypothèse d'une température constante est loin d'être vérifiée [18].

Pour des valeurs élevées du courant, la tension de l'arc reste sensiblement constante et égale à (U0), elle prend une forme hyperbolique aux faibles courants, pour cette raison on dit que ce modèle s'applique aux régions de l'arc à fortes intensités.

II.4.3 Comparaison des deux modèles

Les critères	**Modèle de Mayr**	**Modèle de Cassie**
Conductance de l'arc	Par variation du degré d'ionisation	Par variation du diamètre de l'arc
Pertes de chaleur	Par conduction thermique	Par convection thermique
Expression dynamique	$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P_0}\right)$	$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{u^2}{U_o{}^2} - 1\right)$
Adaptation	Régions des courants faibles	Régions des courants forts

Tableau II.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie.

On peut observer que:

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

Par conséquent un grand nombre de modifications de ces équations a été formulé, plus de paramètres ont été introduits dans les équations de ces modèles, leur donnant ainsi une forme plus générale et rendant les paramètres plus adaptatifs [19].

II.5 Les modèles d'arc améliorés

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

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

Tous ces modèles gardent l'idée de base de la description du comportement de l'arc en utilisant les paramètres Tau et P avec différentes interprétations physiques [19].

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

II.5.1 Le modèle de Mayr modifié

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

$$\frac{1}{g}.\frac{\mathrm{dg}}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P_0+U_0\ |i\ |} - 1\right) \qquad \text{(II -12)}$$

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

$$\frac{1}{g}.\frac{\mathrm{dg}}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P(P_0+U_0\ |i\ |)} - 1\right) \qquad \text{(II -13)}$$

g : La conductance de l'arc.

u : La tension de l'arc.

i : Le courant de l'arc.

Tau : La constante de temps de l'arc.

P : La pression de remplissage du disjoncteur.

P0: La puissance de refroidissement.

U_O: Le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique (Figure II.1).

Les paramètres indépendants de ce modèle sont : (Tau, *P*0 etU0).

II.5.2 Le modèle de Habedank

L'arc est considéré comme une entité physique formée par deux composants en série, l'un est décrit par l'équation de Mayr et l'autre par l'équation de Cassie (Figure. II.2) [21,22].

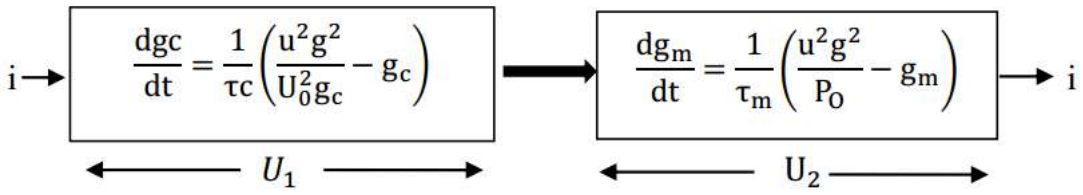


Figure II.2 : Le modèle de Habedank

Les équations du modèle sont :

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{Tau_c}\left(\frac{u^2 g^2}{U0^2 g_c} - g_c\right) \qquad \text{(II .14)}$$

et

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{Tau_m}\left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_m\right) \qquad \text{(II.15)}$$

Avec

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

G : la conductance totale de l'arc

u : La tension totale de l'arc.

i : Le courant de l'arc.

U0: Le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique (Figure. 2.1).

g0: La conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie.

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

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

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

Taum: La constante de temps de Mayr.

Chaque équation contient deux paramètres, donc ce modèle à quatre paramètres indépendants à déterminer (Tauc, U0, Taum et P0).

II.5.3 Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique

[23, 24, 25,26].

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

$$\mathrm{Tau} = \mathrm{Tau}_0 . \mathrm{g}^{\alpha}$$

$$P = P_0 . \mathrm{g}^{\beta}$$

L'équation de ce modèle est :

$$\frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} \frac{\ln g}{dt} = \frac{1}{Tau_0 g^{\alpha}} \left(\frac{ui}{P_0 g^{\beta}} - 1 \right) \qquad \text{(II.16)}$$

g : La conductance de l'arc

u : La tension de l'arc

i : Le courant de l'arc.

Tau_0: La constante de temps de l'arc

P : La puissance de refroidissement

$\propto$: Le paramètre qui influe sur Tau en fonction de g

β : le paramètre qui influe sur P en fonction de g.

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

Pour $\boldsymbol{\alpha}$=0 et **β**=1 on aura le modèle de Cassie :

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P} - 1\right) = \frac{1}{Tau_0}\left(\frac{ui}{P_0.g} - 1\right) = \frac{1}{Tau_0}\left(\frac{u}{P_0} - 1\right) \text{ (II.17)}$$

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

Pour $\boldsymbol{\alpha}$=β=0 on aura le modèle de Mayr :

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{Tau_0}\left(\frac{ui}{P_0} - 1\right) \quad \text{(II.18)}$$

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

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

II.5.4 Le modèle de KEMA

C'est un modèle très récent constitué de trois sous-modèles en série. Les processus lents de l'arc sont représentés par un modèle hybride de Cassie-Mayr, les processus rapides sont décrits par un modèle de Mayr pur, tandis que les processus intermédiaires suivent un modèle presque Mayr. (FigureII.3) [27,28].

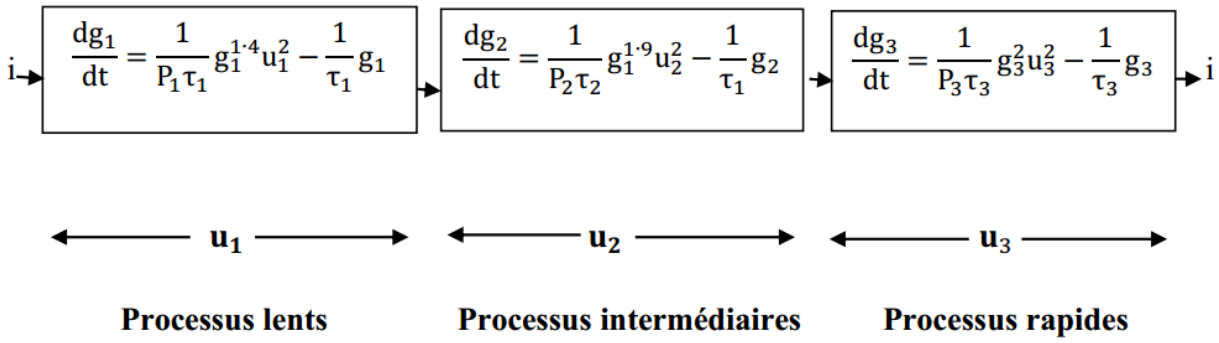


Figure.II.3 : Le modèle de KEMA

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

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{P_j\, Tau_j} . g^{\gamma j}{}_j U^2{}_j - \frac{1}{Tau_j} . g_j \qquad (2.19)$$

Pour j=1, 3

g_j : La conductance partielle de la j^{ème} portion de l'arc.

P: La puissance de refroidissement de la j^{ème} portion de l'arc.

Tau_j: Laconstante de temps de la j^{ème} portion de l'arc.

u_j: La tension partielle de la j^{ème} portion de l'arc.

i : Le courant de l'arc.

λ_j: La commande Cassie-Mayr, de la j^{ème} portion de l'arc.

Choix des sous-modèles

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

- Le premier sous-modèle a été choisi de type Cassie-Mayr (λ_1= 1.4).
- Le deuxième sous-modèle a été choisi presque du type Myr (λ_2= 1.9).
- Le troisième sous-modèle a été choisi du type Mayr pur (λ_3= 2).

La conductance totale g de l'arc est :

$$f(x) = a_0 + \frac{1}{g}\sum_j^3 \frac{1}{g_1} = \frac{1}{\mathrm{g_1}} + \frac{1}{\mathrm{g_2}} + \frac{1}{\mathrm{g_3}} \qquad \text{(II.20)}$$

La tension de l'arc est :

$$\mathrm{u} = \sum_{j=1}^3 u_j = U_1 + U_2 + U_3 \qquad \text{(II.21)}$$

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

$$\mathrm{i} = g_u = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3} . u \qquad \text{(II.22)}$$

Les paramètres du modèle

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

$$Tau_2 = \frac{\mathrm{Tau_1}}{\mathrm{K_1}}, Tau_3 = \frac{\mathrm{Tau_2}}{\mathrm{K_2}}, P_3 = \frac{\mathrm{P_2}}{\mathrm{K_3}}$$

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

Les paramètres (λ_1, λ_2, λ_3) sont constants dans tous les tests.

D'où les paramètres indépendants du modèle sont (Tau_1, P_1etP_2).

II.5.5 Le modèle schavemaker

C'est le modèle le plus récent, avec le paramètre τ constant et la puissance de refroidissement en fonction de la puissance électrique d'entrée [25, 29,30].

$$P = \mathrm{P_0} + \mathrm{P_1 ui}$$

P_0 : La constante de la puissance de refroidissement liée à la conception du disjoncteur

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

L'équation du modèle est alors:

$$\frac{1}{\mathrm{g}}\frac{dg}{dt} = \frac{d\ln(g)}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P_0 + P_1 ui} - 1\right) \qquad \text{(II.23)}$$

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

II.6 :Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts.

Après avoir déterminé les paramètres du modèle décrit par l'équation (II.23), les courants et les tensions sont calculés en utilisant l'équation (II.23), puis ils sont comparés avec les tensions et les courants mesurés (Figure.II.4).

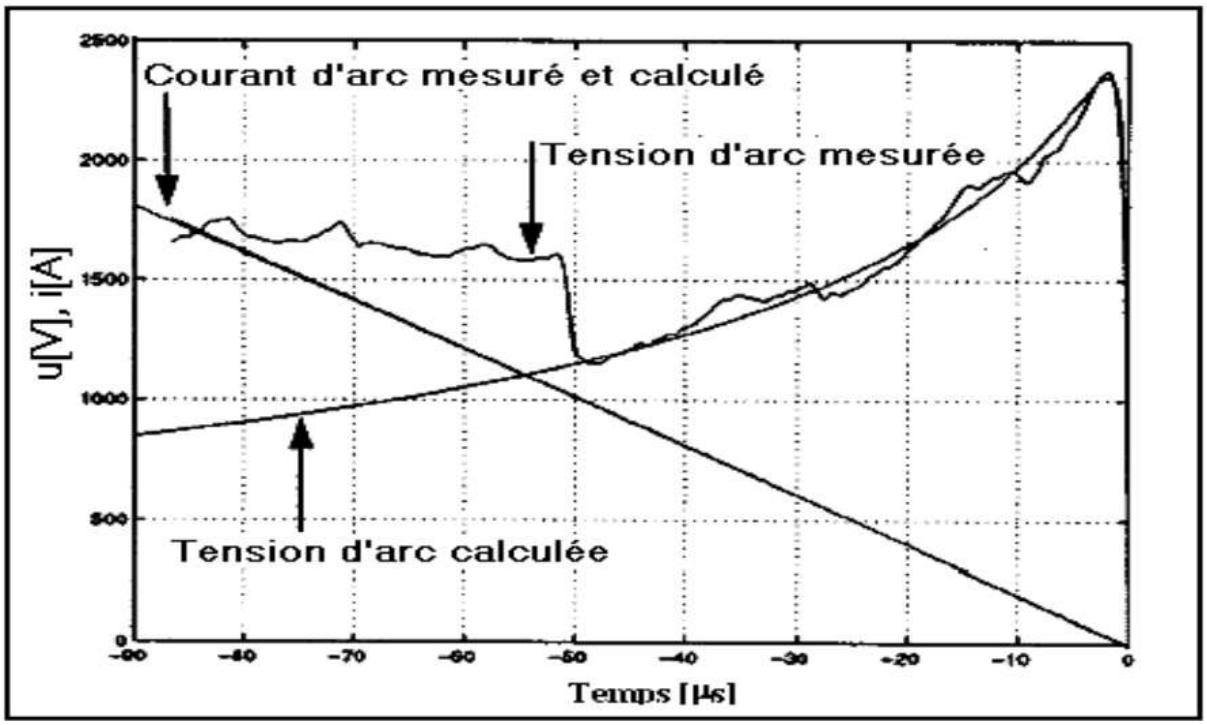


Figure II.4: Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés [29].

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

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{d\ln g}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{max(U_0|i|,P_0+P_1ui)} - 1\right) \qquad \text{(II.24)}$$

U_0 : la tension constante de l'arc dans le domaine des courants forts (Figure. 2-1).

- **Domaine des courants forts**

L'équation (2-21) sera réduite à:

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{d\ln g}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{u}{U_0} - 1\right) \qquad \text{(II.25)}$$

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

g : la conductance de l'arc.

u : la tension de l'arc.

i : le courant de l'arc.

Tau : la constante de temps de désionisation.

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

- **Domaine des courants faibles**

- **Avant le zéro du courant**

Les équations (2-22) et (2-23) seront réduites à:

$$\frac{1}{g}.\frac{d\ln g}{dt} = \frac{1}{Tau}\left(\frac{ui}{P_0} - 1\right) \qquad \text{(II.26)}$$

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

du courant.

- **Après le zéro du courant**

Le modèle de Mayr est retrouvé car on considère après l'extinction de l'arc que

la constante P_1 est nulle.

Conclusion

Le paramètre qui permet le mieux de préjuger la capacité d'un fluide à retrouver sa rigidité diélectrique dans un laps de temps donné est sa conductance. Tous les modèles d'arc à boite noire décrivent l'évolution de la conductance de l'arc au cours de son extinction.

Les modèles d'arc à boite noire améliorés cités dans ce chapitre ont prouvé relativement leur efficacité dans les domaines des courants faibles et dans les domaines des courants forts, cependant nous avons adopté le modèle de Mayr car il a montré son efficacité dans le domaine de la modélisation d'un arc électrique dans une huile isolante , et permet l'introduction des paramètres physiques d'une manière simple.

CHPATER III

Calcul Numérique et Modélisation Analytique de l'Arc Electrique

III.1 Introduction :

Dans le présent chapitre on a choisi le modèle de Mayr, pour modéliser l'évolution de la conductance de l'arc électrique dans le disjoncteur de haute tension,L'huile est considérée comme milieu plasmagène, car dissociée dans l'arc, elle donne un plasma riche en hydrogène, donnant ainsi des températures très supérieures aux plasmas de gaz et SF6. Ceci nous conduit à prendre des constantes de dés ionisation autour du millième de seconde.

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

Ce travail est constitué de deux étapes :

La première étape est la simulation du comportement dynamique de l'arc en utilisant la conductance et en faisant varier plusieurs paramètres.

La deuxième étape est une interprétation des résultats obtenue.

III.2Représentation de l'évolution de la conductance de l'arc :

III.2.1 Calcul numérique « sous environnement Matlab » de la conductance en fonction de temps:

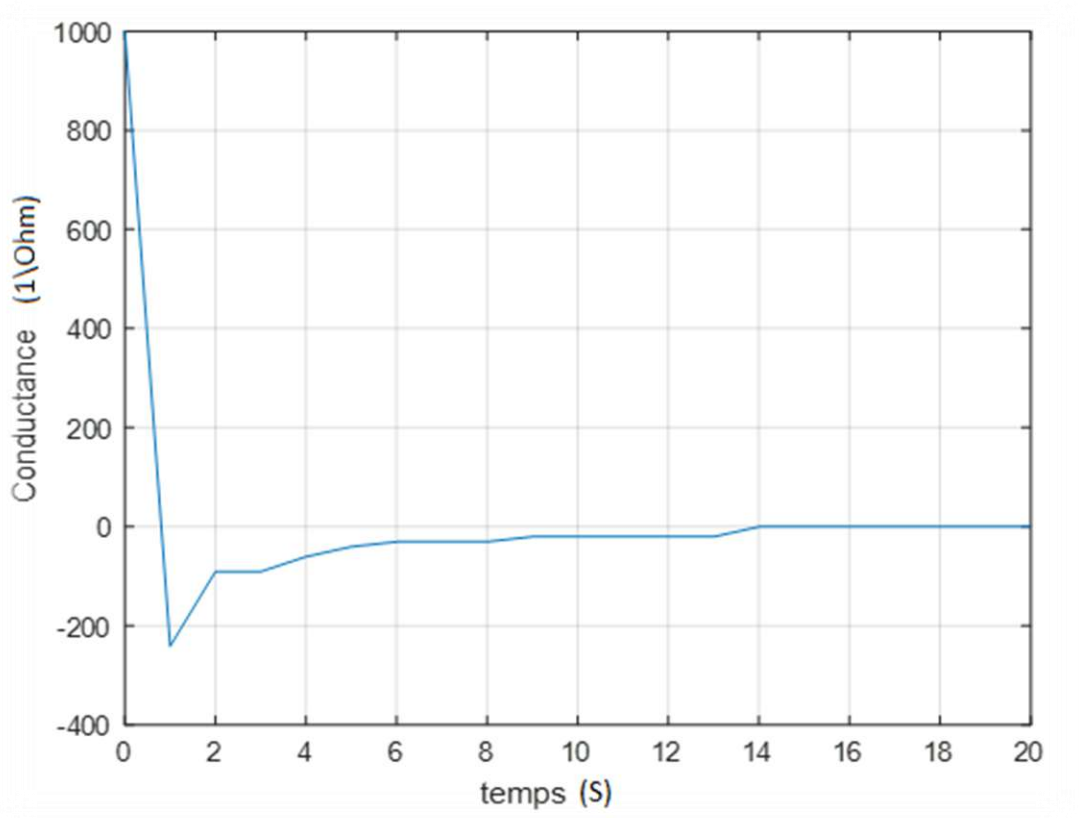
La mise en équation du modèle de Mayr dans le script de Matlab est comme suit:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{dy}{dt} = \frac{y}{tau1} \times \left(\frac{(y.1000^2 \times \sin(100 \times pi \times t \times 0.001)^2)}{P} - 1\right)$$

Nous avons imposé une tension d'arc de la forme $u(t) = 1000\sin(2\pi ft)\, en\, V$, la fréquence a été fixée à 50Hz. Par conséquent, le modèle d'arc se comporte comme une conductance y qui est fonction de tau (temps de dés ionisation), P (puissance de refroidissement) et U (tension d'arc).

Nous allons étudier l'influence de la constante de dés ionisation, la puissance de refroidissement ainsi que la tension d'arc sur la réussite ou l'échec de la coupure. Nous allons introduire les paramètres du modèle de Mayr cas par cas :

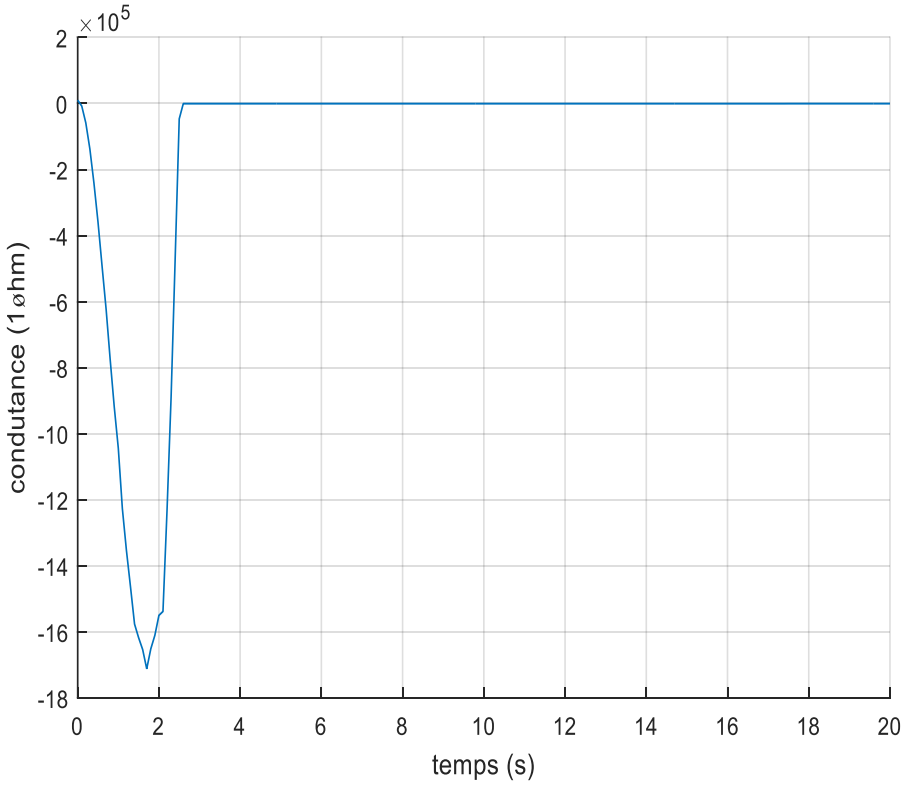
a) **TAU = 0.57 µs, P_0 = 24 281 W, U = 380 volt**



Figure(III.1) : Le comportement de la conductance avec tau=0.57µs

D'après, nous remarquons que pour une constante de temps de désionisation TAU = 0.57 µs et une puissance de refroidissement P_0 =24281 W la conductance de l'arc a diminuée vers à la valeur nulle. Ceci montre bien que pour ces paramètres nous avons une coupure de l'arc, et que l'extinction de l'arc électrique se fait peu de temps après sa création.

b) **TAU =0.27 µs, P_0 = 809991W, U = 1000V**



Figure(III.2) : Le comportement de la conductance avec tau=0.27µs

Que la courbe de la conductance de l'arc 'g' est nulle juste après la simulation.

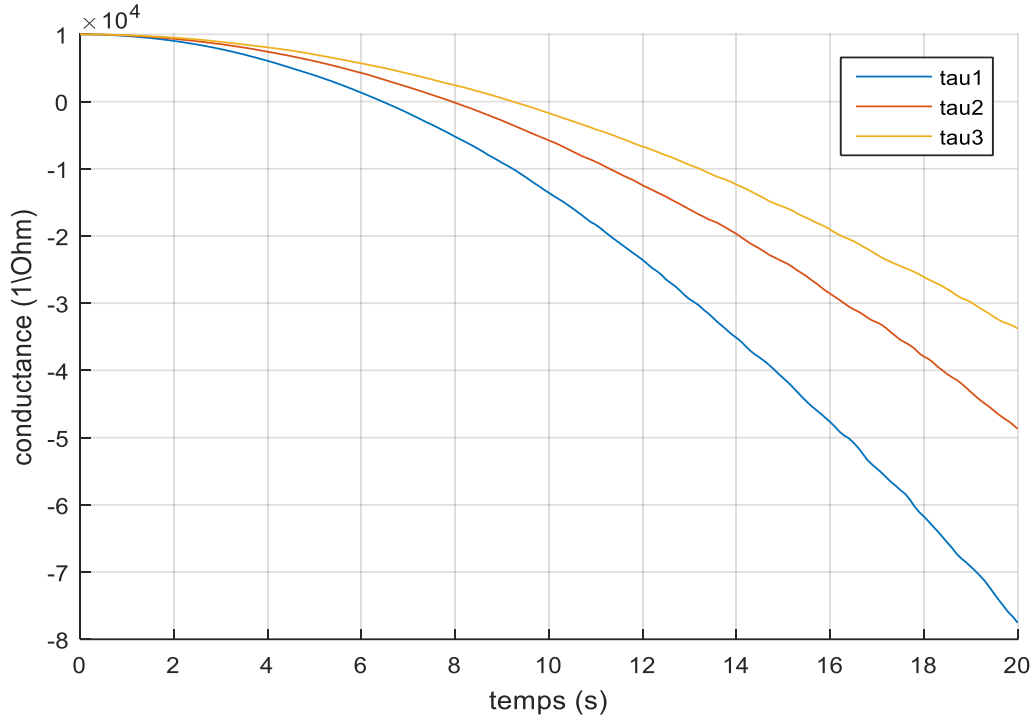
Cette courbe affiche aussi et dégage l'influence du rapport tension sur puissance de refroidissement et constante de temps de désionisation sur la durée d'extinction de l'arc électrique, c'est-à-dire plus on a la puissance de refroidissement importante et la constante de temps de désionisation très faible plus nous aurons une extinction de l'arc très rapide et même presque une non apparition d'un arc électrique dans ces conditions.

c) **P_0 = 8099910 W, U =380volt**

1. **tau1=0.002 sec.**

2. **tau2=0.003 sec.**

3. **tau3=0.004 sec.**



Figure(III.3) : Le comportement de la conductance avec U=380 (Volt)

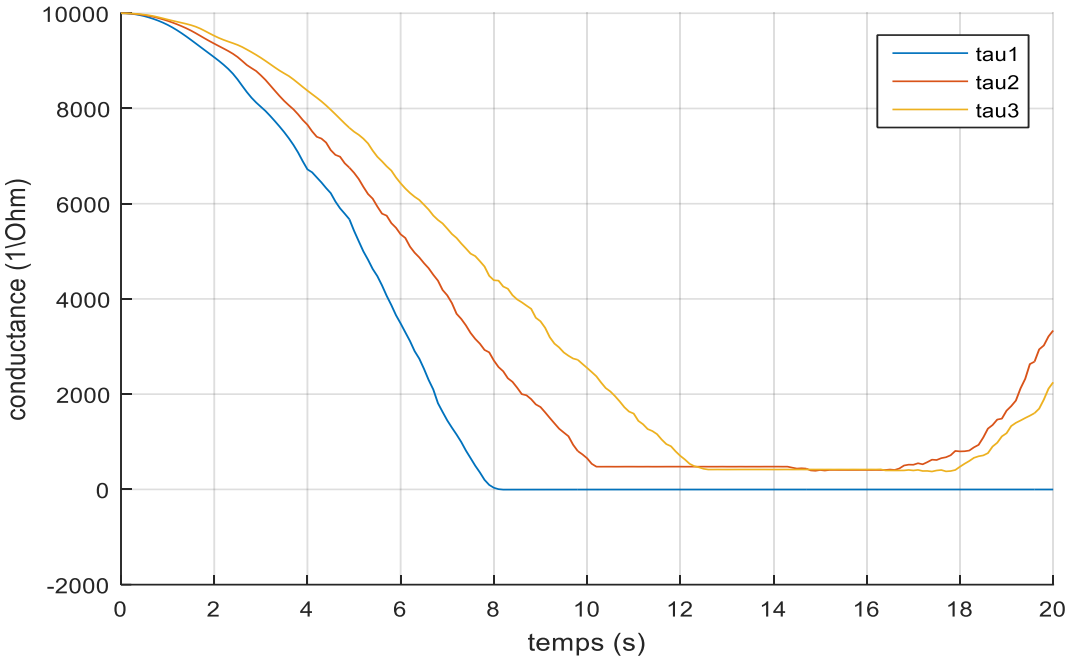
Nous notons que la diminution de tau produit diminution de la conductance de l'arc.

d) **P_0 = 8099910 W, U = 1000V**

1. **tau1=0.002 sec.**

2. **tau2=0.003 sec.**

3. **tau3=0.004 sec.**

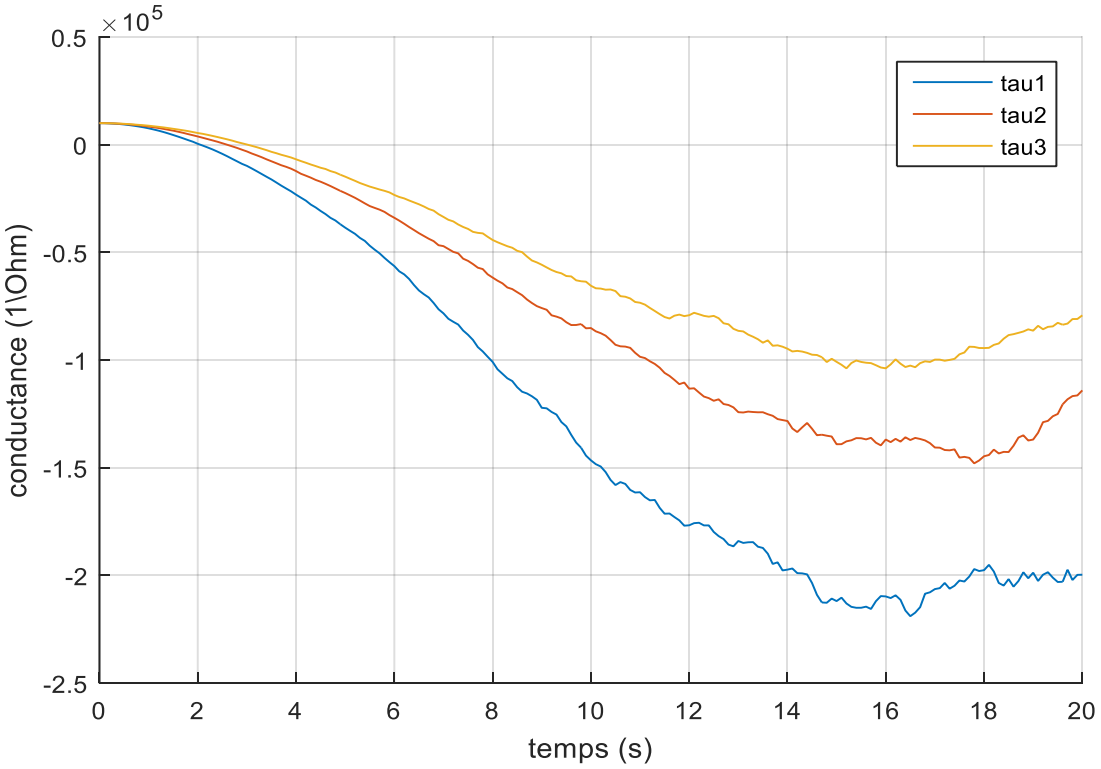


Figure(III.4) : Le comportement de la conductance avec U=1000 (Volt)

Nous constatons aussi que l'augmentation dans la tension dans ce cas U= 1000V rend la conductance se dirige vers le zéro plus rapidement que pour le cas de U=380V.

e) **P_0 = 8099910 W, U = 1000V**

1. **tau1 =0.0002 sec,**
2. **tau2 =0.0003 sec.**
3. **tau3 =0.0004 sec**



Figure(III.5) : Le comportement de la conductance par trois valeurs tau (0.0002, 0.0003, 0.0004) s

Nous observerons que plus constante de temps de désionisation est faible plus la conductance de l'arc décroît plus rapidement ver zéro.

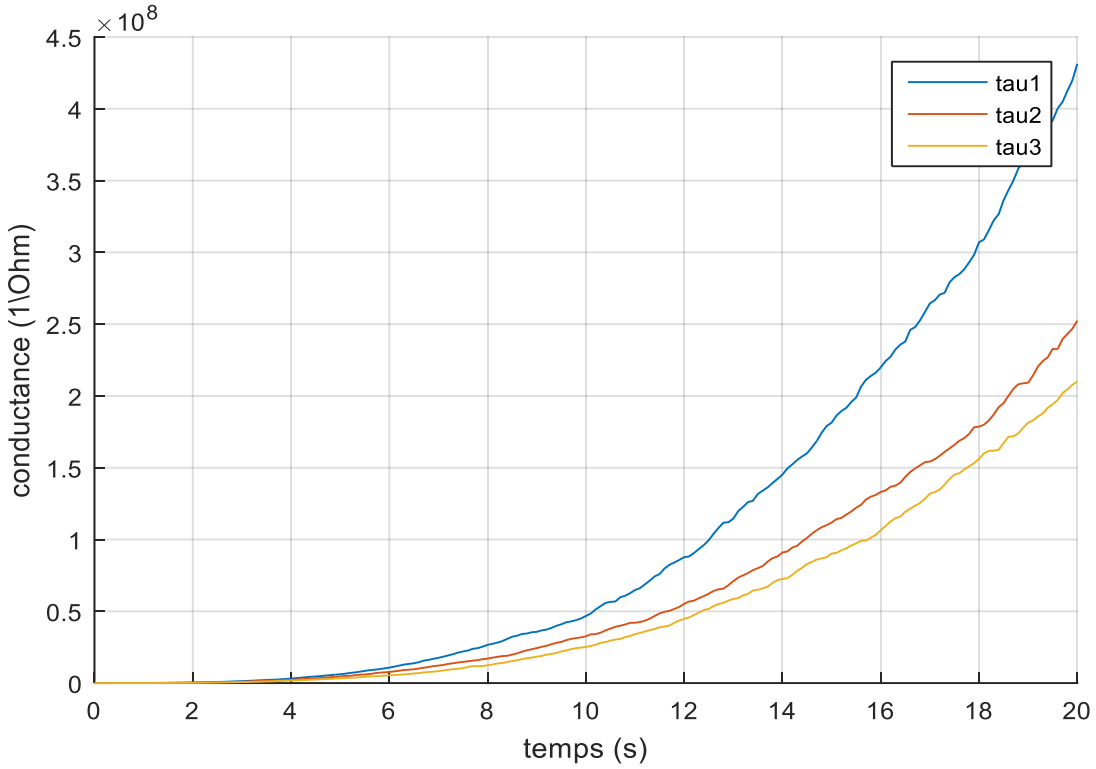
C'est -à- dire que y une relation proportionnelle entre les deux paramètres.

III.2.2 Calcul numérique du comportement de la conductance pour une puissance de refroidissement plus faible.

a) **P_0 = 15 917 (W), U=1000 (V)**

tau1 =0.002 s

1. **tau2 =0.003 s**
2. **tau3=0.004 s**



Figure(III.6) : Le comportement de la conductance avec U=1000 (Volt)

Nous remarquons que la courbe de la conductance de l'arc est une courbe croissante vers des valeurs positives importantes et ce pour une valeur de la puissance de refroidissement très faible relativement à la valeur précédemment prise en considération dans nos calculs en haut ceci est interprété par un échec de coupure de l'arc électrique.

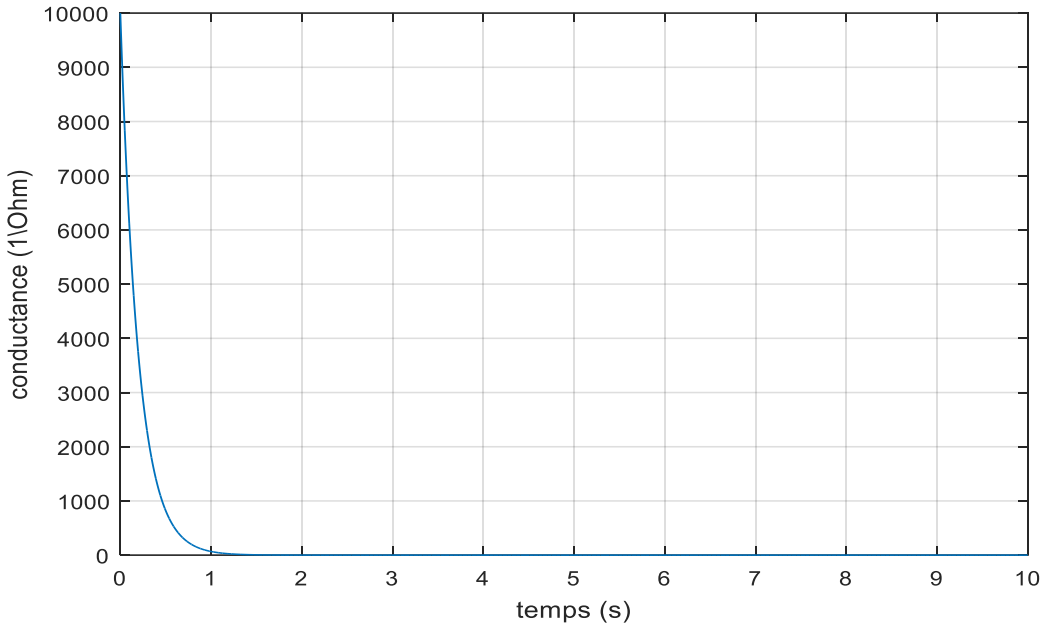
III.2.3 Calcul analytique de la conductance g en extinction :

1. Premier formule :

Dans le cas où la puissance de refroidissement est très grande devant la puissance joule, l'arc électrique suit un modèle de l'arc en extinction qui suit la formule suivante :

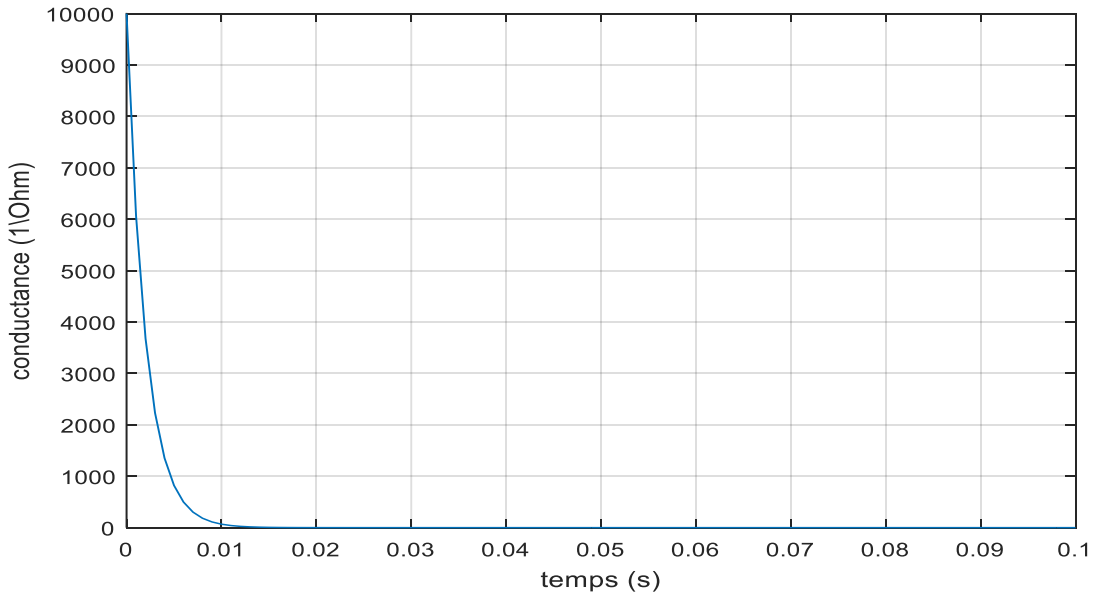
$$\frac{dg}{dt} = g_0 \times \mathrm{e}^{(\frac{-t}{tau})}$$

a) tau= 0.2 s, g0 = 10000 S et l'intervalle de temps est t= [0:0.001:10] en s.



Figure(III.7) : Le comportement de la conductance par prendre tau=0.2s.

b) tau=0.002 s, g0 = 10000S et l'intervalle de temps est t= [0:0.001:0.1] s.



Figure(III.8) : Le comportement de la conductance par prendre tau=0.002s.

Nous constatons que le comportement de la conductance dépend de l'augmentation ou la diminution de la valeur de la constante de temps de désionisation « Tau » comme suivant :

Dans la figure (III.7) avec tau= 0.2s la conductance de l'arc décroit la figure (III.8) dont tau= 0.002s.

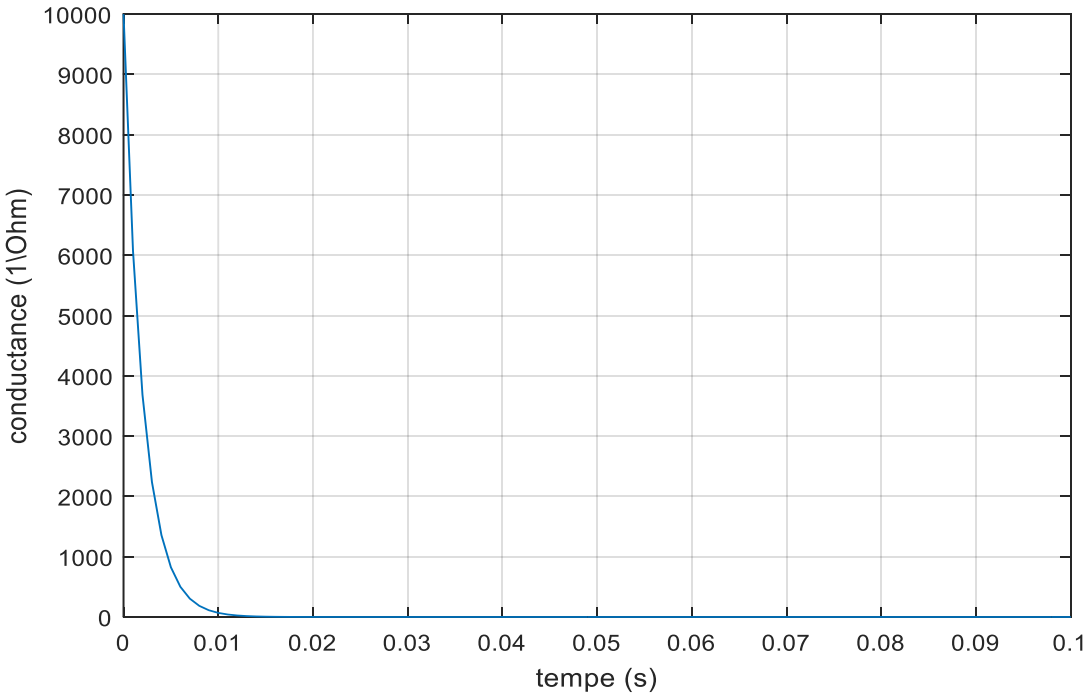
2. **deuxième formule de « g » :** avec l'ajout du terme (1-pm/p0) dans la formule

$$\frac{\mathrm{dg}}{\mathrm{dt}} = g_0 \times \mathrm{e}^{(-\mathrm{t}.\frac{\left(1-\mathrm{pin}/P_0\right)}{tau})}$$

P_{in} : puissance fournie par le circuit

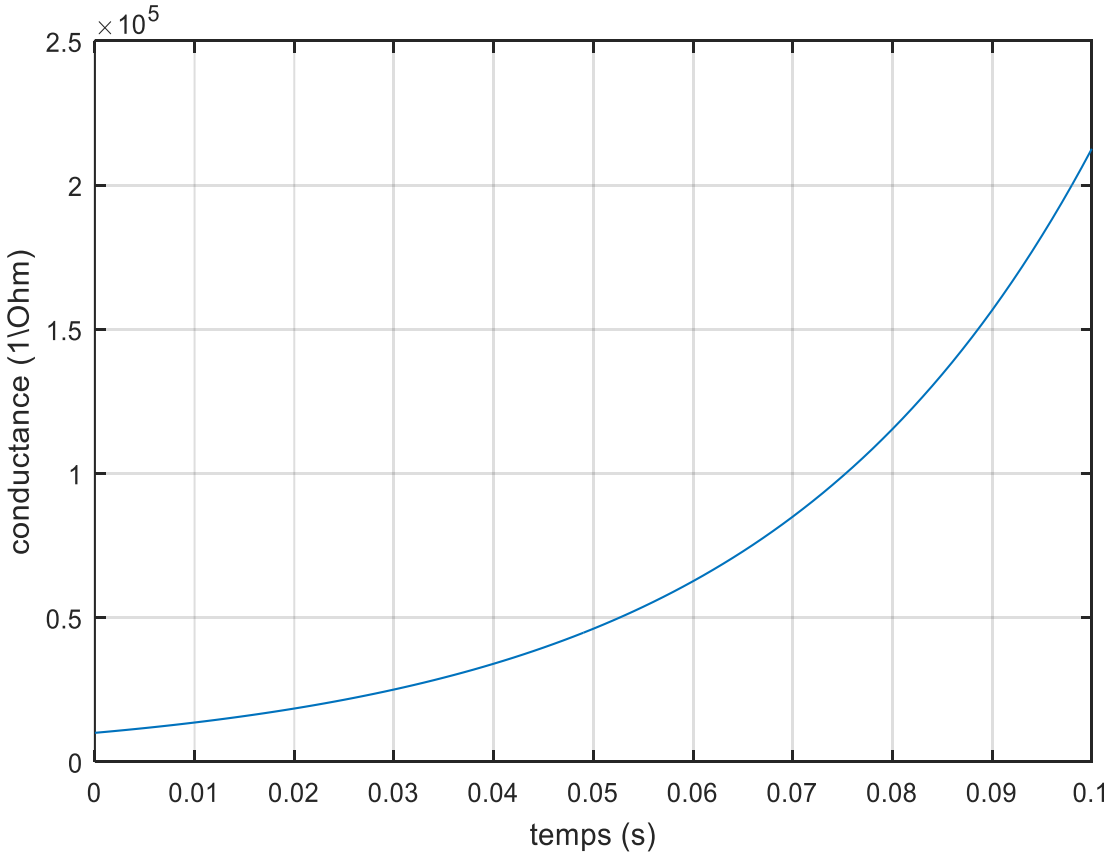
p_0 : puissance de refroidissement de l'arc

a) **tau= 0:002 sec, g_0 = 10000 S, P_0 = 8099910 W, Pm=15 917 W, sur un intervalle de temps t=[0:0.001:0.1]s.**



Figure(III.9) : Le comportement de la conductance si P0>pm

b) tau =0.002 sec, g_0 = 10000 S, P_0 = 15000 W, Pm=15 917 W, t= [0:0.001:0.1] s.



Figure(III.10) : Le comportement de la conductance si P0<pm

Nous remarquons ici que si :

- P0>Pm la conductance de l'arc décroit vers la valeur nulle comme il est représenté dans la figure (III.9) ce qui implique une extinction de l'arc,
- p0<Pm la conductance 'g' croit vers des valeurs positives comme il est indiqué dans la figure(III.10) ce qui implique un échec d'extinction d'arc électrique.

Conclusion :

À travers ce chapitre on peut conclure que le modèle de Mayr traduit bien le comportement de la conductance de l'arc dans les de disjoncteur HT.

La conception générale d'un arc électrique relie exclusivement les paramètres suivants :

la constante de temps de désionisation (tau), la tension d'arc (U), la conductance d'arc (g),le courant d'arc (i), la puissance interne du circuit (pin) et la puissance de refroidissement de l'arc (p0), dans ce chapitre nous avons représenté plusieurs graphes qui illustre l'impact de la variation des paramètres mentionner précédemment, soit par l'augmentation ou diminution de leur valeurs, sur le comportement de l'arc électrique.

D'après nos résultats nous conclurons que l'extinction et/ou l'échec d'un arc électrique dépend des caractéristiques du milieu isolateur utilisé dans notre équipement ou appareil de protection.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail que nous avons réalisé sur la modélisation de l'arc électrique dans un disjoncteur haute tension à l'huile , montre bien la grande difficulté des chercheurs à mettre au point un modèle d'arc réaliste , capable d'interpréter les mécanismes qui régissent la coupure de l'arc qui passe de l'état conducteur à l'état isolant en quelques millisecondes.

- L'étude bibliographique sur le disjoncteur haute tension nous a permis de choisir les caractéristiques de l'huile isolante utilisée en HT et de faire le point sur les techniques d'extinction qui interviennent dans le disjoncteur de haute tension.
- La programmation directe sous MATLAB, de la méthode de calcul Runge-Kutta (ODE45), nous a permis d'augmenter la précision des résultats caractéristiques de la coupure, comme la conductance et la tension, et de familiariser avec les méthodes de résolution numériques.
- Le modèle de conductance que nous avons étudié a permis l'élargissent du domaine d'étude à plusieurs paramètres (puissance de refroidissement, temps de dés ionisation,..) et de faire l'interprétation des résultats.
- L'extinction de l'arc électrique à travers un disjoncteur haute tension peut être décrire par le modèle de Mayer (autour du courant zéro).
- Les disjoncteurs à haute tension à l'huile possèdent des milieux d'extinction a constant de temps très réduits. Toutefois, nous savons que cette réduction n'a pas que des avantages, car elle favorise l'apparition de surtension de manœuvre ; aussi ces appareils doivent-ils être conçus pour maitrise parrfaitement ces surtension ou, sinon, être munis de moyens propose à en limiter l'amplitude (condensateur, résistance, parafoudre)
- La puissance de refroidissement conditionne la durée du coupure et son augmentation favorise l'extinction.

Enfin, que la coupure par l'arc électrique reste actuellement la solution incontournable dans les réseaux électrique et que grâce aux moyens de calculs actuels qui permettent d'affiner la résolution de modélisation, la conception des disjoncteurs s'améliore sans cesse.

.

Bibliographie

- [1] **: M^{me} ZIDQNE.F** « Modélisation d'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT» - thèse- univ de Bejaia. 2015.
- [2] **: Sylvain NICHELE** « Modélisation physique et simulations numériques des Écoulements dans les disjoncteurs électriques haute tension » Thèse de doctorat octobre 2011.
- [3] **: «** Disjoncteur 3AP1 FI tension nominale 245kV N°35078683 ». **Instruction desservie pour SONELGAZ** Siemens AG2003.
- [4] : **Denis DUFOURNET** « Appareillage électrique d'interruption HT (partie 2)» DOSSIER Techniques de l'Ingénieur d4692 Document délivré le 09/05/2012. P5-6.
- [5]: **KECHAR EL-KHENSSA** Simulation de l'arc électrique dans un disjoncteur de haute tension UNIVERSITY BADJI MOKHTAR ANNABA mémoire de master 2010
- [6] **: Serge THEOLEYRE** « Les techniques de coupure en MT », Cahier technique n° 193 édition septembre 1998.
- [7] **R. Bartnikas**, ''Engineering dielectrics. Vol Iib: Electrical Properties of Solid Insulating Materials : Measurement Techniques
- [8] **N. Berger,** ''Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale", Techniques de l'ingénieur, D 2470.
- [9] **D. Cherry,** ''Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers", October 29 2009.
- [10] **B. Audrey,** ''Étude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance", Thèse de Doctorat, INP de Grenoble, 2007.
- [11] **: zensol@zensol.com** Disjoncteurs Haute tension.htm.
- [12]:« **electric arc model for high voltage circuit breakers based on matlab/Simulink**» International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT), Vol. 1, No.2, FEBRUARY 2013 ISSN (Print) 2277—7261.
- [13] : **M^{me} Laure REYNARD** « Modélisation tridimensionnelle de l'amorçage de l'arc électrique dans un disjoncteur basse-tension » Thèse doctorat à l'école centrale de Lyon. Février 2006.
- [14] : **Dannet RANDRIANARIVAO** « modélisation des écoulements dans un disjoncteur haute tension » Thèse de doctorat de Toulouse septembre 2012.

- [15] : **Yann Cressault** « Propriétés des appareils de coupure » Laboratoire LAPLACE. Cahier technique
- [16] : **Merlin Gerin**, « Disjoncteurs MT 30 kV: Fluarc FB.4» France, juin 2002.
- [17] : **Zeghichi Leyla** « Etude D'une Décharge Electrique par la Méthode De Monte Carlo » mémoire de magister à l'université de Batna. Avril 2010.
- [18] **S. Vaquié, "L'arc électrique** ", CNRS Éditions, Paris, 2000, pp : 188-189.
- [19] J.A. Martinez-Velasco, "Modeling of circuit breakers using the type-94 component ", EEUG News February 1997, pp 55-66. □
- [20] **L. van der Sluis and W.R Rutgers**, "The comparison of Tests Circuits with Arc Models", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2 1994 pp 137142.
- [21] **C. Guilloux, V. Therme, P.G. Scarpa**, "Measurement of the post-arc current of HV circuit breakers: application to short circuit tests with ITRV", IEEE Trans. 1993, PWRD-8, (3), pp 1148-1153.
- [22**] J.A.Martinez-Velasco**, EEUG News Aug-Nov 1998, pp 77-87.
- [23**] L. van der Sluis, W.R Rutgers, C.G.A. Koreman**" A physical arc model for the simulation of current zero behaviour of high-voltage circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7 Issue: 2, April1992 pp 1016-1022. □
- [24] **B. Blez, C. Guilloux,** "Post-arc current in high Voltage SF6 circuit-breakers when breaking at up to 63 KA", IEEE Trans, 1989, PWRD-4, (2), pp 1056-1062.
- [25] **H. A Darwish and N. Elkalashy.** "Comparison of Universal Circuit Breaker Arc Representation with EMTP Built-in Model", International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-6.
- [26] **L.R Orama and B. R. Medina**, "Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF_6 Circuit Breaker Simulations", International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-5.
- [27] **R.P.P Smeets, S. Nishiwaki,** "Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers By Means of Current Zero Analysis", IEEE trans., 2002, pp 424-429.
- [28] **R. P.P Smeets and V. Kertész**, "Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a validated arc model", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp: 121-125

- [29**] P. H Schavemaker and L. van der Sluis,** "An improved Mayr-Type arc model based on current-zero measurement", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2, April 2000 pages: 580-584
- [30] **P. H Schavemaker and L. van der Sluis**, "Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers", IEE Proc. Sei. Meas. Technol., Vol. 149 N° 4, July 2002 pp 153-157.
- **[**31**] (M43) Mayr O,** « Beitrage zur theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens » , Archiv fr Elektrotechnik, vol Band 37, Heft 12, pp 588-608, 1943.
- [32] **[C39] Cassie A. M.** « Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidit´e des circuits », CIGRE Report, 102, 1939.