

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITY BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2010

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'électrotechnique

MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du
Diplôme de **MAGISTER** en Electrotechnique
Option **Réseaux électriques**

**SIMULATION DE L'ARC
ELECTRIQUE DANS UN
DISJONCTEUR DE HAUTE TENSION**

Présenté par

KECHAR EL-KHENSZA

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Mr AZZAG EL-BAHI Mc UNIVERSITE ANNABA

PRESIDENT : Mr HOUABES MOURAD Mc UNIVERSITE ANNABA

EXAMINATEUR : Mr LABAR HOCINE Mc UNIVERSITE ANNABA
Mr OMEIRI AMAR Mc UNIVERSITE ANNABA
Mr RAZEM HAMID Mc UNIVERSITE ANNABA

ANNEE 2010

Remerciement

L'exprime ma profonde reconnaissance et ma parfaite gratitude à mon encadreur :

Le Docteur : AZZAG EL BAHJ

Je lui suis reconnaissant pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il a bien voulu me témoigner, mais également pour les connaissances qu'il m'a apportées, et pour ses conseils, et son soutien tout au long de cette étude.

Je tiens à remercier particulièrement Messieurs les membres du jury pour avoir accepté et pour m'avoir honoré par leur participation à l'examen de ce travail.

Dedicace

*Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide inconditionnelle de ma famille, en particulier **mes parents** ; mon marié « **FATEH** » ; ma sœur « **ELCHAFIA** » et tous mes frères qui m'ont toujours encouragé et soutenu tout au long de ces années.*

*En fin, je terminerais cette liste en remerciant particulièrement « **MERJEM** » pour sa patience et son soutien. Merci mes amis et mes collègues.*

Simplement : merci à tous.

Abstract :

Power cuts in the electrical circuit are effected through the appearance of an electric arc between two electrodes which differ from each other.

This arc generates severe thermal and dynamic conditions within a plasma environment in the circuit breaker housing. We are interested in the simulation of an electric arc in a high voltage circuit breaker type.

The current objective is to address specifically the seed stage of the arc linked to the electrode gap, treating the case of short circuit current.

The fundamental role played by the electric arc cutting, a phenomenon particularly difficult to control, to the point that no technology is continuously received previously to dominate all others in all areas of employment.

So obviously master the most general characteristics of each specific technical area to determine their job preferences and assess the future than they can reasonably predict.

Résumé :

Les coupures de courant dans les circuits électriques s'effectuent à travers l'apparition d'un arc électrique entre les deux électrodes qui s'écartent l'une de l'autre.

Cet arc génère des Conditions thermiques et dynamiques sévères au sein d'un milieu plasma dans le boîtier du disjoncteur.

Nous sommes intéressé à La simulation du comportement d'un arc électrique dans un disjoncteur de type haute tension. L'objectif actuel est d'aborder plus précisément la phase d'amorçage de l'arc liée à l'écartement des électrodes, traiter le cas des courant de court circuit.

Le rôle fondamentale joué par l'arc électrique de coupure, phénomène particulièrement délicat à maîtriser, au point qu'aucune technique d'interruption n'est parvenue jusqu'alors à dominer toutes les autres dans tous les domaines d'emplois.

Donc maître en évidence les caractères généraux les plus spécifiques de chacune de ces techniques, afin de préciser leur domaine d'emplois préférentiels et d'évaluer l'avenir que l'on peut raisonnablement leur prédire.

تجري كل حالات انقطاع التيار الكهربائي في الدارات الكهربائية من خلال ظهور شرارة كهربائية بين قطبين التي تتباعد عن بعضها البعض.

هذه الشرارة تؤاد ظروف شديدة الحرارة والحركية في بيئة البلازما في دائرة علبة القاطع. ونحن مهتمون في محاكاة للشرارة الكهربائية في قاطع للجهد العالي.

والهدف الحالي هو على وجه التحديد معالجة محددة للشرارة المرتبطة بتباعد الاقطاب ، ومعالجة حالات قصور دارة .

الدور الأساسي الذي تقوم به قطع الشرارة الكهربائية، وهي ظاهرة من الصعب جدا السيطرة عليها، لدرجة أنه لم يتم تلقي أي تكنولوجيا للسيطرة عليها في جميع مجالات العمل في السابق باستمرار.

لذلك يجب توضيح الخصائص العامة لكل مجال تقني، لتعين وتحديد أفضل لمجالات عملهم وتقييم المستقبل أكثر مما يمكن توقعه.

Liste des figures

N ^o Figure	Nom des figures	Page
Fig I.1	Caractéristique courant tension de décharge dans les gaz	03
Fig I.2	Schéma de l'arc transféré	06
Fig I.3	Schéma de l'arc non transféré (torche à plasma)	06
Fig I.4	Décharges glissantes	07
Fig I.5	Electrodes de décharges à barrière diélectrique	07
Fig I.6-a	Analyse de l'arc électrique et son phénomène physique (a)	08
Fig I.6.b	Tension caractéristique ou tension d'arc U_a (b)	09
Fig I.7	Schéma d'extinction d'arc électrique par «arrachement»	10
Fig I.8	Analyse de la tension transitoire de rétablissement, TTR	11
Fig I.9	Schéma de l'arc en condition d'extinction	13
Fig II.1	Schéma de l'interruption d'un courant continu	15
Fig II.2	Circuit alimenté en courant alternatif	17
Fig II.3	Analyse de l'importance de l'instant de la coupure dans l'interruption d'un circuit alimenté en courant alternatif	18
Fig II.4	Tension transitoire de rétablissement	18
Fig II.5	Exemple de tension transitoire de rétablissement relative à l'oscilloscope	19
Fig II.6	Caractéristiques d'arc pour trois longueurs différentes d'arc	22
Fig II.7	Coupure avec allongement de l'arc	23
Fig II.8	Caractéristique statique d'un arc de forte puissance	24
Fig II.9	Coupure en courant continu	24
Fig II.10	Comparaison entre les coupure en courant continu et en courant alternatif	25
Fig III.1	Caractéristique thermique d'un conducteur en fonction de la température	30
Fig III.2	Protection d'un circuit par disjoncteur	30
Fig III.3	Analyse de la forme d'un courant comportant une composante apériodique	31
Fig III.4	Analyse de différents courants de courts-circuits	32
Fig III.5	Composante symétrique	35
Fig III.6	Analyse de circuit triphasé symétrique alimenté par une source infiniment puissante	37
Fig III.7	Analyse de courant de court circuit est asymétrique	39
Fig III.8	Plage du coefficient de choc	40

Fig IV.1	Analyse des différents courants de court circuit	42
Fig IV.2	Schéma de principe du circuit électrique	43
Fig IV.3	Simulation matlab de courant de court circuit	51
Fig IV.4	Simulation du courant en régime sans avarie	52
Fig IV.5	Simulation de la tension en régime sans avarie	52
Fig IV.6	Simulation du courant en court circuit monophasé (phase-terre)	53
Fig IV.7	Simulation de la tension en court circuit monophasé (phase-terre)	53
Fig IV.8	Simulation du courant en court circuit biphasé	54
Fig IV.9	Simulation de la tension en court circuit biphasé	54
Fig IV.10	Simulation du courant en court circuit triphasé	55
Fig IV.11	Simulation de la tension en court circuit triphasé	55
Fig V.1	Constitution du disjoncteur	58
Fig V.2	Analyse du fonctionnement du disjoncteur (coupe longitudinale)	59
Fig V.3	Constitution du Chambre de coupure	60
Fig.V.4	Effet de l'arc dans la chambre de coupure	61
Fig V.5	Schéma du circuit électrique comprenant le disjoncteur.	61
Fig V.6	Evolution du courant présumé, limité, de la tension du réseau et de la tension d'arc au cours du temps	63
Fig V.7	Circuit appliqué pour la simulation de l'arc électrique	65
Fig V.8	Simulation matlab de l'arc électrique	66
Fig V.9.a	Tension de branchement au régime nominale (U=5.5 kV)	67
Fig V.9.b	Simulation du courant dans le régime nominale (U=5.5 kV)	67
Fig V.9.c	Simulation du courant d'arc après la coupure (U=5.5 kV)	68
Fig V.9.d	Simulation du l'impédance au moment de la coupure (U=5.5 kV)	68
Fig V.10.a	Simulation de la tension de branchement au régime nominale (U=10 kV)	69
Fig V.10.b	Simulation du courant dans le régime nominale (U=10 kV)	69
Fig V.10. c	Simulation du courant d'arc après la coupure (U=10 kV)	70
Fig V.10. d	Simulation du l'impédance au moment de la coupure (U=10 kV)	70

Fig V.11.a	Simulation de la tension de branchement au régime nominale	(U=15 kV)	71
Fig V.11.b	Simulation du courant dans le régime nominale	(U=15 kV)	71
Fig V.11.c	Simulation du courant d'arc après la coupure	(U=15 kV)	72
Fig V.11.d	Simulation de l'impédance au moment de la coupure	(U=15 kV)	72
Fig V.12.a	Simulation de la tension de branchement au régime nominale	(U= 60 kV)	73
Fig V.12.b	Simulation du courant dans le régime nominale	(U= 60 kV)	73
Fig V.12.c	Simulation du courant d'arc après la coupure	(U= 60 kV)	74
Fig V.12.d	Simulation de l'impédance au moment de la coupure	(U= 60 kV)	74
Fig V.13.a	Simulation de la tension de branchement au régime nominale	(U= 150 kV)	75
Fig V.13.b	Simulation du courant dans le régime nominale	(U= 150 kV)	75
Fig V.13.c	Simulation du courant d'arc après la coupure	(U= 150 kV)	76
Fig V.13.d	Simulation de l'impédance au moment de la coupure	(U= 150 kV)	76
Fig V.14.a	Simulation de la tension de branchement au régime nominale	(U= 220 kV)	77
Fig V.14.b	Simulation du courant dans le régime nominale	(U= 220 kV)	77
Fig V.14.c	Simulation du courant d'arc après la coupure	(U= 220 kV)	78
Fig V.14.d	Courbe de l'impédance au moment de la coupure	(U= 220 kV)	78
Fig V.15.a	Simulation de la tension de branchement au régime nominale	(U= 440 kV)	79
Fig V.15.b	Simulation du courant dans le régime nominale	(U= 440 kV)	79
Fig V.15.c	Simulation du courant d'arc après la coupure.	(U= 440 kV)	80
Fig V.15.d	Simulation de l'impédance au moment de la coupure	(U= 440 kV)	80
Fig VI.1	Évolution des techniques de coupure		84
Fig VI.2	Exemple de coupure d'un courant efficace de 8 kA sous une tension simple efficace de 17 kV à l'aide d'un disjoncteur à coupure dans l'air		85
Fig VI.3	Disjoncteur à bain d'huile : coupe schématique		86
Fig VI.4	Dispositions schématiques de diverses tuyères d'appareils à air comprimé		88
Fig VI.5	Evolutions de la tension de claquage U_e dans l'air et dans le SF ₆ en fonction de la pression		90
Fig VI.6	Courbe de réparation de température d'un arc contenu dans un tube cylindrique		91
Fig VI.7	Conductivités thermiques de l'azote et de l'hexafluorure de soufre		92
Fig VI.8	Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz		92
Fig VI.9	Influence de la distance inter-electrodes sur la tension de claquage		93
Fig VI.10	Fonctionnement schématique d'un interrupteur synchronisé à diodes		95
Fig VI.11	Analyse de l'arc tournant		96
Fig VI.12	Diagramme pression -température pour différentes masses volumique de SF ₆ (à 20°C)		98

Liste des Tableaux

N ^o Tableau	Nom des tableaux	Page
Tableau III.1	Courant en module dans différente dissymétrie	36
Tableau IV.1	Données pour les alternateurs	44
Tableau IV.2	Données pour les transformateurs choisis	44
Tableau IV.3	Données pour la ligne	44
Tableau IV.4	Réactances de ligne et des transformateurs	45
Tableau IV.5	Réactances des alternateurs, des transformateurs et de câble	45
Tableau IV.6	Réactances des charges en unité relative	45
Tableau IV.7	Réactances sommaires	46
Tableau IV.8	Réactances après la formation triangle étoile	46
Tableau IV.9	résultas de calcul de courant de court circuit aux points CC-1, CC-2, CC-3	50
Tableau VI.1	Moyens de lutte contre l'arc électrique et techniques de coupure	83
Tableau VI.2	Produits de décomposition de l'huile par arc	87
Tableau VI.3	Condition d'utilisations les mieux adaptées à chaque technique	99

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation
TTR	Tension Transitoire de Rétablissement
PE	Poste d'extinction
SF6	Hexafluorure de soufre
PdC	Pouvoir de coupure
I_{1d}	Composante directe
I_{1i}	Composante inverse
I_{10}	Composante homopolaire
\mathbf{a}	Opérateur vectoriel
I_{cc}	Courant de court-circuit en module.
I_{terre}	Courant de défaut à la terre en module.
Z_d	Impédance directe
Z_i	impédance inverse
Z_o	impédance homopolaire
Z	Impédance de terre
i_l	Composante libre
i_f	Composante forcée
T_a	Constante du temps de défaut.
I_{mp}	Composante périodique du courant de court circuit
K_{choc}	Coefficient de choc
x_0	Réactance spécifique de la ligne
ℓ	Longueur de la ligne
U_n	Tension nominale
U_{cc}	Tension de court-circuit (%)
S_n	Puissance nominale
θ	Constante de temps de désionisation
ρ	Masse volumique
MT	Moyenne Tension
HT	Haute Tension
THT	Très Haute Tension
p	Pression

SOMMAIRE

	Page
Introduction Générale	01
Chapitre II	
Chapitre I : Etude de l'arc électrique	
II.1 Généralités sur les phénomènes d'interruption des courant	15
II.1.1 Interruption d'un courant continu	15
I. 1 Etude de l'arc électrique.....	03
II.1.2 Interruption d'un courant alternatif	17
I. 2 Conditions de formation	03
II.1.3 Tension de rétablissement	18
I. 2 Etude de décharge électrique	03
II.2 Arc Inéluctable	20
I. 3.1 Caractéristique courant - tension des décharges dans les gaz	03
II.2.1 Généralités	20
I. 3.2 Présentation des décharges	05
II.2.2 Ionisation	21
I. 3.2.1 Type de décharges	05
II.2.3 Caractéristique d'arc	21
II.2.4 a) Décharges pointe-pointe	05
II.2.4 Surtension de coupure	23
b) Décharges pointe-plan	05
II.3 Comparaison entre les coupure en courant continu et en courant alternatif	25
II.4 Conclusion	05
▪ Arc transféré	26
▪ Arc non transféré	06
▪ Décharge glissante	06
c) Décharges plan-plan	07
Chapitre III	
I. 4 Rôle fondamental de l'arc électrique	08
III.1.4 Généralités	08
I. 4.1 Propriétés physiques de l'arc	27
III.1.2 Définition des courants à couper	08
I. 4.2 Propriétés électriques de l'arc	27
I. 4.2.1 Courant de court-circuit.....	10
▪ Conditions destination	27
I. 4.2.2 Courant de surcharge	10
▪ Comportement de l'arc suivant l'aspect thermique	28
I. 4.2.3 Comportement de l'arc suivant la nature du diélectrique	11
III. 3 Etude de Courant de court-circuit.....	29
III.4 Pouvoir de coupure.....	30
I. 5 Etude de l'arc électrique Sous tension continue et alternative	12
III.4.1 Pouvoir de coupure en court-circuit	30
I. 5.1 Arc sous tension continue	12
III.4.2 Pouvoir de coupure assigné en court-circuit.....	31
I. 5.2 Arc sous tension alternative	12
III.4.3 Vérification du fonctionnement en court-circuit.....	31
III.6 Conclusion	14
III.6.5 Principaux défauts de court-circuit.....	32

III .5.1	Caractéristiques des courts-circuits	32
III .6	Méthodes de calcul des courants de court-circuit	33
III.6.1	Méthode des impédances.....	33
III.6.1.1	Différents types de court-circuit	33
a)	Court-circuit triphasé	33
b)	Court-circuit biphasé isolé	33
c)	Court-circuit monophasé isolé.....	34
d)	Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé)	34
III.6.2	Méthode des composantes symétriques	34
III .7	Formulaire récapitulatif	36
III .8	Démonstration du courant de choc	37
III .8.1	Démonstration de coefficient de choc (K_{choc})	40
III .9	Conclusion	41

Chapitre IV

IV.1	Introduction	42
IV.2	Intérêt du calcul du courant de court-circuit	42
IV.3	Exemple de Calcul du courant de court circuit	43
IV.3.1	Calcule des réactances de ligne et des transformateurs.....	44
IV.3.2	Calcul du courant de court-circuit au point CC-1	46
IV.4	Exemple de simulation du courant de court-circuit.....	51
IV.4.1	Régime sans avarie	52
IV.4.2	Court circuit monophasé (phase-terre)	53
IV.4.3	Court circuit biphasé	54
IV.4.4	Court circuit triphasé.....	55
IV.5	Conclusion	56

Chapitre V

V .1	Généralités sur les plasmas et les arcs de disjoncteurs	57
V .2	Les disjoncteurs	57
V .2.1	Constitution du disjoncteur	57
V .2.2	Principe du fonctionnement du disjoncteur.....	58

V.3	Chambre de coupure.....	60
V.3.1	Constitution du Chambre de coupure.....	60
V.3.2	Fonctionnement de la Chambre de coupure.....	60
V.4	Etude en temporelle de la tension d'arc courant alternatif :.....	61
V.5	Principe de la coupure par disjoncteur.....	64
V.5.1	Coupure par disjoncteur.....	64
V.6	Simulation de l'arc sur un disjoncteur de haute tension	65
V.6.1	Analyse du circuit de simulation	65
V.6.1.1	Circuit appliqué	65
V.6.1.2	Simulation de l'arc électrique en haute tension.....	66
V.6.1.2.1	Les courbes	67
a)	En moyenne tensions U=5.5 KV	67
b)	En moyenne tensions U=10 KV	69
c)	En moyenne tensions U=15 KV	71
d)	En moyenne tensions U=60 KV	73
e)	En hautes tensions U=150 KV	75
f)	En hautes tensions U=220 KV	77
g)	En très haute tensions U=440 KV	79
V.7	Conclusion.....	81

Chapitre VI

VI.1	Introduction	82
VI.2	Moyens de lutte contre l'arc électrique et technique de coupure.....	82
VI.3	Grandes techniques d'interruption	83
VI.3.1	Coupure dans l'air.....	83
VI.3.1.1	Allongement de l'arc.....	84
VI.3.1.2	Absence de surtension de coupure.....	85
VI.3.1.3	Utilisation en moyenne tension.....	85
VI.3.2	Coupure dans l'huile	86
VI.3.2.1	Formulation d'hydrogène par décomposition de l'huile.....	86
VI.3.2.2	Théorie de la bulle gazeuse.....	86
VI.3.2.3	Appareils modernes	87
VI.3.2.4	Déclin progressif de la coupure dans l'huile.....	88
VI.3.3	Coupure dans l'air comprimé	88

VI.3.3.1	Sécurité et hautes performatrices	88
VI.3.3.2	Domaines réservés aujourd'hui à l'air comprimé.....	89
VI.3.4	Coupure dans l'hexafluorure de soufre.....	89
VI.3.4.1	La molécule de SF ₆	89
VI.3.4.2	Propriétés diélectrique de SF ₆	89
VI.3.4.3	Coupure dans le SF ₆	90
VI.3.4.3.1	Importance des propriétés thermiques de SF ₆	90
VI.3.4.3.2	Formation du palier de température et du noyau central	91
VI.3.4.3.3	Dissociation de la molécule	91
VI.3.4.3.4	Constante de temps d'arc dans le SF ₆	92
VI.3.5	Coupure dans le vide	93
VI.3.5.1	Vide diélectrique	93
VI.3.5.2	Mécanisme de la coupure dans le vide	94
VI.3.5.2.1	Formation du vapeur métallique	94
VI.3.5.2.2	Régime d'arc diffus	94
VI.3.6	Coupure Statique	94
VI.4	Arc tournant.....	96
VI.4.1	Principe	96
VI.4.2	Arc tournant et auto-expansion	97
VI.4.3	Sécurité d'emploi et maintenance	97
VI.5	Choix de la solution la mieux adaptée à chaque utilisation	98
VI.6	Conclusion	100
	Conclusion Générale	101
	Bibliographie	102

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.

Aux côtés des essais, la simulation numérique de l'arc électrique constitue un moyen efficace Pour étudier.

Ce travail est reparti sur six chapitres : le premier chapitre recense les Propriétaires physiques, électriques de l'arc électrique ainsi nous étudions l'arc électrique Sous tension continue et alternative est sont Comportement suivant l'aspect thermique et la nature du diélectrique.

Quand au second chapitre, On à étudier deux types de problèmes fondamentaux qui ne sont pas propres à l'appareillage électrique, on à aborder le plus spécifique et sans doute aussi le plus difficile : l'interruption des courant électriques en courant continue et alternatif ainsi nous étudions la tension transitoire de rétablissement.

Introduction Générale

Dans le troisième chapitre nous avons fait la définition des courants à couper : courant de surcharge et courant de court circuit, On à étudié en précision les principaux défauts de court-circuit et les méthodes de son calcul.

Dans le quatrième chapitre nous exposons le calcul du courant de court circuit et nous réalisons sa simulation en Court circuit monophasé, Court circuit biphasé et Court circuit triphasé.

Dans le cinquième chapitre nous étudions le fonctionnement et la coupure par disjoncteur et nous réalisons la simulation qui est composée d'un disjoncteur en amont coté source et un disjoncteur en aval coté charge .La simulation concerne le moment de coupure du disjoncteur amont ces constantes nous donne des courbes qu'ont une analogie avec les courbes de Davy qui elles sont plus précises car les courbes de Davy pédagogie mais les autres sont scientifiques.

Dans le sixième chapitre nous avons insisté sur les moyens de lutte contre l'arc électrique et les techniques de coupure et le choix de la solution la mieux adaptée à chaque utilisation Une conclusion générale vient enfin clore ce mémoire.

I.1 Etude de l'arc électrique

L'arc électrique correspond à une décharge lumineuse qui accompagne le passage de l'électricité entre deux conducteurs présentant une différence de potentiel convenable.

I.2 Conditions de formation

L'arc apparaît dans un milieu gazeux,

- Par claquage diélectrique entre deux électrodes :
- Au-delà d'une valeur de champ électrique $E = U/d$, fonction de la forme des Électrodes, de la nature et de la densité du gaz ($d =$ distance entre le électrodes).
- Suite à un cheminement sur un matériau isolant dégénéralant dans le gaz Ambient.
- Dès l'ouverture d'un circuit électrique parcouru par un courant : même si le circuit est purement résistif, une certaine distance est nécessaire pour éviter le claquage diélectrique.

Et, de plus, si le circuit est selfique, la distance nécessaire est plus importance, du fait du fort $L.di/dt$ (dû à la rapide variation d'intensité du courant).

I.3 Etude de décharge électrique

I.3.1 Caractéristique courant - tension des décharges dans les gaz

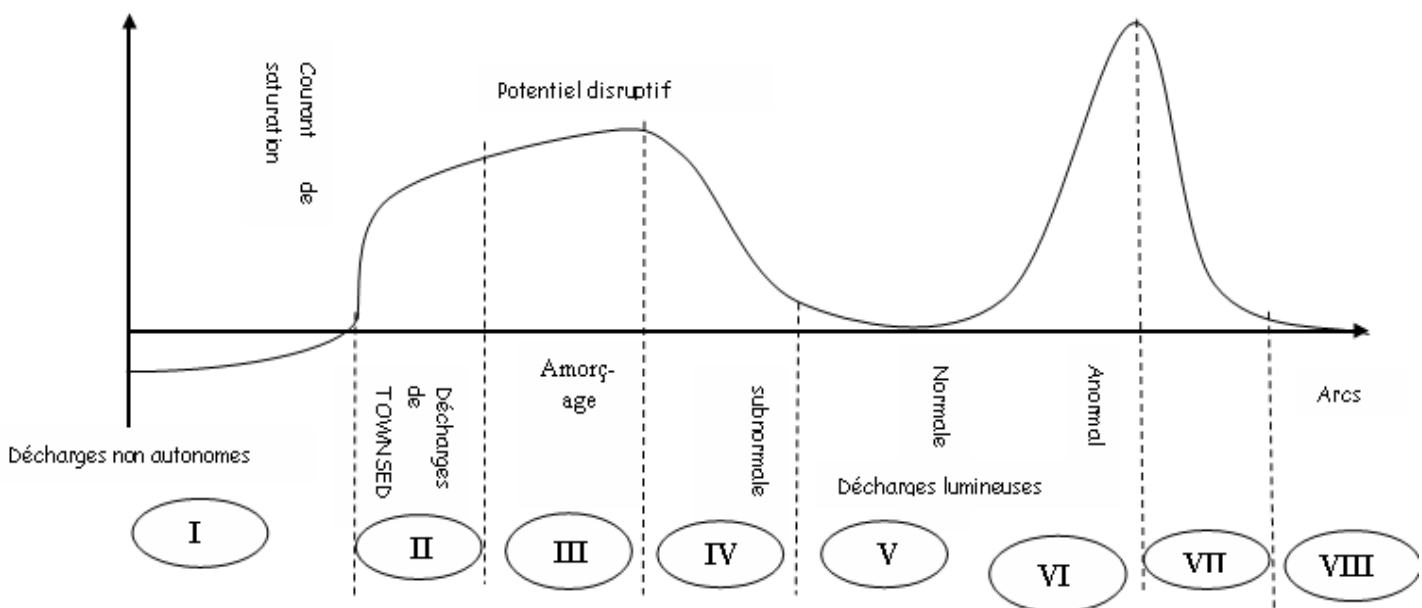


Fig I.1 : Caractéristique courant tension de décharge dans les gaz

La figure (I.1) représente une caractéristique courant-tension des décharges à basses pressions, entre deux électrodes isolées par un gaz quelconque. Cette caractéristique donne les ordres de grandeur des courants et des tensions qui interviennent dans les différentes formes de décharge.

- **Zone (I)**

Dans la première zone, le courant est proportionnel à l'intensité du champ électrique, ce qui vérifie la loi d'Ohm dans cette partie. Ceci est dû à l'équilibre entre les deux phénomènes : L'ionisation et la recombinaison des particules.

La tension croissante atteint une valeur au quelle il y'a plus d'équilibre entre ionisation et recombinaison, c'est à dire que la recombinaison s'absente et tous les ions se dirigent vers les électrodes, cet état de gaz s'appelle : état de saturation. Pour cette raison le courant ne dépend pas de la tension et dans ce cas, le courant s'appelle «le courant de saturation» : cette zone est non - autonome.

- **Zone (II)**

Décharge de Townsend, avec " $U_i < U < U_0$ ", tel que :

U_i : Tension nécessaire pour communiquer à un électron libre l'énergie minimale lui permettant d'ioniser par choc une molécule ou un atome non excité.

U_0 : Tension nécessaire pour produire les premières décharges visibles entre deux électrodes quelconques dans l'obscurité totale.

A partir de la tension U_i ; l'énergie des ions augmente et il se produit une autre forme de décharge dite «décharge obscure». Cette dernière est due au choc d'ionisation des électrons libres avec les molécules neutres du gaz, par conséquent le courant s'accroît.

- **Zone (III)**

La charge d'espace devient prédominante et permet une ionisation par choc beaucoup plus efficace, ce qui diminue la tension appliquée, tandis que le courant devient interne et par conséquent la décharge devient visible. Cette dernière n'est que " la décharge couronne".

- **Zone (IV, V,VI,VII et VIII)**

La décharge devient luminescente et elle est caractérisée par une déformation du champ par la charge électrique d'espace.

Pour une tension de plus en plus élevée, les faisceaux apparaissent entre les électrodes et finissent par les rejoindre et on a alors une décharge complète d'une électrode à l'autre.

Cette décharge peut être soit sous forme des lignes brisées et de courtes durées d'où l'appellera «Étincelle», soit sous forme d'arc et dans ce cas elle est caractérisée par la cathode, ceci est dû soit à une haute température, soit à l'effet d'un champ intense qui existe près d'elle.

I. 3.2 Présentation des décharges

I.3.2.1 Type de décharges

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes.

On classe celle-ci en trois familles qui induisent des comportements électriques des applications différentes.

a) Décharges pointe-pointe

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes et des angles métalliques).

Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz.

C'est pour cela que l'on utilise des pointes comme paratonnerre et que la machine de Watson était équipée d'une pointe...

L'utilisation de pointes a l'avantage de stabiliser le lieu de la décharge puisqu'on est sûr du point de départ et du point d'arrivée de celle-ci (mais rien n'impose que le trajet entre ces deux points soit une ligne droite).

Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques on n'utilise que rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectrique.

b) Décharges pointe-plan

Ce sont des arcs dont le chemin peut être instable ; c'est à dire que l'on connaît de manière certain le point de départ de l'arc mais qu'on ne peut pas prédire quel sera le point d'arrivée sur le plan ni même le chemin parcouru.

On peut distinguer trois types de décharge pointe plan : les arcs transférés, les arcs non transférés et les arcs glissants, qui ont des utilisations industrielles différentes. Les arcs transférés ou non transférés sont utilisés tous les deux en sidérurgie pour obtenir des gaz à de très hautes températures, à l'aide de courants importants (plusieurs centaines d'Ampères).

- **Arc transféré:**

Un arc transféré est un arc pointe-plan utilisé couramment pour la soudure. La pointe est l'électrode utilisée par le soudeur et le plan est la plaque de métal à souder. Il arrive qu'on utilise un gaz sous pression pour protéger la zone de soudage (protection contre les oxydations) mais cela ne change pas fondamentalement le trajet de l'arc qui va naturellement d'une électrode à l'autre.

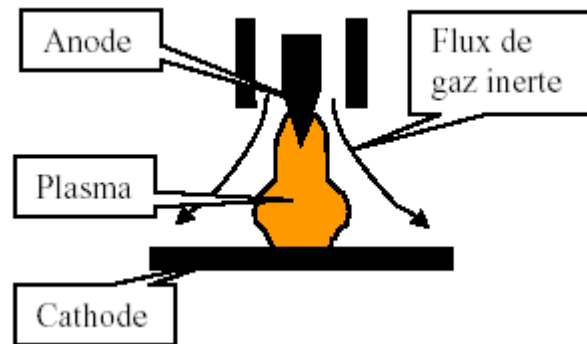


Fig I.2: Schéma de l'arc transféré

- **Arc non transféré**

La pointe de cet arc est le centre du dispositif et le plan est le tube qui entoure la pointe (cathode le plus souvent).

La différence essentielle avec l'arc précédent est que celui-ci est soufflé par un flux de gaz (gaz plasmagène), ce qui crée un arc projeté (jet de plasma) ; c'est une torche à plasma. La plupart du temps, on se sert de ce type de dispositif pour réaliser des dépôts de métaux sur différents matériaux.

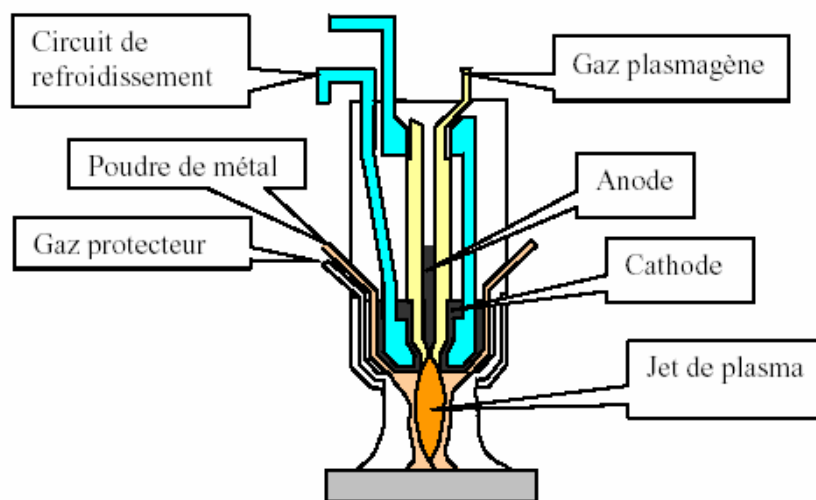


Fig I.3 : Schéma de l'arc non transféré (torche à plasma)

- **Décharge glissante**

Dans certains cas, on cherche à faire glisser l'arc en le soufflant le long d'une des électrodes, dans une configuration géométrique de décharge plan-plan ou pointe-plan .

Ce sont des dispositifs à arc glissant, généralement caractérisés par un courant de faible intensité ; l'allongement de la longueur de l'arc qui résulte du soufflage peut conduire à des tensions élevées relativement à celles qui seraient obtenues sans soufflage.

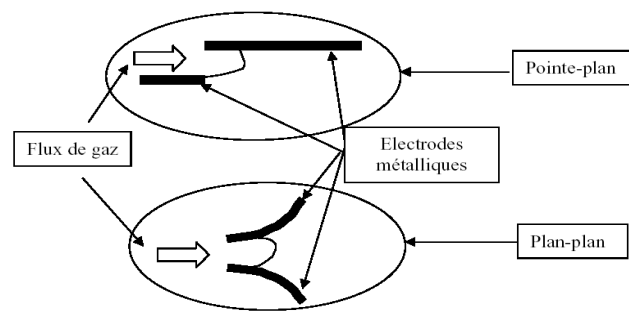


Fig I.4 : Décharges glissantes

c) Décharges plan-plan

Les décharges plan-plan sont rarement des décharges entre électrodes métalliques.

En effet, dans le cas d'une utilisation d'électrodes métalliques planes, on ne connaît ni le point de départ de la décharge, ni le point d'arrivée et, sans traitement particulier sur ces électrodes,

on n'obtient pas un arc homogène, réparti sur toute la surface des électrodes : on observe un arc unique se déplaçant dans l'espace inter électrodes, ou parfois, plusieurs arcs apparaissant et disparaissant dans ce même espace.

Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge.

Avec ce type de dispositif, il est beaucoup plus facile d'obtenir une décharge homogène surtout le plan.

Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaine(s) de KV) et des courants relativement faibles (quelques centaines de mA pour des sections de l'ordre de 10 cm²).

On utilise ces décharges à barrière diélectrique, entre autre, pour la production d'ozone.

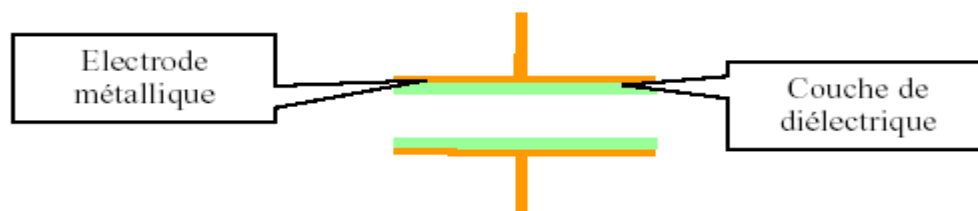


Fig I.5 : Electrodes de décharges à barrière diélectrique

I. 4 Rôle fondamental de l'arc électrique

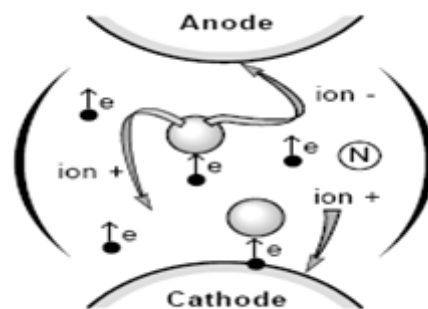
Seul l'arc électrique permet, à l'heure actuelle, de dominer l'interruption des courants de court-circuit considérable de nos grands réseaux d'interconnexion. Comme ceux de nos plus modestes installations domestique. Les subtiles raisons de cette suprématie résident dans ses propriétés physiques et électriques. Qui lui confèrent une incomparable aptitude à passer rapidement de l'état conducteur à l'état isolant.

I. 4.1 Propriétaires physiques de l'arc

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 thermo-émissif, 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 bombardent 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.



a : composition de la colonne d'arc

Fig I.6-a : Analyse de l'arc électrique et son phénomène physique (a)

I. 4.2 Propriétaires électriques de l'arc

- La plus notable est de faire apparaître une tension d'arc dont la valeur a :
- Une partie fixe, $U_{AC} \approx 20$ à 40 V, qui apparaît dès la moindre séparation des contacts (fonction des matériaux utilisés),
- 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

$$U_a = U_{AC} + U_L \tag{I.1}$$

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 :

$$U = R.I = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot I = \rho \cdot L \cdot J = \text{«constante»} \tag{I.2}$$

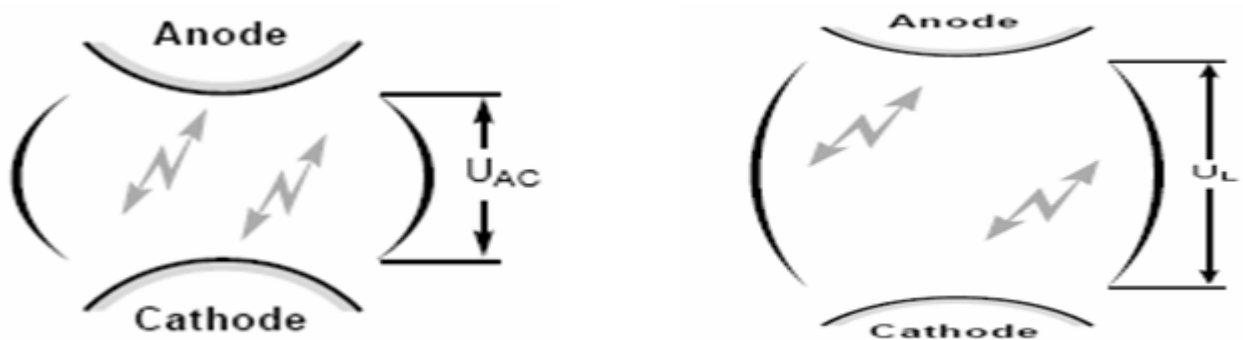
- Une énergie d'arc est produite,

$$W_a = \int u_a \cdot i_a \, dt. \tag{I.3}$$

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

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin \alpha;$$

Ce qui a pour effet de le cintrer si B est perpendiculaire à i , puis de le déplacer transversalement



$U_{AC} = 30 \text{ V}$ à la séparation des contacts

$U_L = 70 \text{ v/cm}$ après allongement de l'arc.

U_a : tension de l'arc

$$U_a = U_{AC} + U_L$$

Fig I.6.b : la tension caractéristique ou tension d'arc U_a .

I.4.2.1 Conditions destination

Il y a extinction quand le courant d'arc devient et reste nul.

I.4.2.2 Comportement de l'arc suivant l'aspect thermique

Quand le courant d'arc est petit ou devient petit, inférieur à 10 A par exemple, les échanges d'énergie thermique peuvent devenir supérieurs à l'énergie interne de l'arc et celui-ci «meurt» de froid (arc grêle), dès lors ceci se traduit par une tension d'arc qui augmente.

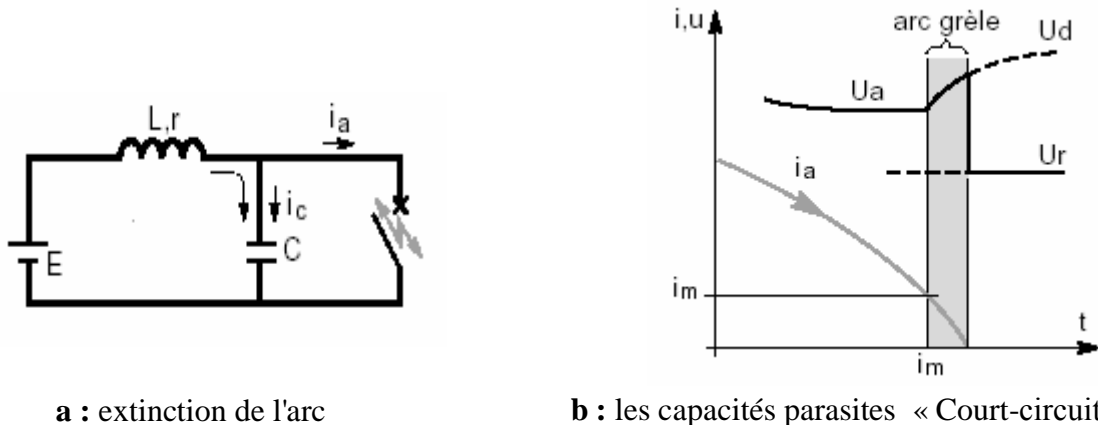


Fig I.7 : Schéma d'extinction d'un arc électrique par «arrachement»

Pendant cette augmentation de tension, une brutale extinction peut même apparaître si les capacités parasites «court-circuitent» l'arc, ce qui se produit quand la tension d'arc devient et reste plus grande que la tension de charge des capacités réparties.

Ce phénomène est appelé «arrachement». Il n'en est pas toujours ainsi :

- Si le courant d'arc vient se stabiliser contre une paroi isolante, sa surface d'échange thermique diminue et les composants de l'isolant, localement très chauds, peuvent favoriser la conduction et l'entretien de l'arc.
- Si le courant d'arc est important, la colonne d'arc est très exothermique et seule les évolutions conjointes de la tension d'arc et de la tension réseau permettent de réduire ce courant puis de l'annuler.

I.4.2.3 Comportement de l'arc suivant la nature du diélectrique

Il ne suffit pas que le courant d'arc devienne nul pour assurer son extinction : il faut que le milieu jusque là ionisé se régénère diélectriquement pour «résister» à la tension du réseau encore présente ! Ces phénomènes de régénération par recombinaison des ions + ou - et des électrons sont heureusement très rapides ! Aussi dans la pratique, pour que le courant d'arc reste nul, la tension du réseau doit donc être inférieure à la caractéristique de régénération (U_d).

Si la tension d'arc devient et reste supérieure à la tension réseau (en valeur absolue s'il s'agit de tension alternative), le phénomène de régénération sera amorcé pendant l'approche du zéro de courant :

Le nombre de charges électriques du plasma s'ajuste au strict minimum et devient nul en même temps que le courant.

Mais l'arc et les capacités parasites ont la même tension jusqu'à l'extinction du courant d'arc. Une fois le courant d'arc annulé, cette tension rejoint la tension réseau par un phénomène d'oscillation libre entre ces capacités réparties et les constantes L et R du circuit.

Ce «raccordement» en tension est appelé Tension Transitoire de Rétablissement «TTR».

Ces capacités étant faibles, ces oscillations ont une fréquence très élevée et sont très amorties.

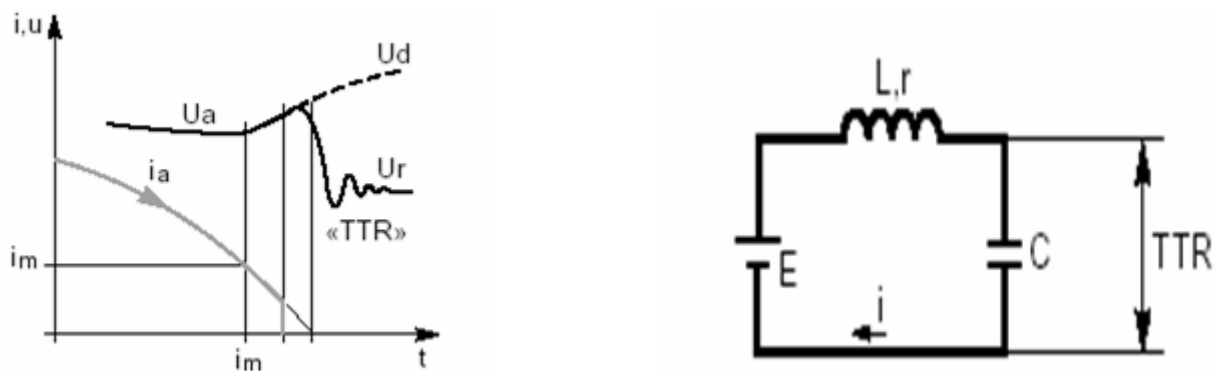


Fig I.8 : Analyse de la tension transitoire de rétablissement, TTR

I. 5 Etude de l'arc électrique Sous tension continue et alternative

I. 5.1 Arc sous tension continue

- La tension d'arc U_a est supérieure à la tension de réseau U_r au moment où le courant s'annule et la caractéristique de régénération U_d reste supérieure à U_r avec TTR (fig I.9 .a).

I.5.2 Arc sous tension alternative

- Quand la valeur instantanée de la tension du réseau est encore de même signe que la tension d'arc au moment du zéro de courant (fig I.9 .b).

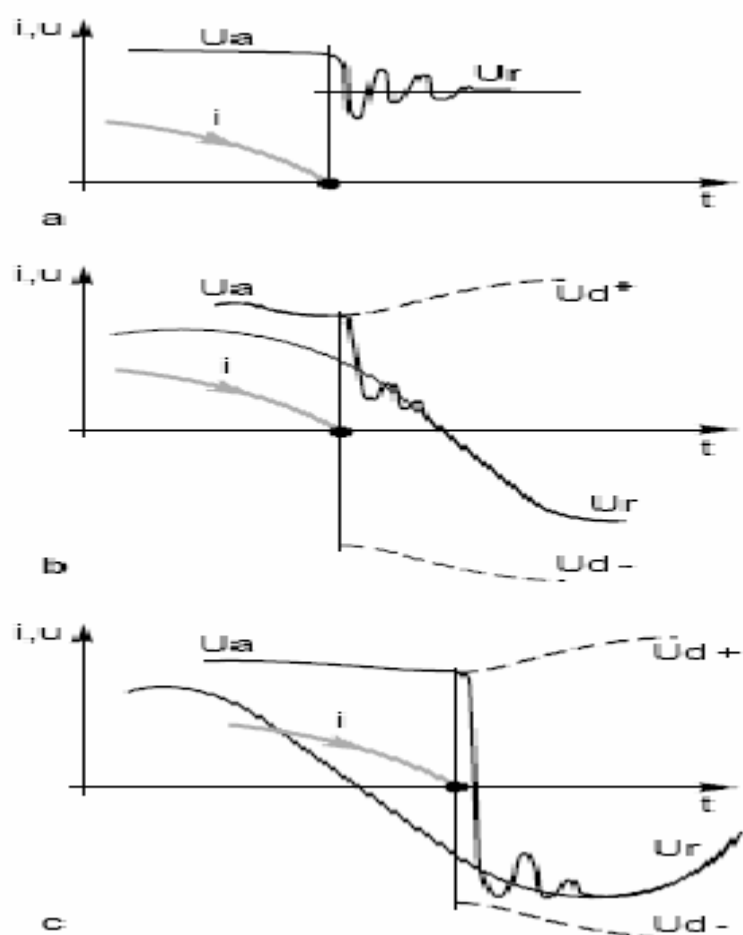
La condition de coupure définitive sera que l'évolution ultérieure de la tension réseau ne recoupe plus les caractéristiques de régénération, tant en valeurs positives que négatives.

- Quand la valeur instantanée de la tension du réseau est de signe opposé à la tension d'arc, mais de valeur absolue inférieure (fig I.9 .c).

L'extinction de l'arc est définitive si la TTR ne dépasse pas la caractéristique de régénération.

Dans le cas contraire, la TTR coupant la «courbe» de régénération, il peut s'en suivre l'apparition de courant post arc de type électroluminescent. Et alors :

- si le courant post arc reste de type grêle, des conditions d'extinction subsistent.
- si le courant post arc dépasse une valeur critique sous une tension également critique, il s'en suivra un redémarrage du courant d'arc et il faudra attendre un prochain «zéro» pour couper.



a : sous tension continue

b : sous tension alternative avec U_r de même signe que U_a à l'instant du zéro de courant,

c: sous tension alternative avec U_r de signe opposé à U_a .

Fig I.9: Schéma de l'arc en condition d'extinction

I. 6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les Propriétés physiques, électriques de l'arc électrique, les étudier Sous tension continue et alternative.

Et vue sont Comportement suivant l'aspect thermique et la nature du diélectrique.

Donc l'arc électrique reste un moyen très adapté à la coupure avec limitation des courants.

De plus il faut une importante amélioration liée aux évolutions des connaissances, des matériaux et à l'emploi de l'électronique.

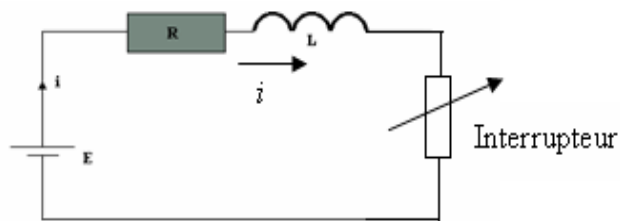
Aussi, la protection des circuits électriques nécessitera des disjoncteurs avec la «maîtrise de l'arc».

II-1 Généralités sur les phénomènes d'interruption des courant

Après avoir évoqué, un peu trop brièvement, deux types de problèmes fondamentaux qui ne sont pas propres à l'appareillage électrique, il nous reste à aborder le plus spécifique. Et sans doute aussi le plus difficile : l'interruption des courant électriques.

II.1.1 Interruption d'un courant continu

Examinons pour commencer le cas, apparemment le plus simple, d'un circuit inductif (R.L) alimenté en courant continu (**fig II.1**)



a) Schéma de circuit inductif

- Loi d'Ohm

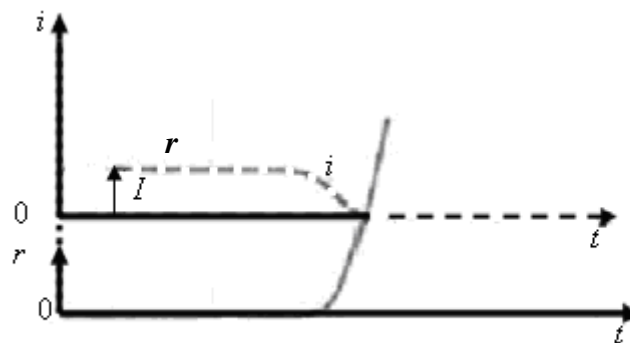
$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0 \quad (\text{II.1})$$

- Energie de coupure :

$$\int_0^r ri^2 dt = \int_0^r (E - Ri) i dt - \int_0^r Li \frac{di}{dt} \quad (\text{II.2})$$

- La première intégrale dépend du temps de coupure.
- La seconde intégrale représente l'énergie électromagnétique :

$$- \int_t^0 Li \frac{di}{dt} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{II.3})$$



b) variation des paramètres

Fig II.1 : Schéma d'interruption d'un courant continu

On constate que même si la coupure est infiniment rapide, on doit néanmoins dépenser dans l'interrupteur une énergie égale à l'énergie électromagnétique contenue initialement dans l'inductance du circuit.

Pour réaliser l'interruption du courant parcourant ce circuit, il faut et il suffit que la résistance r de l'interrupteur, supposée initialement nulle. Croisse et devienne infinie. Ou en d'autres termes que sa conductance diminue, puis s'annule. Lorsque cette condition unique est réalisée, l'appareil devenu isolant. N'est plus traversé par aucun courant.

- La loi de variation de la résistance de l'interrupteur peut à première vue Etre quelconque Toute fois.

Le raisonnement et le calcul montrent que l'énergie dépensée sous forme d'effet joule dans l'interrupteur au cours de la coupure est d'autant plus faible que la variation de la résistance de ce dernier est plus rapide. On a donc intérêt à agir dans ce sens.

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

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

- si, en effet la variation de résistance est infiniment rapide .celle du courant l'est également et, en conséquence .la force électromotrice induite (Ldi/dt) dans l'inductance propre du circuit devient infiniment grande. cette surtension illimitée est évidemment inadmissible.
- Dans la pratique, il faut donc se fixer une limite à ne pas dépasser pour la valeur de la surtension .une fois cette limite définie .la loi de variation de la résistance se trouve imposée et le problème est théoriquement résolu. l'énergie dépensée au cours de la coupure est alors supérieure à l'énergie électromagnétique du circuit, sans dépasser généralement le double de cette valeur.

II.1.2 Interruption d'un courant alternatif

L'interruption d'un courant alternatif. Dont les conséquences pratiques sont infiniment plus importantes.

Dans ce cas la condition nécessaire et suffisante de coupure est que l'impédance Z de l'interrupteur croisse et devienne infinie (**figII.2**).

Cette généralisation est cependant purement théorique. Car, pratiquement .on ne peut guère commander par variation d'inductance l ou de capacitance ($1/c$) (dans des conditions d'encombrement et de prix acceptables). Que de modiques puissances. Aucun espoir de progrès significatif ne se profile actuellement à l'horizon dans ces domaines Nous sommes donc confrontés à la nécessité d'emploi d'une résistance ce , dont la loi de variation va ne présenter tout la problème.

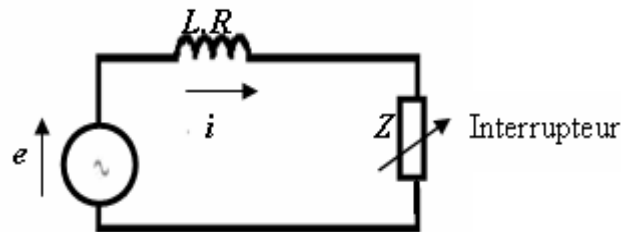


Fig II.2 : circuit alimenté en courant alternatif

Si nous ne prenons aucune précaution pour démarrer la variation de cette résistance. Elle pourra commencer à un instant quelconque de l'onde de courant. Son départ pourra donc, en l'absence des caprices du hasard, coïncider justement avec un maximum de l'intensité du courant (Courbe i_1 , **la figure II.3**). D'après ce que nous avons vu l'énergie de coupure atteindra alors sa valeur maximale. A l'inverse, Si la variation de résistance commence lorsque le courant est très faible (courbe i_2 , de **la figure II.3**). L'énergie de coupure pourra être très réduite.

On voit même. Tout naturellement. Apparaître une possibilité de coupure sans aucune dépense d'énergie, si la variation de résistance se produit à l'instant précis du passage à zéro du courant.

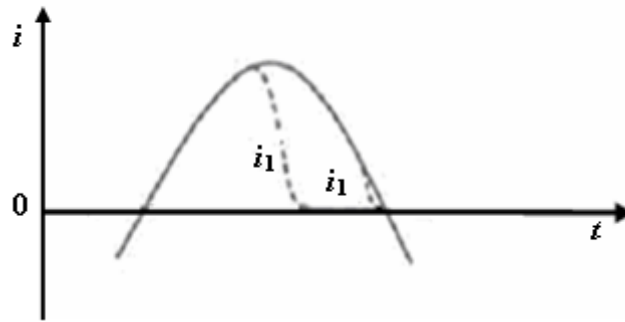


Fig II.3 : Analyse de l'importance de l'instant de la coupure dans l'interruption d'un circuit alimenté en courant alternatif

II.1.3 Tension de rétablissement

Pour découvrir cette seconde difficulté, transportons-nous après l'instant t_0 du zéro de courant .en supposant que la synchronisation ait été parfaite.

La résistance de l'interrupteur est donc maintenant présumée infinie et nous observons, à ses bornes, une tension variable u dénommée tension de rétablissement (**fig II.4**).

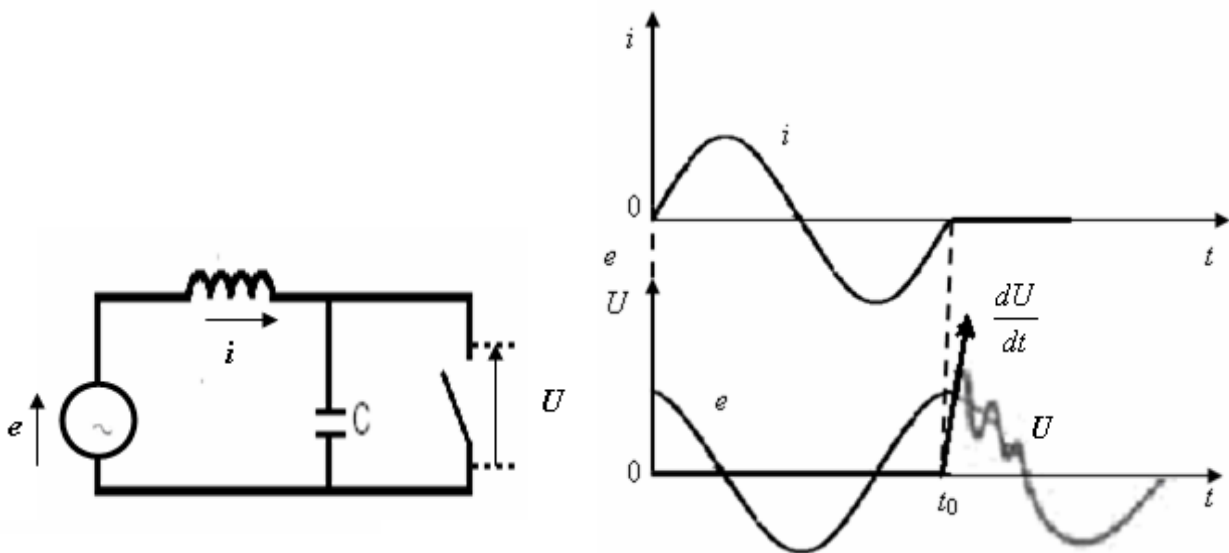


Fig II.4 : Tension transitoire de rétablissement

La fréquence propre d'oscillation du circuit est d'autant plus grande que la capacité C est plus faible, en l'absence d'amortissement :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\ell C}} \quad (\text{II.4})$$

La tension de rétablissement tend naturellement à rejoindre la force électromotrice e du générateur.

Or, à l'instant t_0 cette dernière sera justement maximale si le circuit est fortement inductif ($R \ll \omega L$) ce qui est un cas particulièrement digne d'intérêt puisqu'on le rencontre toujours lors de l'élimination des courts circuits.

La tension de rétablissement ne subira pas toute fois une discontinuité brutale, La présence en parallèle sur l'interrupteur des inévitables et salutaires capacités propres du circuit, soit C rend impossible une variation brutale de tension et l'on voit apparaître un régime transitoire assurant le raccordement entre la tension antérieurement nulle et le nouveau régime imposé par la source. La forme de ce régime transitoire dépend des caractéristiques des circuits et revêt une grande importance car c'est elle qui conditionne la vitesse d'application de la contrainte diélectrique aux bornes de l'appareil (du/dt).

Cette vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement si elle n'est pas infinie dans les conditions réelles, peut atteindre des valeurs considérables qui se chiffrent en kilovolts par microseconde (**figII.5**). Cela signifie que notre interrupteur idéal, encore conducteur à l'instant i_0 . Doit pouvoir supporter plusieurs kilovolts à ses bornes une micro seconde plus tard.

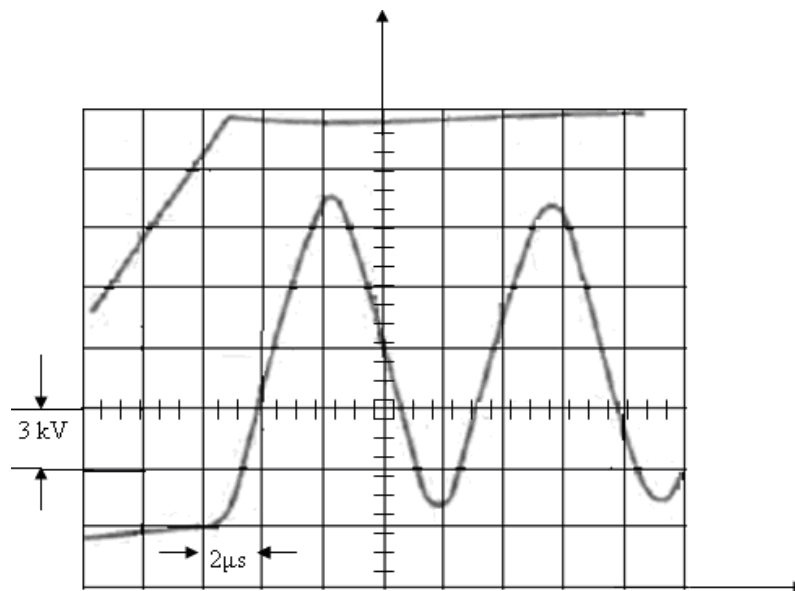


Fig II.5 : Exemple de tension transitoire de rétablissement relative à l'oscilloscope.

La vitesse initiale de croissance est supérieure à 6 kV/μs

II.2 Arc Inéluctable

II.2.1 Généralités

Si le fait de séparer les deux conducteurs suffisait pour faire disparaître brutalement le courant. Cela se traduirait par une valeur infinie de la vitesse de variation du courant di/dt . Celle-ci provoquerait, dans le circuit d'inductance propre L , une surtension $L di/dt$, elle-même infinie, entraînant immédiatement le claquage diélectrique de l'intervalle situé entre les contacts et l'amorçage d'un phénomène d'ionisation

Toute l'énergie électromagnétique encore contenue dans le circuit se concentrerait alors dans cette ionisation, provoquant instantanément les très hautes températures nécessaires à la création d'un arc électrique. Ainsi, lorsque l'on interrompt la continuité métallique d'un circuit électrique l'arc apparaît comme inéluctable. En réalité le courant ne apparaît pas brutalement comme nous l'avons supposé et l'arc prend naissance dès la séparation des deux conducteurs, sans qu'il apparaisse de surtension fâcheuse.

L'arc permet alors, tout en continuant d'assurer le passage du courant dans le circuit, d'éloigner les deux conducteurs l'un de l'autre à des vitesses raisonnables, jusqu'à une distance suffisante pour que une fois la coupure terminée l'appareil résiste diélectriquement à la tension appliquée à ses bornes. L'arc évite en outre la libération prématurée de l'énergie électromagnétique tant que le courant est encore importante.

Ces avantages sont considérables, mais supposant que la coupure se trouve confiée à l'arc lui-même.

Ce sont les étonnantes caractéristiques électrothermiques de l'arc qui vont lui permettre de s'acquitter de ce rôle en lui conférant automatiquement, un comportement voisin de celui de l'interrupteur idéal.

En effet l'arc possède au plus haut point une inégalable aptitude à passer rapidement, et au bon moment de l'état conducteur à l'état isolant.

II.2.2 Ionisation

L'état conducteur de l'arc résulte de l'ionisation, qui consiste en l'expulsion d'un ou plusieurs électrons appartenant au cortège électronique des atomes d'un gaz porté à une grande température.

Les électrons ainsi libérés véhiculent le courant dans l'arc et entretiennent le mécanisme d'ionisation.

Les ions positif, formés par les atomes ionisés, contribuent eux aussi au transport du courant dans la colonne d'arc, mais à un degré bien moindre que les électrons dont la mobilité est très supérieure du fait de l'énorme rapport des masses.

La chute de tension dans l'arc permet d'apporter sous forme d'effet joule l'énergie nécessaire à l'entretien des très hautes températures exigées pour son fonctionnement. En équilibrant ses pertes par conduction, convection et rayonnement.

Proportionnelles au périmètre de cette section, ne double pas ; par conséquent, la chute de tension diminue.

Ainsi, tant que le courant est important, c'est-à-dire pendant la pleine demi onde qui précède un passage à zéro du courant, la résistance demeure faible. Puis, lorsque le courant décroît et s'approche de zéro, la résistance d'arc augmente automatiquement, d'autant plus vite, d'ailleurs, que le courant est plus faible.

L'énergie dépensée, si elle n'est pas nulle, demeure d'autant plus faible que la tension d'arc est elle-même plus réduite.

II.2.3 Caractéristique d'arc

Nous savons que, si l'on porte sur un diagramme la chute de tension u dans un arc en fonction du courant, qui le traverse (supposé stabilisé ou lentement variable). On obtient une caractéristique statique qui dépend de tous les paramètres déterminant le fonctionnement de l'arc en question :

- Nature et forme des électrodes.
- Nature et pression du gaz plasmagène dans le quel l'arc se développe.
- Conditions de fonctionnement auxquelles est soumis cet arc (soufflage, turbulence, déplacement sous l'effet de champs magnétiques, etc.).
- Longueur de l'arc, etc...

La caractéristique statique présente généralement une allure hyperbolique. La tension passant parfois par un minimum puis croissent ensuite légèrement en fonction de courant (**figII.6**).

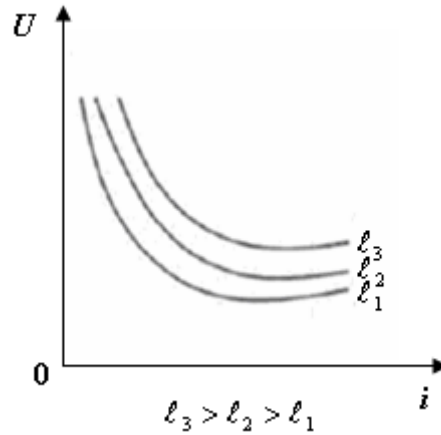


Fig II.6 : Caractéristiques d'arc pour trois longueurs différentes d'arc

Si l'on ne fait varier que la longueur l de l'arc. On obtient toute une famille de caractéristiques, chacune d'elles correspondant à une longueur donnée.

Pour un arc libre brûlant dans l'air à la pression atmosphérique. Herta Ayrton a proposé à la fin du XIX^e siècle, une formule empirique célèbre donnant grossièrement la chute de tension U en fonction du courant i et la longueur l de l'arc :

$$U = A + B\ell + \frac{C + D\ell}{i} - U_0 + \frac{P_0}{i} \quad (\text{II.5})$$

Dans une représentation hyperbolique de la caractéristique U , U_0 constitue le seuil de tension d'arc et P_0 la puissance constante de la puissance de refroidissement.

Cette formule est acceptable dans une plage de courant limitée à quelques centaines d'ampères.

II.2.4 Surtension de coupure

Une coupure trop rapide entraînait automatiquement une surtension ($L di/dt$) qui risquait d'être dangereuse pour le matériel et le personnel.

Dans la pratique, on s'efforce de provoquer au début de la coupure, un allongement aussi rapide que possible de l'arc. Tant que cette longueur est insuffisante, La caractéristique statique coupe la droite ($E - Ri$).

Lorsque la longueur d'arc est devenue suffisante pour autoriser la coupure, on maintient constante cette longueur d'arc pour limiter la surtension (**figII.7**). On constate en effet que pour une large plage de valeurs du courant et pour une longueur d'arc donnée (**fig.II.8**). la tension d'arc reste sensiblement constante (voisine de U_0). Sauf lorsque le courant devient très faible.

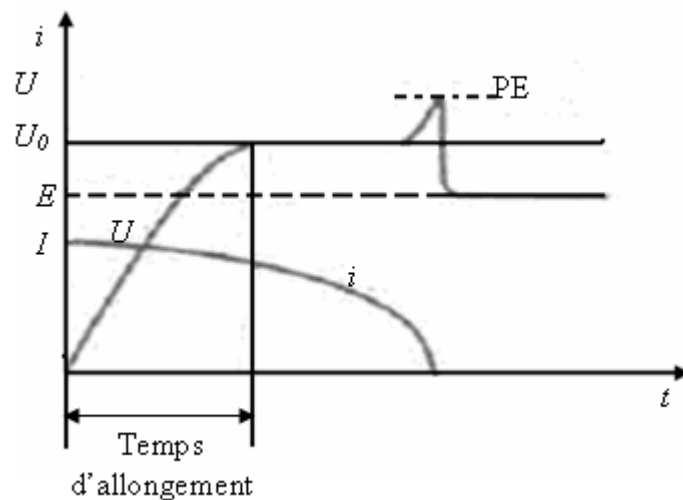


Fig II.7: coupure avec allongement de l'arc

Au début de la coupure, on provoque un allongement rapide de l'arc jusqu'à une longueur telle que la tension d'arc atteigne U_0 légèrement supérieur à E . Cette longueur autorise la coupure sans entraîner de surtension excessive. Une légère surtension dite poste d'extinction (PE) apparaît lorsque le courant approche de zéro.

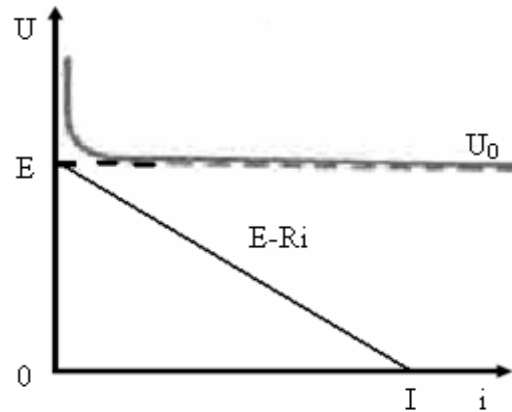


Fig II.8: Caractéristique statique d'un arc de forte puissance

Pour les valeurs élevées du courant, la tension d'arc reste sensiblement constante et égale à U_0 , ce n'est qu'au-dessous d'une centaine d'ampère, dans l'air à la pression atmosphérique, par exemple, que la caractéristique présente une forme hyperbolique.

Peu avant l'annulation du courant, on observe effectivement une surtension dénommée pointe d'extinction, dont la valeur est d'autant plus grande que l'allongement de l'arc et plus important (**figII.9**).

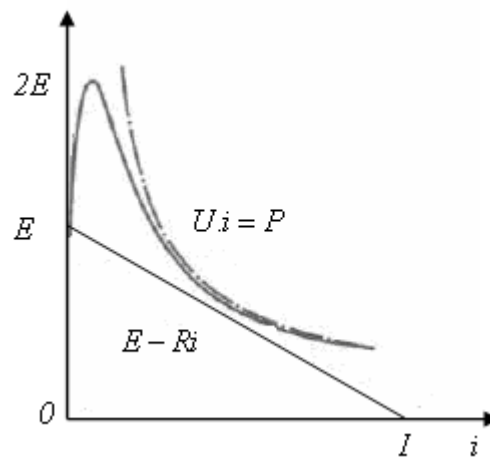


Fig II.9 : Coupure en courant continu

II.3 Comparaison entre les coupure en courant continu et en courant alternatif

En courant alternatif .La tension du générateur s'inversant à chaque alternance, le courant passe naturellement par zéro, tension d'arc (**figII.10.b**)

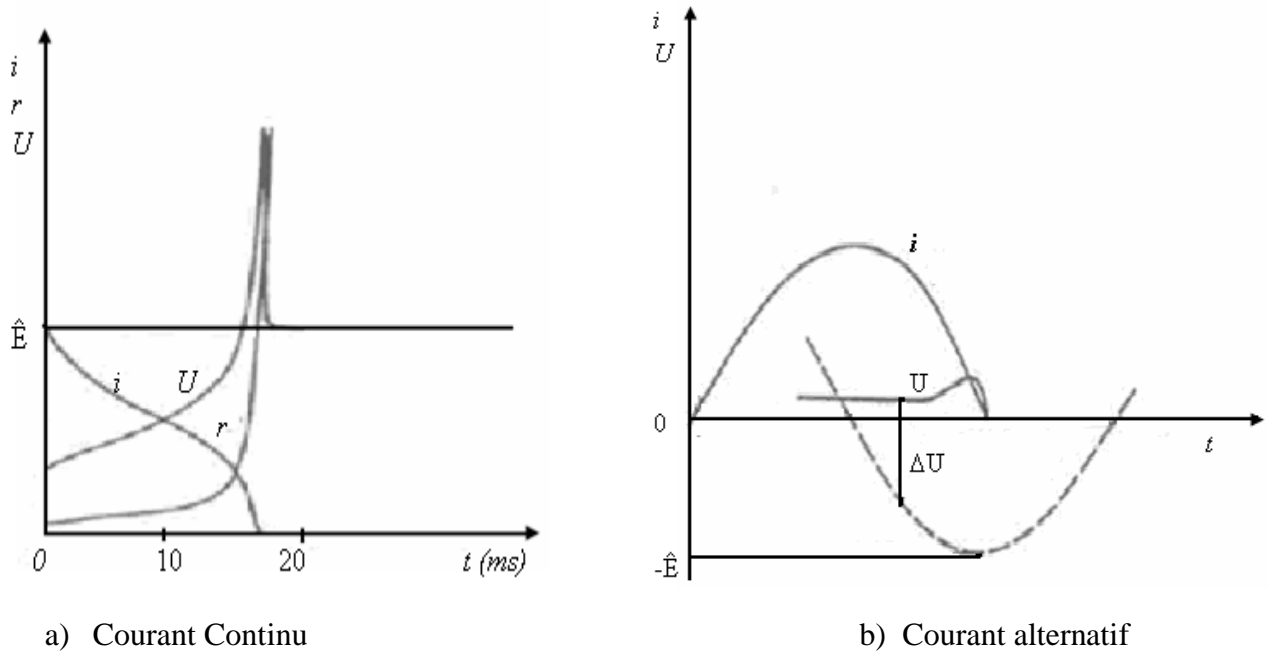


Fig II.10: Comparaison entre les coupure en courant continu et en courant alternatif : évolution des grandeurs en fonction du temps jusqu' à l'annulation du courant.

II.4 Conclusion

Pour terminer cette comparaison entre coupures en courant continu et en courant alternatif on peut dire que en courant alternatif HT l'essentiel de l'interruption se joue après le passage par zéro du courant alors que en courant continu tout se joue avant ce passage par zéro.

Par conséquent les moyens les mieux adaptés à l'interruption de ces deux types de courants sont inévitablement fort différents.

- En courant continu
 - Une faible constante de temps d'arc apportait plus d'inconvénients que d'avantages l'air atmosphère constitue en fait le milieu d'extinction le mieux adapté tout au moins pour les tensions inférieure ou égales à 1500V
 - Un allongement important de l'arc est absolument nécessaire pour développer une tension d'arc supérieure à celle de la source.
 - L'énergie de coupure étant toujours élevée.
 - Les chambres de coupure doivent être dimensionnées en conséquence ; elles sont inévitablement volumineuses.

- En courant alternatif
 - La puissance de refroidissement et l'énergie de coupure sont d'autant plus faibles que la constante de temps d'arc est plus petite.
 - On utilise des milieux d'extinction à constante de temps aussi réduite que possible (par exemple le SF₆ et le vide). Ce qui permet de réaliser des appareils de coupure extrêmement compacts.

III .1 Généralités

Le disjoncteur est un appareil électromagnétique capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans des conditions normales, mais surtout dans celles dites "anormales", c'est-à-dire :

- court-circuit.
- surcharge.

III .2 Définition des courants à couper

▪ Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit de nature instantanée est une surintensité produite par un défaut d'impédance dont la valeur devient négligeable entre deux points du même circuit.

Les courts-circuits ont des causes multiples, ils peuvent être :

- ✓ d'origine purement électrique : ils proviennent a lors de l'altération d'un isolant in capable de tenir la tension.
- ✓ d'origine mécanique : ils sont dus dans ces conditions à une rupture de conducteur ou d'isolateur, à la chute d'un corps étranger tel que un e branche d'arbre sur une ligne aérienne , à un coup de pioche dans un câble souterrain ,etc ...
- ✓ d'origine atmosphérique : ils sont alors causés, soit par la foudre qui frappe les conducteur d'un ligne ou d'un poste, ou qui tombe dans leur voisinage immédiate soit par la tempête, le brouillard, le givre qui produisent un effet mécanique (tels que des rapprochements de conducteurs) ou électrique (altération des surface d'isolateur) etc...
- ✓ consécutive a une régime transitoire qui entraîne des surtension élevées et provoque le claquage d'isolant .en général les surtension dues aux régimes transitoires n'excédant par 3 fois la tension normale et ne sont guère dangereuses .

Toutefois certaines phénomène complexes peuvent produire des surtensions beaucoup plus importantes.

- ✓ soit enfin dus à des fausses manœuvres (par exemple l'ouverture en charge d'un sectionneur).

En général, la présence d'un court-circuit sur un réseau provoque de la surintensité, des chutes de tensions et des déséquilibres dont les tensions et les courants des trois phases. Ces phénomènes, dont l'importance dépend de la constitution du réseau de la nature du défaut (entre une phase et la terre, triphasé, etc.....) et de l'emplacement de celui-ci, entraîne toute une série, de conséquences qui sont :

- ✓ augmentation du courant : le courant de court-circuit conduit à une augmentation du courant dans tout les éléments du réseau elle est ressentie essentiellement par les éléments les plus proches de défaut. l'augmentation de ces courants de court circuit à des effets négatifs sur la durée de vie des éléments du réseau qui se traduisent par des efforts électrodynamiques entre les conducteurs.

- ✓ chutes de tension élevées : les courants de court circuit en traversant les différents éléments de réseau provoquent des chutes de tension qui risquent de causer le décrochage des machines synchrones ou asynchrones et de porter atteinte, à la stabilité des réseaux.

Les courants de court circuit sont calculés afin de déterminer:

- ✓ Les pouvoirs de coupure et de fermeture des disjoncteurs à installer.
- ✓ La tenue électrodynamique.
- ✓ La tenue thermique.
- ✓ Le réglage (mini – max) des relais de protection.

Les courants de court circuit dépendent de l'impédance totale du circuit qui à son tour dépend de l'éloignement du point de court circuit.

Généralement dans les réseaux électriques de tension supérieure à 1000V on ne tient pas compte de la résistance des circuits car elle est relativement faible.

Pour le calcul du courant de court circuit on opère le système avec des unités relatives qui sont le plus souvent utilisées.

▪ Courant de surcharge

Le courant de surcharge est une surintensité de nature progressive qui se produit dans un circuit sain suite à une augmentation de la charge.

Les dispositifs de détection réservés à cette perturbation sont :

- Relais thermiques.
- Fusibles.

Les causes susceptibles de produire un courant de surcharge sont :

- ✓ Appareil utilisé au-delà de sa puissance nominale (volontaire ou accidentelle).
- ✓ Mauvais fonctionnement.

Les conséquences occasionnées par un courant de surcharge sont :

- ✓ Surintensité.
- ✓ Echauffement.
- ✓ Déséquilibre.
- ✓ Chute de fréquence.

III. 3 Etude de Courant de court-circuit

Toute installation électrique doit être protégée contre les courts-circuits et ceci, sauf exception, chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique, ce qui correspond le plus généralement à un changement de section des conducteurs. L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation ; ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou couper ce courant de défaut.

Pour choisir et régler convenablement les protections, on utilise les courbes du courant en fonction du temps.

Deux valeurs du courant de court-circuit doivent être connues :

- Le courant maximal de court-circuit qui détermine :
 - Le pouvoir de coupure -PdC- des disjoncteurs,
 - Le pouvoir de fermeture des appareils,
 - La tenue électrodynamique des canalisations et de l'appareillage.

Il correspond à un court-circuit à proximité immédiate des bornes aval de l'organe de protection. Il doit être calculé avec une bonne précision (marge de sécurité).

- Le courant minimal de court-circuit indispensable au choix de la courbe de déclenchement des disjoncteurs et des fusibles, en particulier quand :
 - La longueur des câbles est importante et/ou que la source est relativement impédante (Générateurs onduleurs) ;
 - La protection des personnes repose sur le fonctionnement des disjoncteurs ou des fusibles, c'est essentiellement le cas avec les schémas de liaison à la terre du neutre.

Pour mémoire, le courant de court-circuit minimal correspond à un défaut de court-circuit à l'extrémité de la liaison protégée lors d'un défaut biphasé et dans les conditions d'exploitation les moins sévères (défaut à l'extrémité d'un départ et non pas juste derrière la protection, un seul transformateur en service alors que deux sont couplables...).

Dans tous les cas, quel que soit le courant de court-circuit (du minimal au maximal), la protection doit éliminer le court-circuit dans un temps (t_c) compatible avec la contrainte thermique que peut supporter le câble protégé :

$$i^2 \cdot dt \leq k^2 \cdot S^2 \quad (\text{III.1})$$

Où S est la section des conducteurs, et k une constante calculée à partir de différents facteurs de correction fonction du mode de pose, de circuits contiguës, nature du sol...

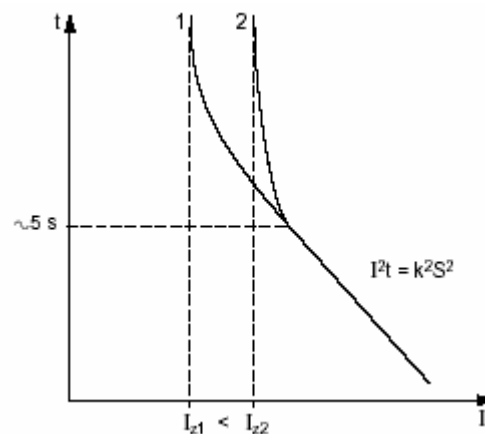


Fig III.1 : Caractéristiques thermique d'un conducteur en fonction de la température

1 et 2 représentent la valeur efficace du courant dans le conducteur à des températures différentes θ_1 et θ_2 , avec $\theta_1 > \theta_2$; I_z étant la limite du courant admissible en régime permanent.

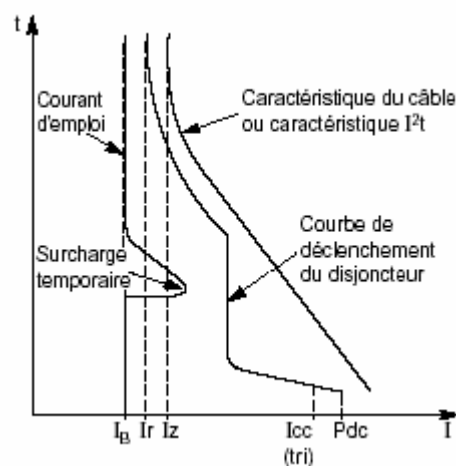


Fig III.2: Protection d'un circuit par disjoncteur

III .4 Pouvoir de coupure

C'est l'intensité maximale du courant de court-circuit que peut couper le dispositif de protection sans se détériorer et sans mettre en danger l'entourage, dans les conditions de tension, de $\cos\phi$ et de court-circuit déterminées par les normes.

Le pouvoir de coupure doit être au moins égal au courant de court-circuit présumé au point d'installation du disjoncteur ($P_{dc} > I_{cc} \text{ max}$). Il s'exprime en KA efficace

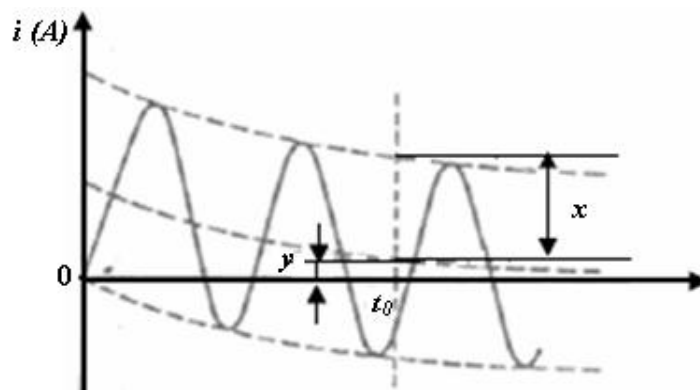
III .4.1 Pouvoir de coupure en court-circuit

Le pouvoir de coupure d'un appareil définit la valeur efficace du courant présumé qu'il est capable d'interrompre dans des conditions d'emploi prescrites .parmi ces conditions .celle qui a le plus d'influence est la tension de rétablissement.

III .4.2 Pouvoir de coupure assigné en court –circuit

Le Pouvoir de coupure assigné en court –circuit est le courant le plus élevé qu'un appareil peut couper sous sa tension assignée,dans un circuit dont la tension transitoire de rétablissement répond à une spécification précise. Sa valeur efficace s'exprime en ampères ou en kilo ampère.

L'appareil doit pouvoir couper. Sous sa tension assignée. Tout les courant inférieurs à son pouvoir de coupure que le régime du courant de court-circuit soit symétrique ou asymétrique (fig III.3)



- x : Composante périodique.
- y : Composante apériodique.
- t_0 : instant de séparation des contacts.

Fig III.3 : Analyse de la forme d'un courant comportant une composante apériodique

Dans ce dernier cas la composante apériodique peut prendre toutes les valeurs inférieures ou égales, à une valeur spécifiée, correspondant à l'asymétrie maximale et fonction de la durée d'ouverture de l'appareil .plus le disjoncteur est rapide ,plus la composante apériodique maximale est importante.

III.4.3 Vérification du fonctionnement en court-circuit

Un disjoncteur doit pouvoir établir et couper tous courant égale ou inférieur à son pouvoir de coupure .comme il ne peut être question de faire cette vérification pour toute les valeurs de courant et toutes les conditions de fonctionnement,on a défini certaines valeurs de courant pour les quelles on l'effectue,les conditions de fonctionnement étant chaque fois bien spécifiées,suivant des séquences assignées ;ces valeurs sont : 10%, 30%, 60% et 100% du pouvoir de coupure.

Par ailleurs, certains disjoncteurs présentent un courant critique, c'est-à-dire un courant pour lequel la durée de l'arc est la plus grande.

C'est souvent le cas des disjoncteurs à auto soufflage de l'arc .lorsque le courant critique est inférieur à10% du pouvoir de coupure, on vérifie la coupure entre 4 et 6% et entre 2 et 3% du pouvoir de coupure assigné en court circuit.

III.5 Les principaux défauts de court-circuit

Dans les installations électriques différents courts-circuits peuvent se produire.

III.5.1 Caractéristiques des courts-circuits

Ils sont principalement caractérisés par :

- leurs durées : auto-extincteur, fugitif ou permanent ;
 - leurs origines :
 - Mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux),
 - Surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique,
 - Ou à la suite d'une dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive ;
 - leurs localisations : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique.
- Outre ces caractéristiques, les courts-circuits peuvent être :
- Monophasés : 80 % des cas ;
 - Biphasés : 15 % des cas. Ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés ;
 - Triphasés : 5 % seulement dès l'origine.

Ces différents courants de court-circuit sont présentés sur la **figure III.4**

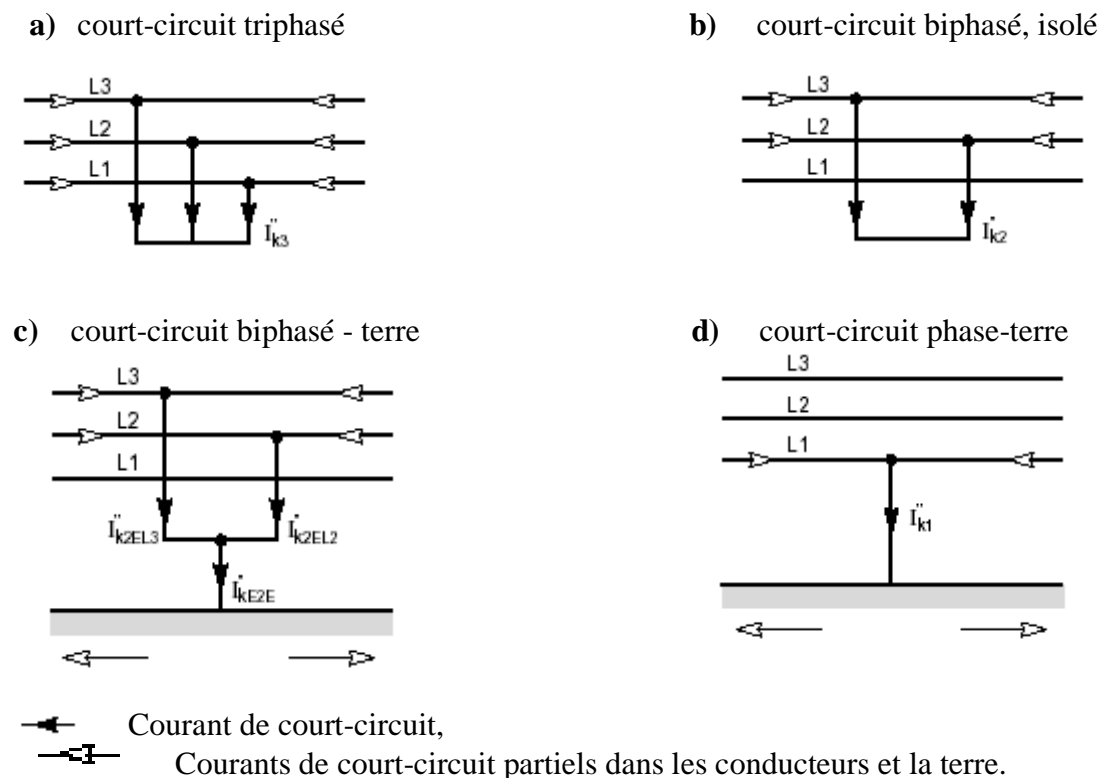


Fig III.4 : Analyse des différents courants de courts-circuits

III.6 Méthodes de calcul des courants de court-circuit

Il existe plusieurs méthodes de calcul des courants de court-circuit. Parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode des impédances.
- Méthodes des composantes symétriques.
- Méthode de composition.

III.6.1 Méthode des impédances

L'une dont l'usage est surtout réservé aux réseaux BT, il s'agit de la méthode des impédances. Elle a été retenue pour la précision qu'elle permet d'obtenir, et pour son aspect didactique puisqu'elle nécessite la prise en compte de la quasi-totalité des caractéristiques du circuit concerné.

III.6.1.1 Les différents types de court-circuit

a) Court-circuit triphasé

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée. L'intensité I_{cc3} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé:



$$I_{cc3} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_{cc}} \quad (\text{III.2})$$

b) Court-circuit biphasé isolé

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée. L'intensité I_{cc2} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé:



$$I_{cc2} = \frac{U}{2Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{cc3} \approx 0.86 i_{cc3} \quad (\text{III.3})$$

c) Court-circuit monophasé isolé

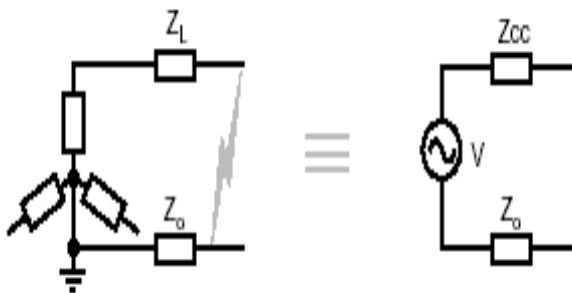
Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, alimenté sous une tension simple $V=U/\sqrt{3}$. L'intensité I_{cc1} débitée est alors :



$$I_{cc1} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_{cc} + Z_{Ln})} \quad (\text{III.4})$$

d) Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé)

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire Z_0 .



$$I_{cc0} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_{cc} + Z_0)} \quad (\text{III.5})$$

III.6.2 Méthode des composantes symétriques

La définition des composantes symétriques repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, inverse et homopolaire.

Le principe de superposition est alors exploitable pour le calcul des courants de défaut.

Pour l'explication suivante, le système est défini en prenant le courant I_1 comme référence de rotation, avec :

- I_{1d} comme sa composante direct.
- I_{1i} comme sa composante inverse.
- I_{10} comme sa composante homopolaire.

Et on utilisant opérateur « a » :

« a » est un opérateur vectoriel qui consiste à faire tourner de $+2\pi/3$

$$a = e^{j2\pi/3} = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ entre } \vec{I}_1 ; \vec{I}_2 ; \vec{I}_3 \implies a^2 = e^{j4\pi/3} = \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

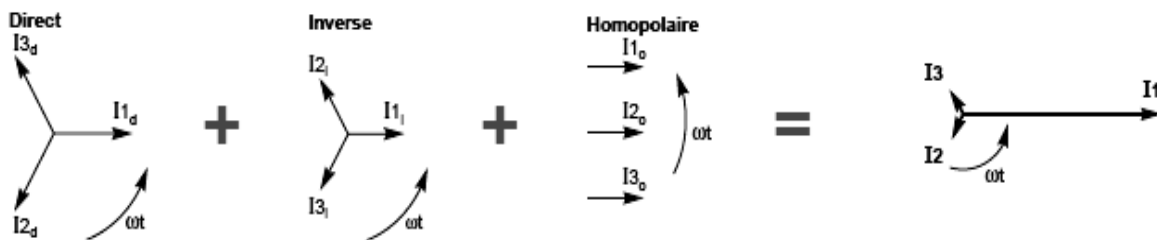
Les courants I_1, I_2, I_3 sont :

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_d + \vec{I}_i + \vec{I}_o \tag{III.6}$$

$$\vec{I}_2 = a^2 \cdot \vec{I}_d + a \cdot \vec{I}_i + \vec{I}_o \tag{III.7}$$

$$\vec{I}_3 = a \cdot \vec{I}_d + a^2 \cdot \vec{I}_i + \vec{I}_o \tag{III.8}$$

Ce principe appliqué à un système de courants se vérifie par construction graphique comme le montre dans cette figure :



Construction géométrique de I_1

Construction géométrique de I_2

Construction géométrique de I_3

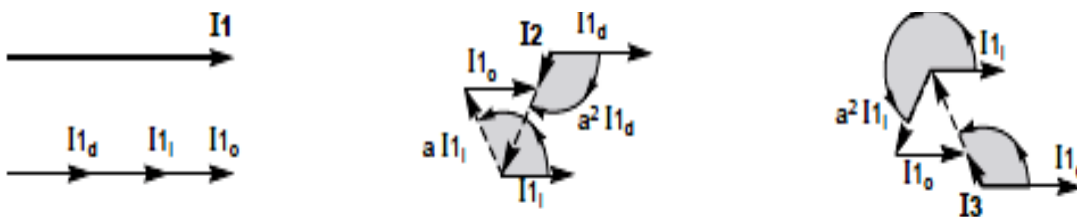


Fig III.5 : composantes symétriques

III.7 Formulaire récapitulatif

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

Type de court circuit	Les courants de court circuit
Court-circuit monophasé	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z } \quad (\text{III.9})$
Court-circuit biphasé terre	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d \times Z_i (Z_d + Z_i)(Z_0 + 3Z) } \quad (\text{III.10})$
Court-circuit biphasé isolé	$I_{cc} = \frac{V\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_0 } \quad (\text{III.11})$
Court-circuit triphasé	$I_{cc} = \frac{V}{Z_d} \quad (\text{III.12})$

Tableau III.1 : les courant en module dans différent dissymétrie

- U: tension efficace composée du réseau triphasé.
- $V=U/\sqrt{3}$: tension efficace simple du réseau triphasé
- I_{cc} : courant de court-circuit en module.
- I_{terre} : courant de défaut à la terre en module.
- Z_d : impédance direct, Z_i : impédance inverse, Z_0 : impédance homopolaire.
- Z : impédance de terre.

III.8 Démonstration du courant de choc

La majorité du réseau électrique est caractérisé par un circuit simple symétrique par impédance active, inductive dans la représentation et la suivante :

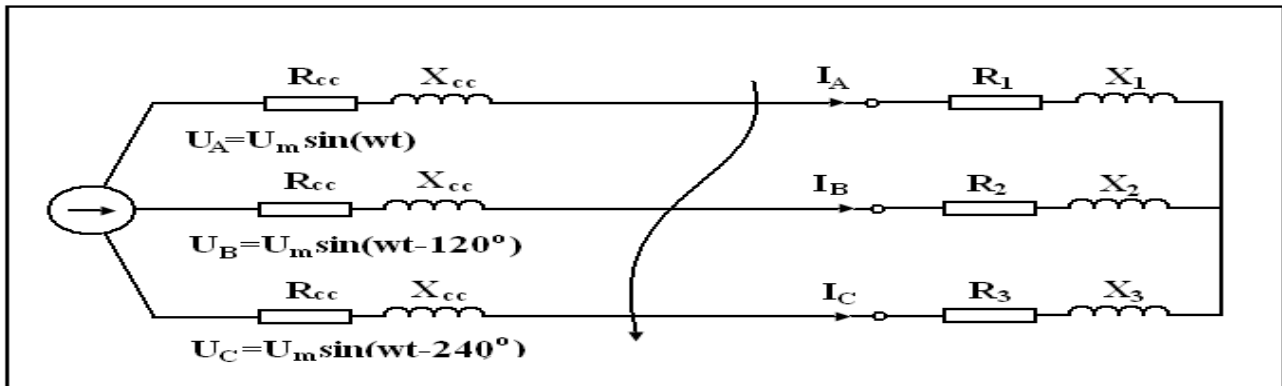


Fig III.6: Analyse du circuit triphasé symétrique alimenté par une source infiniment puissante

- Le défaut partagé le circuit en deux parties indépendantes.
 - La partie droite : avec la résistance r_1 et la réactance $x_1 = \omega L_1$.
 - La partie gauche : contenant résistance r_{cc} et la réactance $x_{cc} = \omega L_{cc}$.

Dans la partie gauche (partie de défaut) il y a deux composantes :

- Composante due à la source : appelé composante forcé.
- Composante due au magnétisme de l'énergie magnétique : appelé composante libre.

D'après le circuit précédent on a l'équation suivante :

$$U - i.R_{cc} - L_{cc} \frac{di}{dt} = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$\Rightarrow U = i.R_{cc} + L_{cc} \frac{di}{dt} \quad (\text{III.14})$$

La solution de cette équation :

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_l + \mathbf{i}_f \quad (\text{III.15})$$

\mathbf{i}_l : La composante libre.

\mathbf{i}_f : La composante forcée.

- La composante libre :

$$i_1 \cdot R_{cc} + L_{cc} \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (\text{III.16})$$

$$\Rightarrow L_{cc} \frac{di_1}{dt} = -R_{cc} \cdot i_1 \quad (\text{III.17})$$

$$\Rightarrow \frac{di_1}{i_1} = -\frac{R_{cc}}{L_{cc}} dt \quad (\text{III.18})$$

$$\Rightarrow \int \frac{di_1}{i_1} = \int -\frac{R_{cc}}{L_{cc}} dt \quad (\text{III.19})$$

$$\ln i_1 = -\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t + \ln A \quad (\text{III.20})$$

$$\Rightarrow \ln i_1 - \ln A = -\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t \quad (\text{III.21})$$

$$\Rightarrow \ln \frac{i_1}{A} = -\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t \quad \Rightarrow \frac{i_1}{A} = e^{-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t} \quad (\text{III.22})$$

$$\Rightarrow i_1 = A e^{-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t} \quad (\text{III.23})$$

Donc :

$$\Rightarrow i_1 = i_{at} = A e^{-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t} \quad (\text{III.24})$$

$$t=0 \quad \Rightarrow A = i_{a0} \quad (\text{III.25})$$

$$\Rightarrow i_{at} = i_{a0} e^{-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t} \quad (\text{III.26})$$

$$T_a = \frac{L_{cc}}{R_{cc}} \quad (\text{III.27})$$

T_a : C'est la constante du temps de défaut.

$$\Rightarrow i_{at} = i_{a0} = e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (\text{III.28})$$

- La composante forcée :

$$i_{pt} = i_f \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) \quad (\text{III.29})$$

$$i_f = \text{const}$$

$$U = i_f \cdot R_{cc} + L_{cc} \frac{di_f}{dt} \quad (\text{III.30})$$

$$U = i_f \cdot R_{cc} \quad \Rightarrow i_f = \frac{U}{R_{cc}} \quad (\text{III.31})$$

$$\Rightarrow i_{pt} = \frac{U_m}{R_{cc}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) \quad (\text{III.32})$$

$$\Rightarrow I_{mp} = \frac{U_m}{R_{cc}} \quad (\text{III.33})$$

I_{mp} : L'amplitude de la composante périodique du courant de court circuit.

$$\Rightarrow i_{pt} = I_{mp} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) \quad (\text{III.34})$$

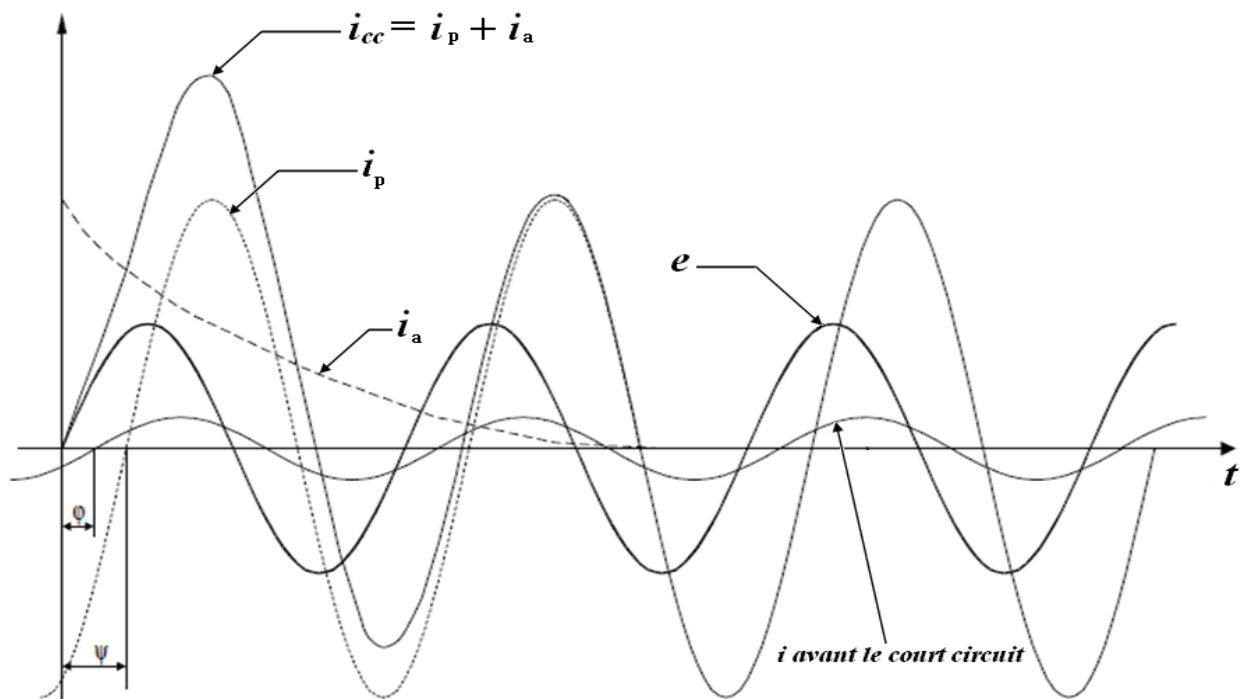


Fig III.7 : Analyse de courant de court circuit est asymétrique

$$i_{cct} = i_{at} + I_{pt} \quad (\text{III.35})$$

$$\Rightarrow i_{cct} = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}} + I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) \quad (\text{III.36})$$

$$t=0 \quad \Rightarrow i_{cc0} = i_{a0} + I_{p0} \quad (\text{III.37})$$

$$\Rightarrow i_{a0} = i_{cc0} - I_{p0} \quad (\text{III.38})$$

Pour : $\varphi_{cc} \geq R_{cc}$, $\varphi_{cc} = 45^\circ \div 90^\circ$

$\varphi_{cc} = 90^\circ$: La dissymétrie est maximale.

$$\Rightarrow i_{p0} = I_{pm}$$

Donc :

$$i_{dysmax} = I_{pm} e^{-\frac{t}{T_a}} + I_{pm} = i_{choc} \quad (\text{III.39})$$

La valeur maximale instantanée de courant dissymétrique arrivé de 0.01s après le court circuit brusque.

$$\Rightarrow i_{dysmax} = i_{choc} = I_{pm} (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}) \quad (\text{III.40})$$

III.8.1 Démonstration de coefficient de choc (K_{choc})

$$i_{choc} = I_{pm} (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}) = I_{pm} \cdot K_{choc} \quad (\text{III.41})$$

$$K_{choc} = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}} \quad (\text{III.42})$$

$$T_a = \frac{X}{R_\omega} \quad (\text{III.43})$$

-Le réseau est purement actif : $X = 0 \Rightarrow T_a = 0$

$$T_a = 0 \Rightarrow K_{choc} = 1 + e^{-\infty} = 1 + 0 = 1 \quad (\text{III.44})$$

$$\Rightarrow K_{choc} = 1$$

-Le réseau est purement résistif : $R_\omega = 0 \Rightarrow T_a = \infty$

$$T_a = \infty \Rightarrow K_{choc} = 1 + e^0 = 1 + 1 = 2 \quad (\text{III.45})$$

$$K_{choc} = 2$$

Le coefficient de choc varie entre 1 et 2 :

$$K_{choc} = [1, 2]$$



Fig III.8 : Plage du coefficient de choc

III.9 Conclusion

Pour le calcul du courant de court-circuit, différentes méthodes ont été développées :

1) composantes symétriques qui particulièrement utile lorsqu'un réseau triphasé est déséquilibré, il permet de déterminer le pouvoir de coupure du disjoncteur .Aussi, ce calcul est nécessaire quand :

- Un système de tensions et courants est non symétrique (vecteurs de Fresnel de modules différents et de déphasages différents de 120°)

C'est le cas lors d'un court-circuit monophasé (phase-terre), biphasé et biphasé-terre.

- Le réseau comporte des machines tournantes et/ou des transformateurs spéciaux.

2) impédances qui permet d'obtenir une bonne précision elle consiste a recenser toutes les impédances se trouvant sur le parcours du courant de court circuit et facilitent la détermination des impédances du réseau de distribution a partir de sa puissance de court circuit et celles des transformateurs a partir de leur puissance apparente.

Ces méthodes ont été conçues de telle sorte que le courant de court circuit puisse être calculé à la main ou à l'aide des logiciels

Tous ces logiciels servent essentiellement à :

- déterminer des pouvoirs de coupure et de fermeture des appareils ainsi que les tenues électromécanique et thermique des équipements,
- calculer les réglages des relais de protection et les calibres des fusibles, afin d'assurer une bonne sélectivité dans le réseau électrique

IV.1 Introduction

Un courant de courts circuits est une mise en relation de deux points à des potentiels électriques différents. Le courant de court circuit peut être entre phase et neutre ou entre phase et masse conductrice.

Un court circuit se traduit par une augmentation brutale du courant qui peut atteindre en quelques millisecondes une valeur égale à plusieurs fois le courant nominal.

- On distingue trois niveaux de courant de court circuit :
 - Le courant de court circuit crête (I_{cc} crête).
 - Le courant de court circuit minimum (I_{cc} min).
 - Le courant de court circuit efficace (I_{cc} eff).

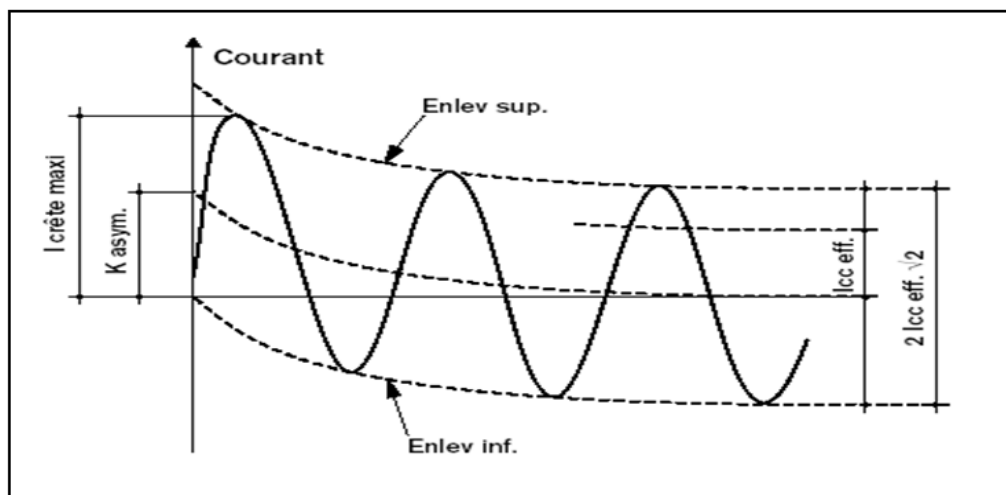


Fig IV.1 : Analyse des différents courants de court circuit

La figure suivante montre l'approche qui conduit aux différents courants de court circuit et les paramètres qui en résultent pour les différents dispositifs de protection.

IV.2 Intérêt du calcul du courant de court-circuit

Il est impératif de connaître la valeur du courant de court-circuit I_{cc} à tous les endroits d'une installation, où l'on veut placer un dispositif de protection (fusible ou disjoncteur). Il faut en effet s'assurer que le pouvoir de coupure du fusible ou du disjoncteur est bien supérieur au courant de court-circuit à cet endroit.

En fait deux valeurs du courant de court-circuit doivent être déterminées :

La valeur maximale définit: le pouvoir de coupure nécessaire du fusible ou du disjoncteur chargé de la protection à cet endroit.

La valeur minimale définit: le choix de la courbe de déclenchement du disjoncteur ou du fusible, assurant la sélectivité

IV.3 Exemple de Calcul du courant de court circuit

Schéma de principe du circuit électrique

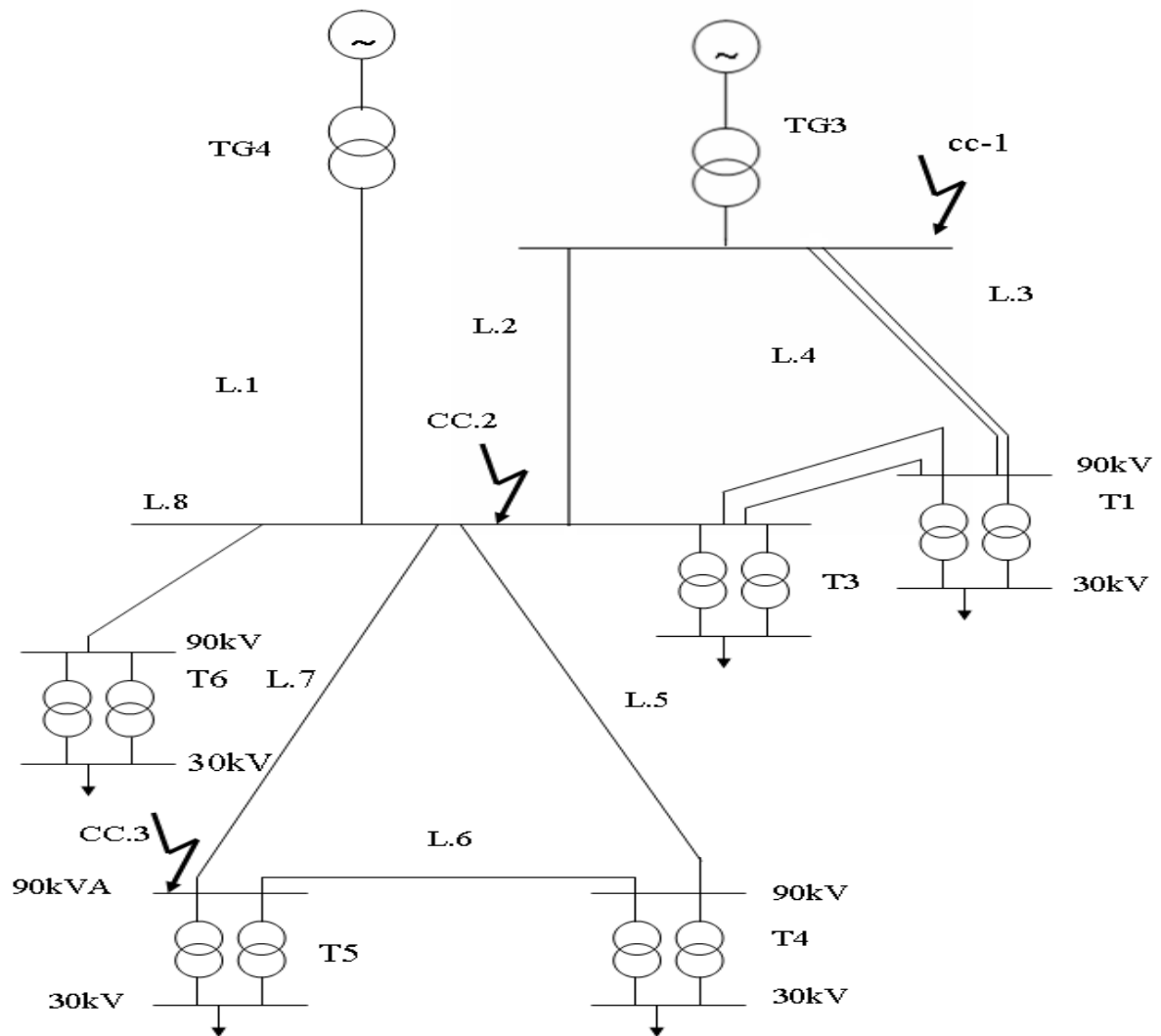


Fig IV.2 : schéma de principe du circuit électrique

On va calculer les courants de court circuit, en supposant des courts-circuits aux points cc-1, cc-2 et enfin cc-3 on indiquera sur le schéma de calcul les points des courts circuits et les paramètres de chaque élément.

On effectuera les calculs en opération avec le système des unités relative la commodité principale de ce système se présente dans le fait que les valeurs des réactances ne changent pas en fonction de la tension de base, c'est-à-dire ce seront les mêmes valeurs pour le calcul des courants de court-circuit aux points cc-1, cc-2 et cc-3

Pour les transformateurs on donne dans les catalogues la valeur de la tension de court-circuit $U_{cc}\%$ égale à l'impédance relative du transformateur par rapport à U_n .

$$U_{cc} \% = \frac{U_{cc} \cdot 100}{U_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot Z_t \cdot 100}{U_n} = \frac{Z_t}{Z_n} \cdot 100 = Z_t \% \quad (\text{IV.1})$$

Pour les transformateurs on a la relation $x_t \gg r_t$

Pour la ligne la résistance peut être négligeable par rapport à la réactance pour des tensions supérieures à 1000V.

Prenons $S_B = 100 \text{ MVA}$

	S_n (MVA)	X''_d	$\cos \varphi$	E''
G_3	68.75	0.195	0.8	1.1
G_4	90	0.2	0.8	1.1

Tableau IV.1 : Données pour les alternateurs

	S_n (MVA)	$U_{cc} \%$
T_{G3}	70	10
T_{G4}	90	10.5
T_3	80	10.5
T_1, T_4, T_5, T_6	40	9.47

Tableau IV.2 : Données pour les transformateurs choisis

	1	2	3	4	5	6	7	8
S_n (MVA)	22.014	-	104.325	9.303	20	26.931	-	-
L (m)	11.17	-	1.3	11.47	98	74	45.921	35
R_0 (Ω)	0.083	0.083	0.083	-	0.13	0.13	0.13	-

Tableau IV.3: Données pour la ligne

IV.3.1 Calcul des réactances de ligne et des transformateurs

Les réactances des lignes sont calculées en unité relative

$$x_{\ell}^* = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_B}{U_n^2} \quad (\text{IV.2})$$

Où

x_0 : Réactance spécifique de la ligne

ℓ : Longueur de la ligne

U_n : Tension nominale

La réactance d'un transformateur en unité est déterminée selon la formule suivante :

$$x_t = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_n} \quad (\text{IV.3})$$

Où

U_{cc} : Tension de court-circuit (%)

S_n : Puissance nominale [MVA]

	1	2	3	4	5	6	7	8
X_l^*	0.056	0.056	0.003	0.029	0.464	0.35	0.217	0.166
X_T	0.243	-	0.131	0.243	0.243	0.243	-	-

Tableau IV.4: les réactances de ligne et des transformateurs

La réactance d'un alternateur en unité relative est déterminée par l'expression suivante :

$$x_{al} = x_d'' \times \frac{S_B}{S_{nal}} \quad (\text{IV.4})$$

X_{TG3}	X_{TG4}	$X_{al G3}$	$X_{al G3}$	X_c
0.142	0.116	0.283	0.222	0.025

Tableau III.5 : les réactances des alternateurs, des transformateurs et de câble

La réactance d'une charge en unité relative est donnée par :

$$x_{ch} = 0.35 \times \frac{S_B}{S_{ch}} \quad (\text{IV.5})$$

	1	2	3	4	5	6	7	8
X_{ch}	1.589	-	0.335	3.761	1.75	1.299	-	-

Tableau IV.6: les réactances des charges en unité relative

Calcul des réactances sommaires

$$x_{1\Sigma} = x_{G4} + x_{TG4} + x_{L1} = 0.394 \quad (\text{IV.6})$$

$$x_1 = x_{T1} + x_{ch1} = 1.710 \quad (\text{IV.7})$$

$X_{1\Sigma}$	$X_{2\Sigma}$	X_1	X_3	X_4	X_5
0.394	0.45	1.710	0.40	3.882	1.871

Tableau IV.7 : les réactances sommaires

Remplaçons le triangle formé par les réactances x_{L3} , x_{L4} et x_{L2} par un étoile ainsi que le triangle formé par les réactances x_{L5} , x_{L6} et x_{L7}

$$x_{23} = \frac{x_{L2} \times x_{L3}}{x_{L2} + x_{L3} + x_{L4}} = 0.002 \quad (\text{IV.8})$$

$$x'_{34} = x_{34} + x_1 = 1.710 \quad (\text{IV.9})$$

$$x_{57} = \frac{x_{L5} \times x_{L7}}{x_{L5} + x_{L6} + x_{L7}} = 0.115 \quad (\text{IV.10})$$

$$x'_{56} = x_4 + x_{56} = 3.954 \quad (\text{IV.11})$$

$$x'_{67} = x_5 + x_{67} = 1.909 \quad (\text{IV.12})$$

X_{23}	X_{24}	X_{34}	X'_{34}	X_{57}	X_{56}	X_{67}	X'_{56}	X'_{67}
0.002	0.018	0.00098	1.710	0.115	0.072	0.038	3.954	1.909

Tableau IV.8: les réactances sommaires

IV.3.2 Calcul du courant de court-circuit au point CC-1

- Voyons en premier lieu si on peut réunir les charges, E_3 , E_4 , E_5 et E_6 en une seule. Vérifions pour E_4 et E_5

$$\frac{S_4 \times x'_{56}}{S_5 \times x'_{67}} = \frac{9.303 \times 3.954}{26.931 \times 1.586} = 0.97 \quad (\text{IV.13})$$

$0.97 \in [0.4 \div 2.5]$ Donc on peut coupler

$$S_{45} = S_4 + S_5 = 29.303 \text{ MVA} \quad (\text{IV.14})$$

$$x_{45} = \frac{1.909 \times 3.954}{1.909 + 3.954} = 1.287$$

$$x'_{45} = x_{45} + x_{57} = 1.402 \quad (\text{IV.15})$$

$$E_{45}=0.85$$

Vérifions pour E_{45} et E_6

$$\frac{S_{45} \times x'_{45}}{S_{45} \times x'_{67}} = 0.96 \quad (\text{IV.16})$$

$0.96 \in [0.4 \div 2.5]$ Donc on peut coupler

$$S_{456} = 29.303 + 26.931 = 56.234 \text{ MVA}$$

$$x'_{456} = \frac{1.402 \times 1.586}{1.402 \times 1.586} = 0.744$$

Vérifions pour E_{456} et E_3

$$\frac{S_{456} \times x'_{456}}{S_3 \times x_3} = 1.002 \quad (\text{IV.17})$$

$1.002 \in [0.4 \div 2.5]$ Donc on peut coupler

$$S_{456} = 29.303 + 26.931 = 56.234 \text{ MVA}$$

$$x'_{456} = \frac{1.402 \times 1.586}{1.402 \times 1.586} = 0.744$$

Vérifions pour E_{456} et E_3

$$\frac{S_{456} \times x'_{456}}{S_3 \times x_3} = 1.002 \quad (\text{IV.18})$$

$1.002 \in [0.4 \div 2.5]$ Donc on peut coupler

$$S_{3456} = 104.325 + 56.324 = 160.559 \text{ MVA}$$

$$x_{456} = \frac{x_3 \cdot x'_{456}}{x_3 + x'_{456}} = 0.260 \quad (\text{IV.19})$$

$$E_{3456} = 0.85$$

Voyons maintenant si on peut coupler E_{3456} avec E'' du groupe G4.

$$\frac{S_{3456} \times x_{3456}}{S_n \times x_{1\Sigma}} = 1.17 \quad \text{Donc on peut coupler} \quad (\text{IV.20})$$

$$S_{\Sigma 1} = S_{3456} + S_n = 250.559 \text{ MVA} \quad (\text{IV.21})$$

$$x_{\Sigma 1} = \frac{x_{3456} \times x_{1\Sigma}}{x_{3456} + x_{1\Sigma}} = 0.260 \quad (\text{IV.22})$$

$$E_{\Sigma 1} = \frac{\frac{E_{3456}}{x_{3456}} + \frac{E''}{x_{1\Sigma}}}{\frac{1}{x_{3456}} + \frac{1}{x_{1\Sigma}}} = 0.94 \quad (\text{IV.23})$$

Vérifions pour $E_{\Sigma 1}$ et E_1

$$\frac{S_{\Sigma 1} \times x'_{\Sigma 1}}{S_1 \times x'_{34}} = 1.158 \quad (\text{IV.24})$$

$$1.158 \in [0.4 \div 2.5]$$

$$\text{Où } x'_{\Sigma 1} = x_{21} + x_{24} = 0.174 \quad (\text{IV.25})$$

Donc on peut coupler

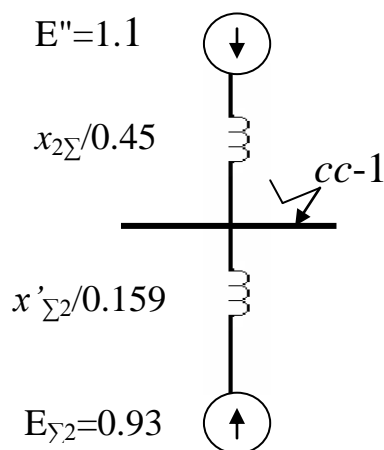
$$E_{\Sigma 1} = \frac{\frac{E_{\Sigma 1}}{x'_{\Sigma 1}} + \frac{E_1}{x'_{34}}}{\frac{1}{x'_{\Sigma 1}} + \frac{1}{x'_{34}}} = 0.93 \quad (\text{IV.26})$$

$$x_{\Sigma 2} = \frac{x'_{\Sigma 1} \times x'_{34}}{x'_{\Sigma 1} + x'_{34}} = 0.157 \quad (\text{IV.27})$$

Le schéma simplifié devient ainsi :

$$x'_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 2} + x_{23} = 0.159 \quad (\text{IV.28})$$

$$I_{cc\text{-système}}^* = \frac{E''}{x_{2\Sigma}} \quad (\text{IV.29})$$



En valeur réelle

$$I_{cc-syst} = I_{cc-syst}^* \times I_B \quad (IV.30)$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ kA} \quad (IV.31)$$

$$I_{cc-charge}^* = \frac{E_{\Sigma^2}}{x'_{\Sigma^2}} \quad (IV.32)$$

$$I_{cc-ch} = I_{cc-charge}^* \times I_B \text{ kA} \quad (IV.33)$$

$$\text{Donc } I_{cc-1} = I_{cc-syst} + I_{cc-ch} \text{ kA} \quad (IV.34)$$

Calcul de courant de choc

$$I_{choc} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot K_{ch} \quad (IV.35)$$

K_{ch} : Coefficient de choc, il est égal à :

$$K_{ch} = 1 + e^{-0.01/T_a} \quad (IV.36)$$

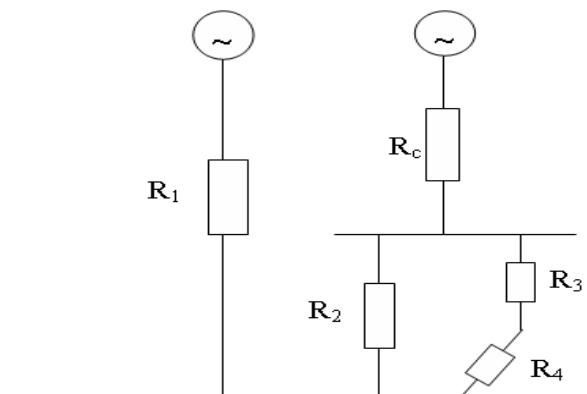
Calcul de T_a

T_a : étant la constante de temps.

$$T_a = \frac{X_{\Sigma}}{\omega_0 \cdot R_{\Sigma}} \quad (IV.37)$$

$$X_{\Sigma} = \frac{x_{2\Sigma} \times x'_{\Sigma^2}}{x_{2\Sigma} + x'_{\Sigma^2}} = 0.117 \quad (IV.38)$$

Pour calculer R_{Σ} , considérons le schéma purement résistif .



Les résistances des transformateurs sont négligeables.

$$R_c = 0.35 \, \Omega$$

$$R_c^* = 0.35 \times \frac{100}{90^2} = 0.004 \quad (\text{IV.39})$$

R_1, R_2, R_3 et R_4 résistances des lignes

$$R_1 = R_2 = 0.083 \times 11.17 \times \frac{100}{90^2} = 0.011 \quad (\text{IV.40})$$

$$R_3 = \frac{0.083}{2} \times 1.3 \times \frac{100}{90^2} = 0.001$$

$$R_4 = \frac{0.083}{2} \times 11.47 \times \frac{100}{90^2} = 0.005 \quad (\text{IV.41})$$

$$R_{eq1} = R_3 + R_4 = 0.006 \quad (\text{IV.42})$$

$$R_{eq2} = \frac{R_{eq1} \times R_2}{R_{eq1} + R_2} = 0.003 \quad (\text{IV.43})$$

$$R_{eq3} = R_c^* + R_{eq2} = 0.007 \quad (\text{IV.44})$$

$$R_\Sigma = \frac{R_1 \times R_{eq3}}{R_1 + R_{eq3}} = 0.004 \quad (\text{IV.45})$$

	CC-1	CC-2	CC-3
I_{cc-sys}^*	2.444	5.52	3.720
I_b	0.64	0.641	0.64
I_{cc-ch}^*	5.849	3.269	0.454
$I_{cc}(KA)$	5.31	5.63	2.67
$X_{\Sigma cc-1}$;	0.117	-	-
$X'_{\Sigma cc-2}$;	-	0.11	-
$X'_{\Sigma cc-3}$	-	-	0.226
$R_\Sigma(\Omega)$	0.004	0.004	0.061
$T_a(s)$	0.09	0.08	0.011
$I_{choc}(KA)$	14.22	15	5.30

Tableau IV.9: résultat de calcul de courant de court circuit au points CC-1, CC-2, CC-3

IV.4 Exemple de simulation du courant de court-circuit

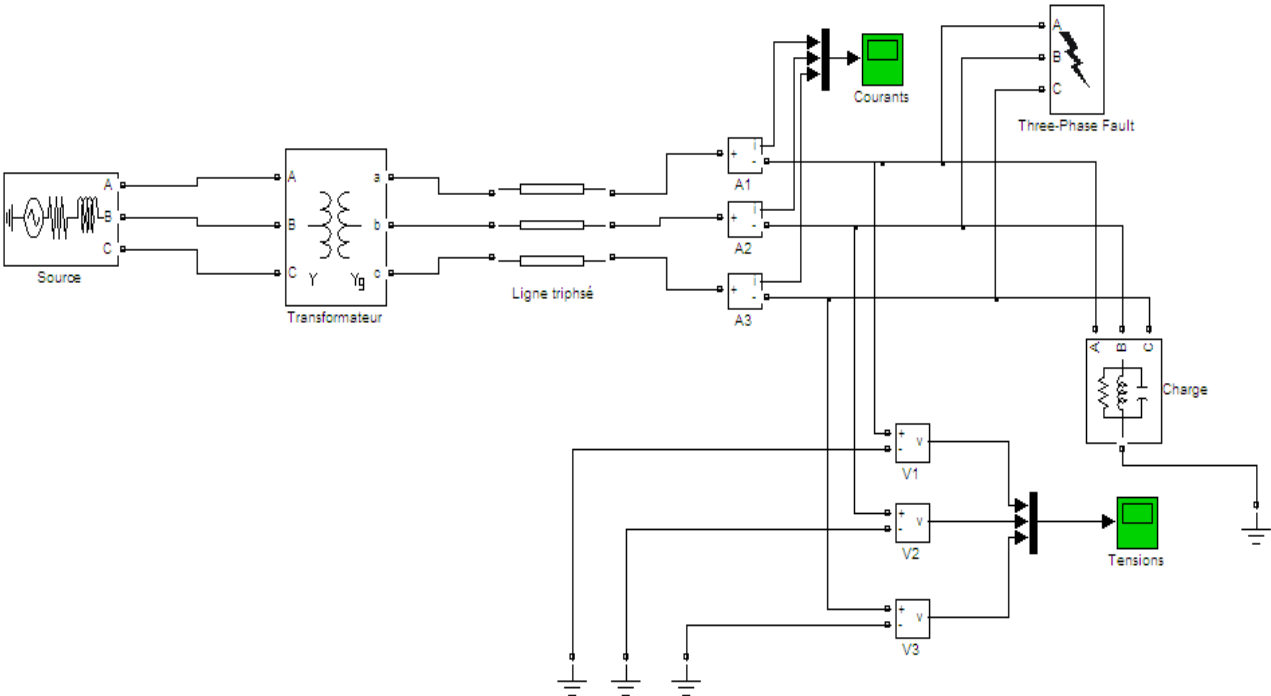


Fig IV.3 : Simulation matlab de courant de court circuit

IV.4.1 Régime sans avarie

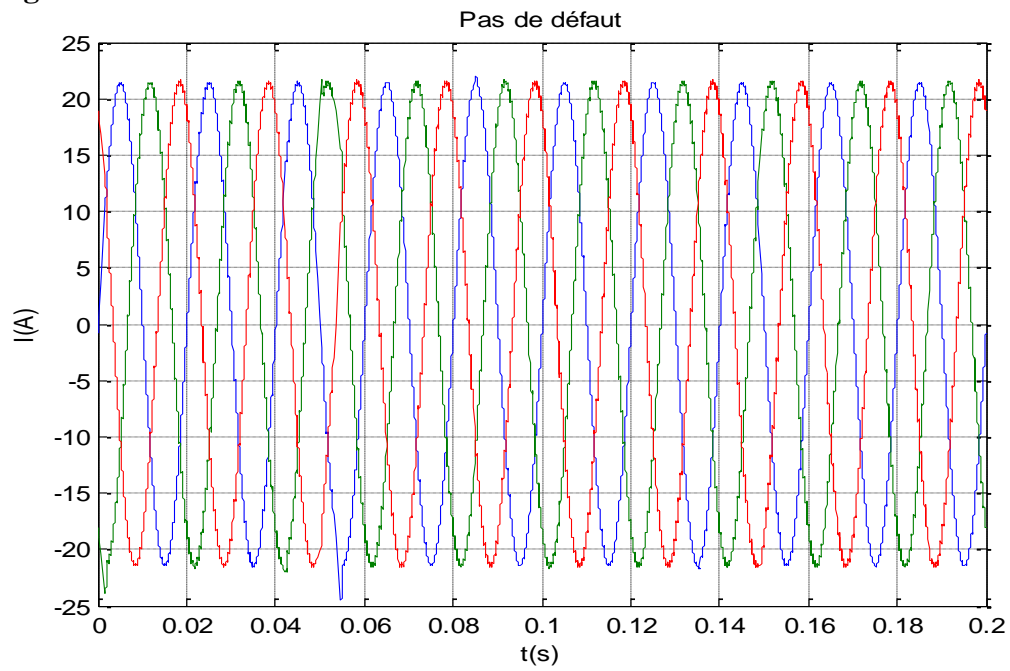


Fig IV.4 : Simulation du courant en régime sans avarie

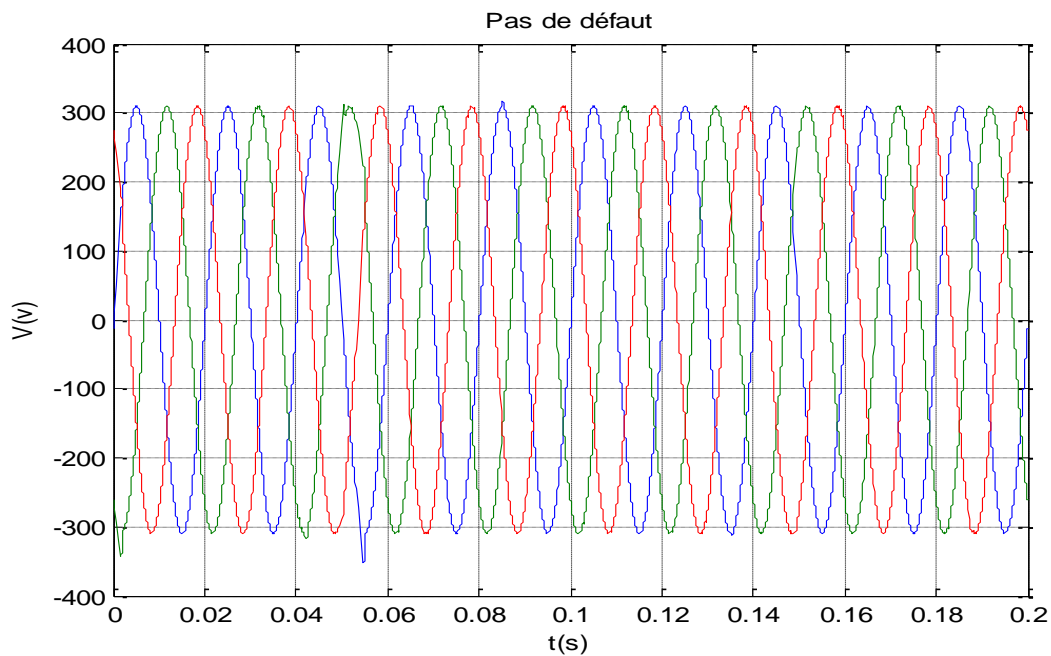


Fig IV.5 : Simulation de la tension en régime sans avarie

IV.4.2 Court circuit monophasé (phase-terre)

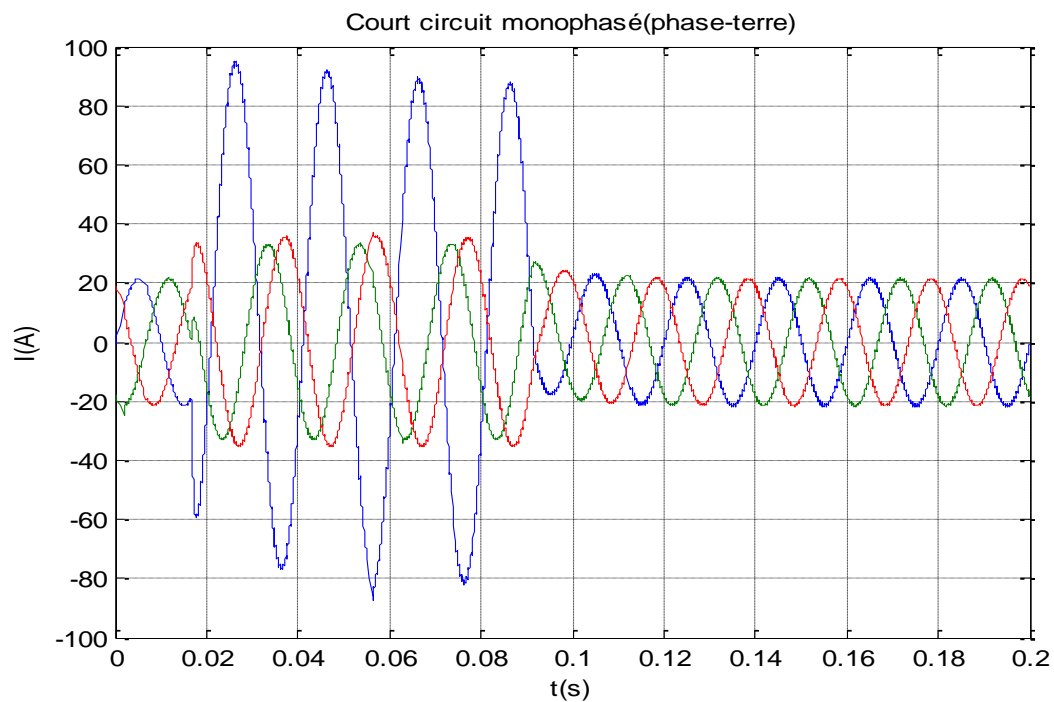


Fig IV.6 : Simulation du courant en court circuit monophasé (phase-terre)

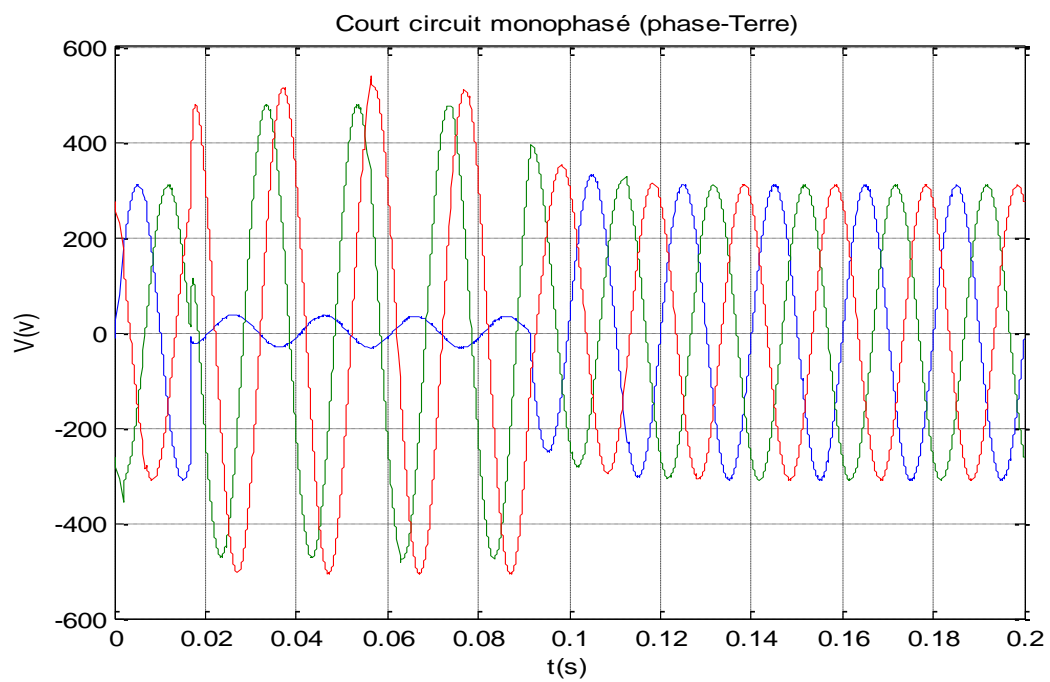


Fig IV.7 : Simulation de la tension en court circuit monophasé (phase-terre)

IV.4.3 Court circuit biphasé

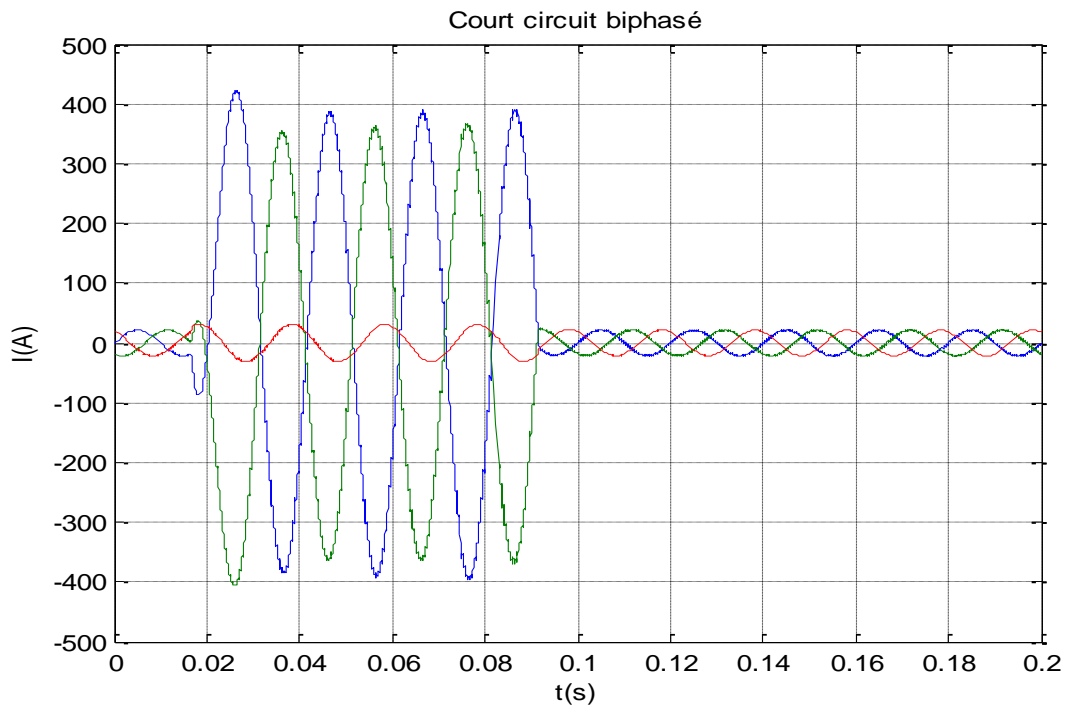


Fig IV.8 : Simulation du courant en court circuit biphasé

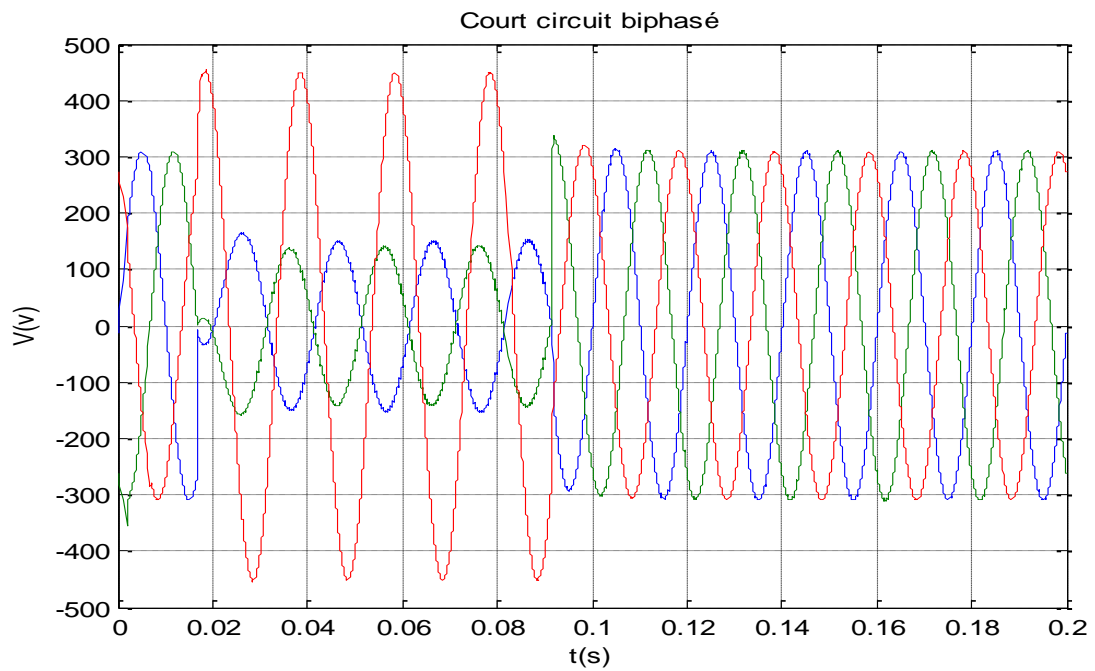


Fig IV. 9 : Simulation de la tension en court circuit biphasé

IV.4.4 Court circuit triphasé

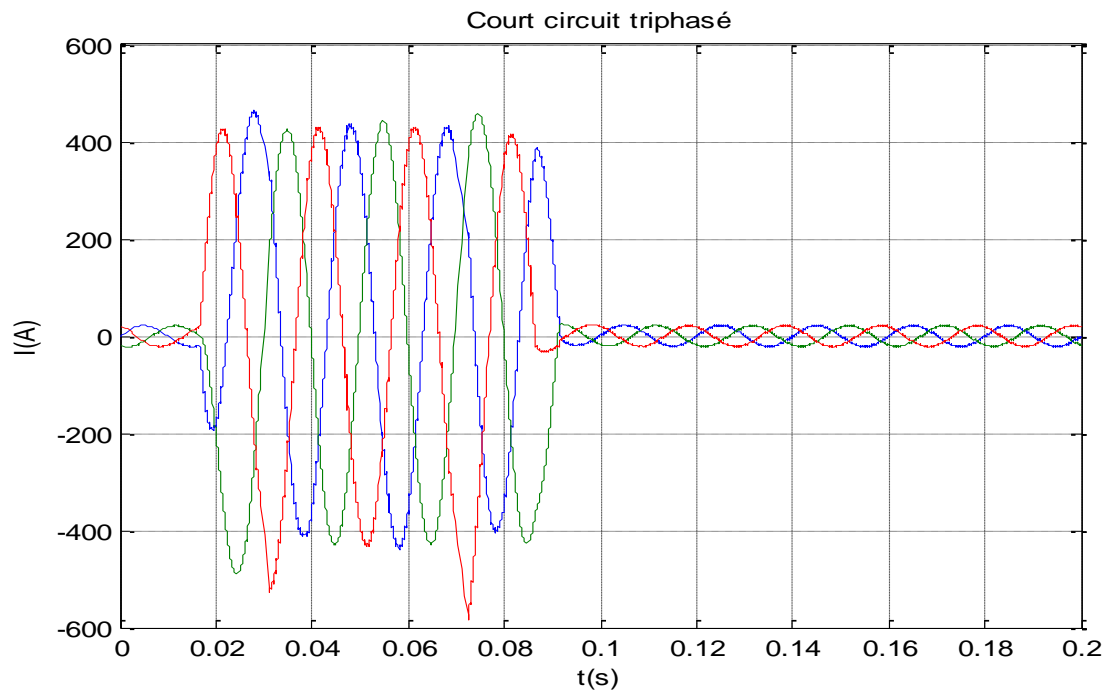


Fig IV.10 : Simulation du courant en court circuit triphasé

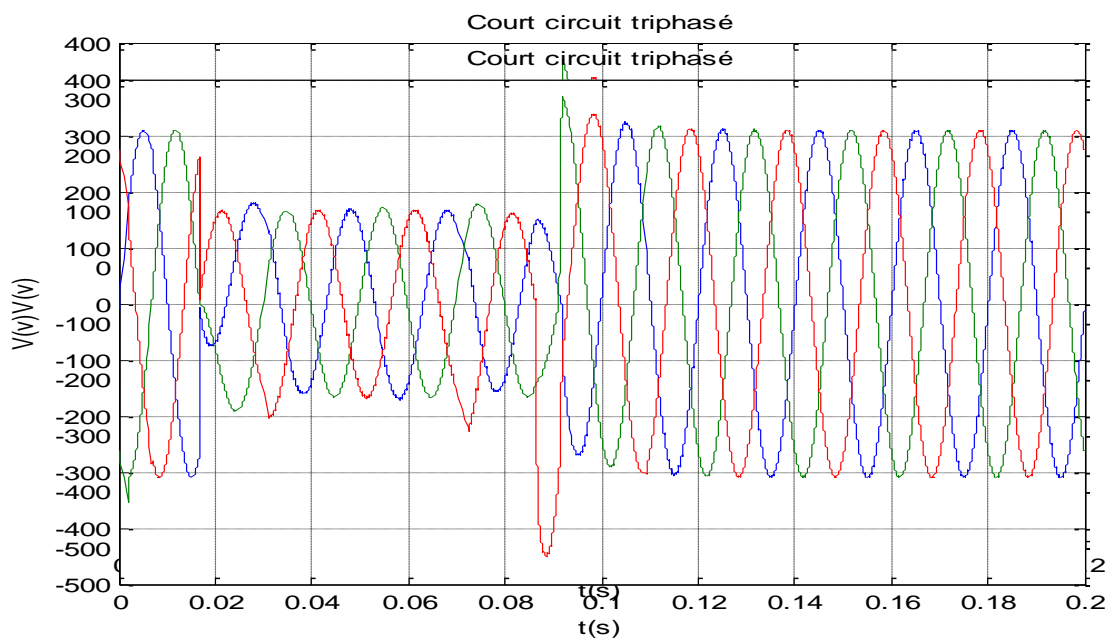


Fig IV.11 : Simulation de la tension en court circuit triphasé

IV.4.5 Conclusion

D'après la simulation en MATLAB on a vu que les courts circuits entraînent l'augmentation considérable du courant qui dépasse beaucoup le courant du régime normal et la diminution importante de la tension, cette baisse de tension peut troubler le fonctionnement des récepteurs électriques et du poste d'interconnexion.

V.1 Généralités sur les plasmas et les arcs de disjoncteurs

- Le mot plasma est utilisé pour désigner un gaz ionisé globalement neutre.
- Les plasmas sont relativement courants dans la nature.
- L'arc électrique ne s'amorce et ne se perpétue qu'à travers plasma auquel il donne naissance.
- On distingue les plasmas chauds des plasmas froids. Les plasmas chauds sont ceux des fusions nucléaires, leurs températures se chiffrent en millions de degrés.
- Les plasmas froids, parmi lesquels on trouve les plasmas des décharges électriques, sont des milieux ionisés dans lesquels la température des particules ne dépasse pas quelques dizaines de milliers de degrés. Il existe deux catégories de plasmas froids : lorsque toutes les espèces de particules ont des températures voisines, on parle de plasmas thermiques en faible déséquilibre thermodynamique, si les électrons possèdent une température beaucoup plus élevée que celle des particules lourdes, le plasma est dit hors d'équilibre .
- 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 vapeurs plastiques venant des parois latérales du disjoncteur.
- Sa température est estimée expérimentalement à 15000 K.
 - Un disjoncteur est un élément essentiel dans un réseau électrique car, en cas d'incident, il interrompt le courant au plus vite et évacue l'énergie stockée dans le réseau.
-

V.2 Les disjoncteurs

V.2.1 Constitution du disjoncteur

Il est constitué :

- des pièces enveloppes :
 - Coquille (1)
 - Couvercle
- de pièces spécifiques :
 - Chambre de coupure (2)
 - Tôle d'arc (3)
 - Vis de réglage (4)
 - Sous-ensemble serrure (5)
- D'ensembles variables :
 - Sous-ensemble thermique (6)
 - Sous-ensemble magnétique (7)

- De pièces de finition :
 - Clip de marquage
 - Ressort et loquet bistable (8)

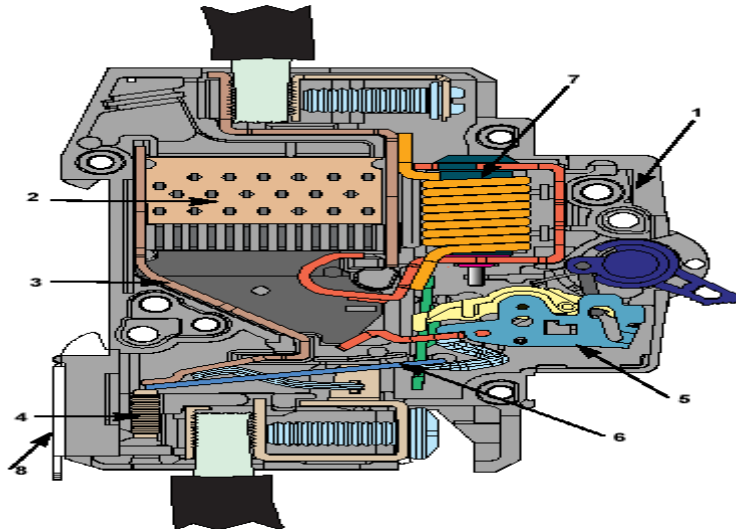


Fig V.1: constitution du disjoncteur

V.2.2 Principe de fonctionnement d'un disjoncteur

Au centre du 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.

Lorsque les deux électrodes sont encore en contact, elles prennent appui seulement sur les aspérités et irrégularités de surface.

Les lignes de courant se concentrent ainsi en un très petit nombre de contacts.

Au moment de la séparation des contacts, la totalité du courant I passe d'une électrode à l'autre par des micro-contacts de l'ordre de 10^{-6} mm^2 .

L'effet Joule est alors très intense conduit à une augmentation considérable de la température locale. Le point d'ébullition métal des électrodes est alors atteint et il se forme des ponts fondus métalliques entre électrodes.

Les zones d'ancrage des ponts sur les contacts sont à une température voisine la température d'ébullition du métal, ainsi l'émission thermo-ionique est possible.

L'environnement des ponts fondus est alors un mélange de gaz ambiant et de vapeurs métalliques.

Lorsque les électrodes s'écartent davantage, on assiste alors à la rupture des ponts fondus, qui sont soumis à de fortes convulsions et instabilités.

Ces ruptures prennent la forme d'explosions et il y a éjection de micro-gouttelettes de métal fondu à une vitesse de 100 à 300 m.s⁻¹, permettant ainsi l'ionisation de l'air puis l'apparition d'un arc électrique. Soumis à des effets électromagnétiques et gazodynamiques, l'arc saute de l'électrode mobile vers l'électrode de commutation et se déplace ensuite jusqu'au fond du boîtier.

On trouve au bout de la cavité des ailettes de refroidissement qui découpent l'arc en petits tronçons et favorisent son extinction.

Le phénomène de coupure ne dure que quelques millisecondes.

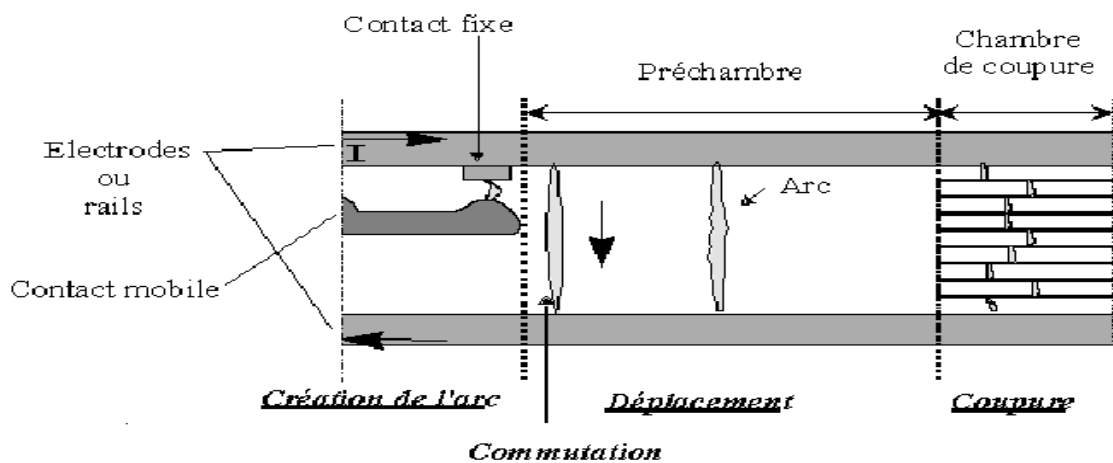


Fig V.2 : Analyse du fonctionnement du disjoncteur (coupe longitudinale)

Les électrodes se nomment cathode et anode.

Si l'énergie thermique est suffisante, on a une émission électronique à la cathode qui permet l'ionisation du gaz et la formation de l'arc.

On constate une érosion de la surface de la cathode qui serait due aux effets combinés de la forte densité de courant traversant la section d'arc, de la pulvérisation du matériau sous l'impact des particules soumises à l'accélération du champ électrique, de la présence de métal fondu à sa surface ainsi que de la pollution due au dépôt des particules en provenance des parois du boîtier vaporisées par la forte chaleur dégagée par l'arc.

- L'anode se contente de collecter les électrons et par conséquent influence moins le comportement de l'arc.
- Les phénomènes d'érosions en surface sont cependant plus importants qu'à la cathode.

V.3 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.

V.3.1 constitution du Chambre de coupure

- joues latérales (1)
- tôle d'arc (2)
- tôles de déionisation (3)

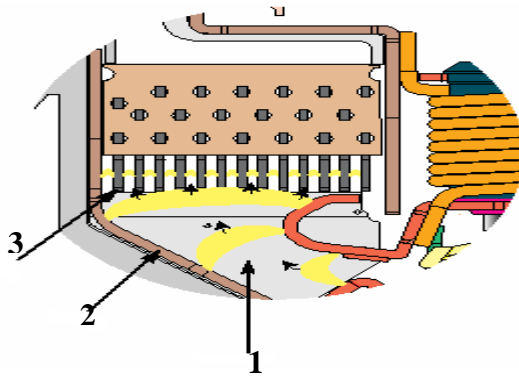


Fig V.3 : Constitution du Chambre de coupure

V.3.2 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 déionisation de l'air.

Puis, pénétrant dans les déions (languettes d'acier cuivré), l'arc est divisé en plusieurs arcs élémentaires.

La déionisation 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" (U_{arc}) entre ses bornes.

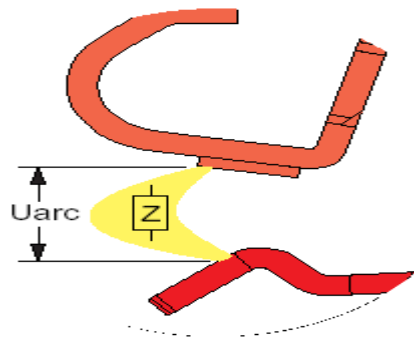


Fig V.4 : Effet de l'arc dans la chambre de coupure

V.4 Etude en temporelle de la tension d'arc courant alternatif

La figure V.5 donne une représentation simplifiée d'un circuit électrique, composé d'une résistance r , d'une inductance L et d'un disjoncteur A .

On note e la tension du réseau, U_{arc} la tension aux bornes du disjoncteur et i l'intensité du courant circulant dans le circuit.

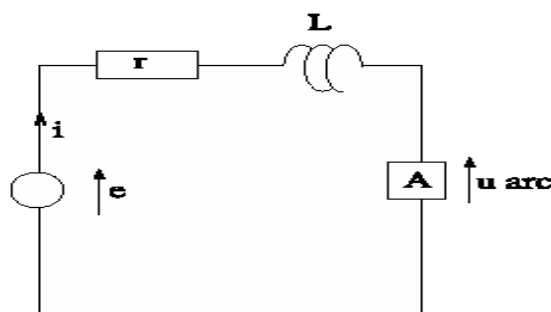


Fig V.5 : Schéma du circuit électrique comprenant le disjoncteur

L'équation du circuit s'écrit :

$$e = ri + L \frac{di}{dt} + u_{arc} \quad (V.1)$$

Les courbes de la figure (V.6) tracent les évolutions en fonction du temps :

- de l'intensité du courant présumé (courant qui aurait circulé dans le circuit sans l'intervention du disjoncteur) ;
- de l'intensité du courant limité (courant qui circule dans le circuit avec le disjoncteur)
- de la tension du réseau e ;
- de la tension d'arc U_{arc} .

Dès que le courant dépasse une valeur seuil, il y a ouverture des contacts.

La tension d'arc aux bornes du disjoncteur augmente alors jusqu'à dépasser la tension du réseau.

La différence $(e - U_{\text{arc}})$ devient négative et (di / dt) devient aussi négatif.

L'intensité du courant décroît donc.

- Lorsque l'intensité s'approche du zéro, l'effet Joule devient inférieur à la puissance thermique cédée par l'arc au milieu environnant et l'arc se refroidit.

Il en résulte la recombinaison des ions et des électrons pour redonner des particules électriquement neutres en sorte que l'ionisation décroît ainsi que la conductance, réalisant automatiquement la synchronisation de la décroissance de la conductance avec l'approche du zéro du courant.

On se rapproche du comportement de l'interrupteur idéal, qui est parfaitement conducteur jusqu'à l'instant précis d'un passage à zéro du courant et complètement isolant tout de suite après.

Au zéro du courant, l'arc est éteint, le courant est coupé.

Les boîtiers des disjoncteurs doivent être adaptés à ces conditions physiques extrêmes et doivent donc tenir compte de facteurs importants tels que :

- Forces et chocs mécaniques ;
- Force électromagnétique générée par le courant de court-circuit ;
- Chaleur développée par l'arc et détériorant les matériaux du boîtier ;
- Élévation de la pression, montée en température du gaz.

La fabrication et l'industrialisation du disjoncteur nécessitent d'intégrer ces phénomènes complexes.

Les faibles temps caractéristiques et les fortes énergies dégagées rendent les mesures difficiles et très coûteuses.

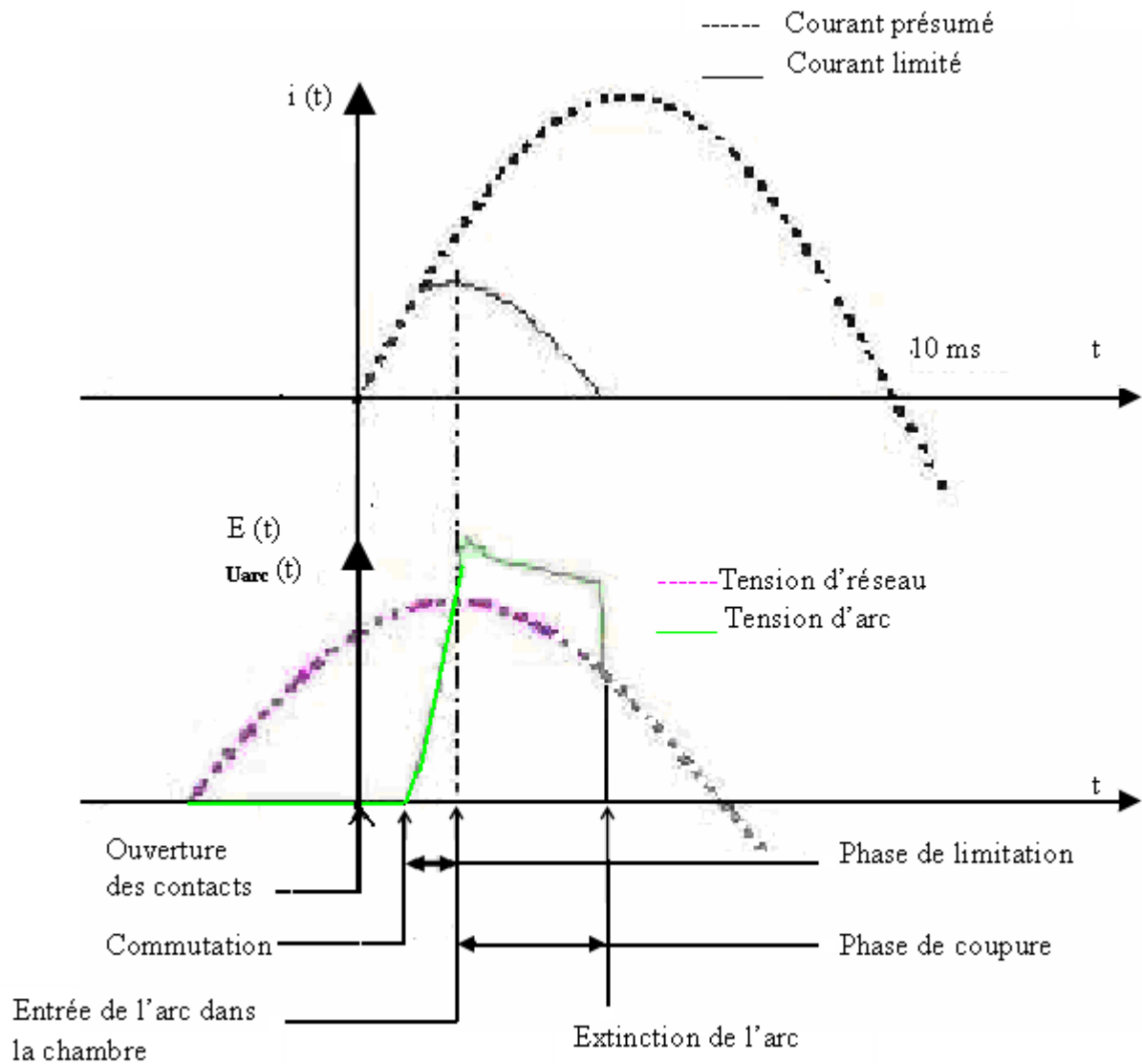


Fig V.6: évolution du courant présumé, du courant limité, de la tension du réseau et de la tension d'arc au cours du temps

V.5 Principe de la coupure par disjoncteur

La coupure d'un courant électrique par un appareil idéal consiste à un passage de la résistance de cet appareil de zéro avant la coupure à une valeur infinie juste après la coupure. La coupure intervient au moment du passage par zéro naturel du courant. Cet appareil idéal est impossible à réaliser, mais les techniques de coupure se basant sur le comportement de l'arc électrique dans différents milieux diélectriques nous permettent de s'en rapprocher.

V.5.1 Coupure par disjoncteur

Au moment de l'interruption d'un courant, un arc électrique s'établit entre les bornes de l'appareil de coupure. L'arc électrique conducteur a tendance à se maintenir par le phénomène d'ionisation du diélectrique provoqué par l'énergie dissipée dans la résistance de l'arc.

Au voisinage du zéro naturel du courant, l'énergie dissipée diminue et devient inférieure à l'évacuation thermique dans le milieu, l'arc se refroidit et sa résistance augmente.

Au passage par zéro naturel du courant, la résistance de l'arc devient infinie et la coupure est effective.

V.6 Simulation de l'arc sur un disjoncteur de haute tension

V.6.1 Analyse du circuit de simulation

V.6.1.1 Le circuit appliqué pour la simulation de l'arc

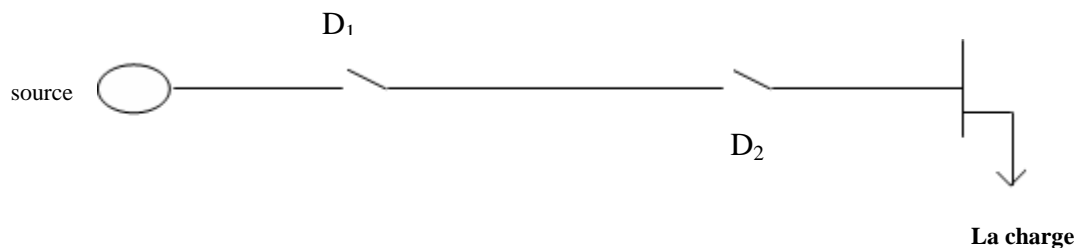


Fig V.7 : Circuit appliqué pour la simulation de l'arc

Pour la simulation on a pris une ligne électrique de **150 Km**, $L=0,8737 e^{-3}$, $R=0,01755 \Omega/Km$, $C=13,33 e^{-9}$, pour les tensions : **U=5.5 KV, U=10 KV, U=15 KV, U=60KV, U=150KV, U=220KV, U=440KV.**

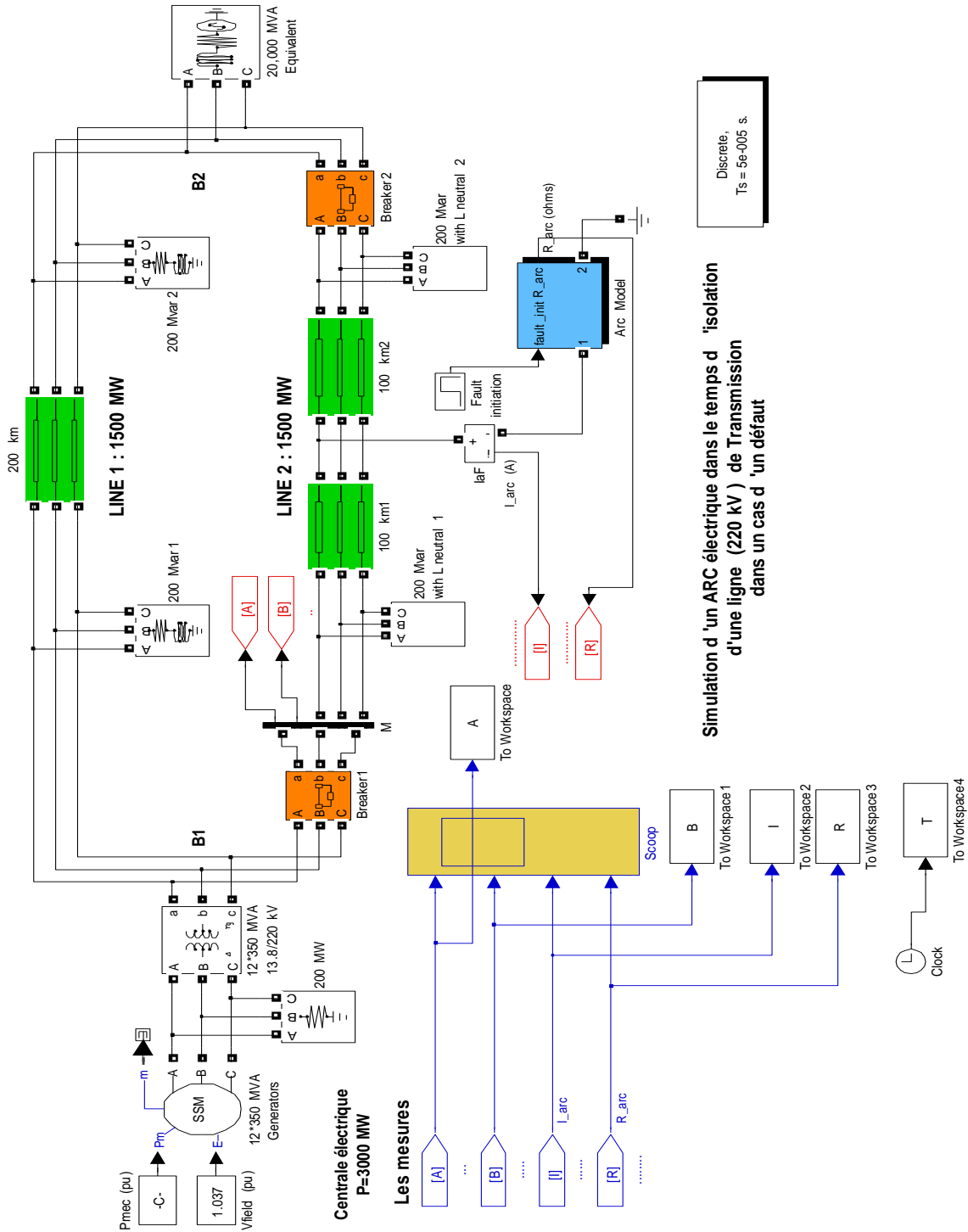
Avec une puissance de **1500MW**. dont les caractéristiques sont indiquées sur le schéma de la **figV.7**

On a un disjoncteur en amont coté source et un disjoncteur en aval coté charge.

La simulation concerne le moment de coupure du disjoncteur amont **fig V.8**

Ces constantes nous donnent les courbes suivantes qui ont une analogie avec les courbes de Davy qui elles sont plus précises car les courbes de Davy sont pédagogiques mais les autres sont scientifiques sur **les figures V.9.10.11.12.13.14.15.a** qui représente la tension de branchement au régime nominale, **les figures V.9.10.11.12.13.14.15.b** le courant au régime nominale, **les figures V.9.10.11.12.13.14.15.c** le courant au moment de la coupure et en fin **les figures V.9.10.11.12.13.14.15.d** la forme de la variation de l'impédance au moment de la coupure jusqu'à l'élimination de l'arc.

V.6.1.2 La simulation de l'arc électrique en haute tension



Simulation d'un ARC électrique dans le temps d'isolation d'une ligne (220 kV) de Transmission dans un cas d'un défaut

Fig V.8: Simulation Matlab de l'arc électrique

V.6.1.3 Les courbes

a) En moyenne tensions $U=5.5$ KV

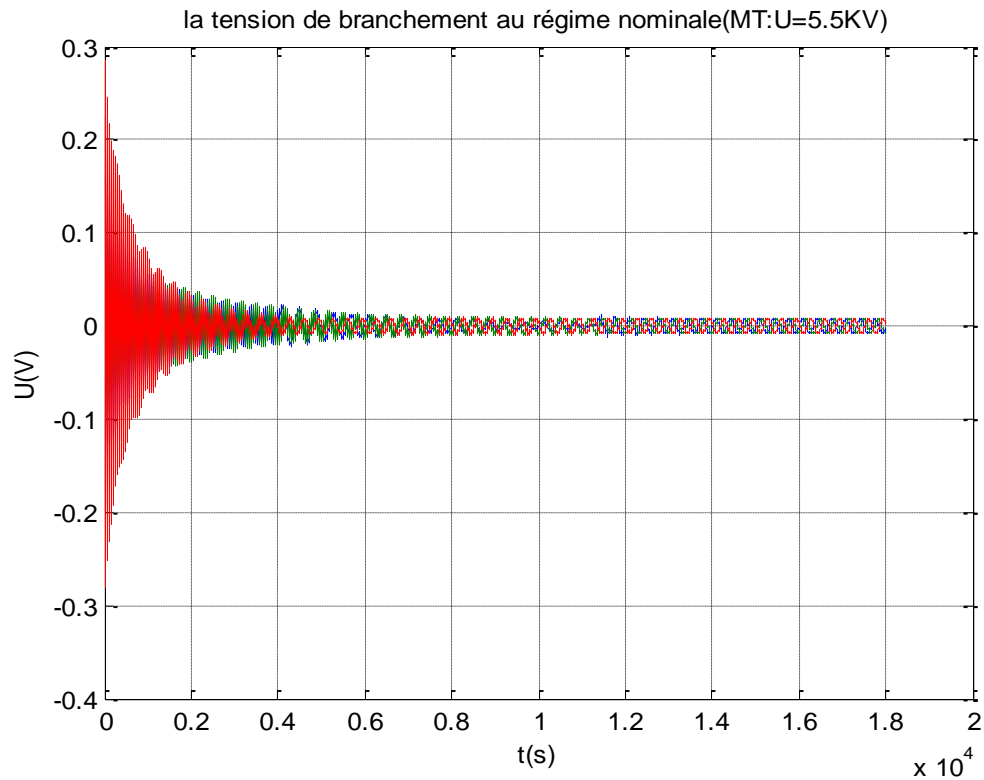


Fig V.9.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

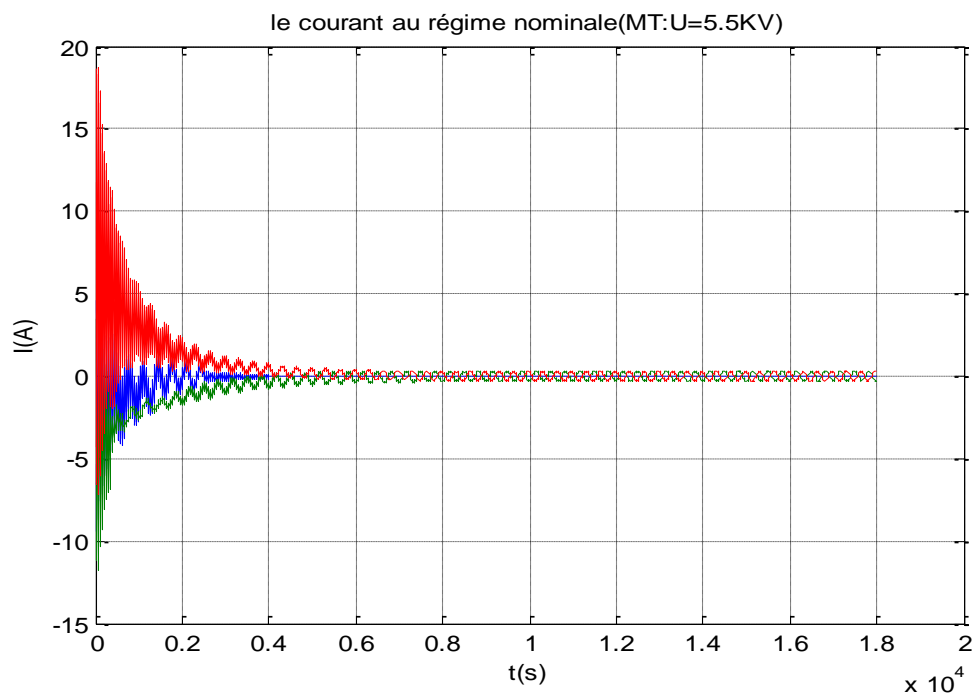


Fig V.9.b : La simulation du courant dans le régime nominale

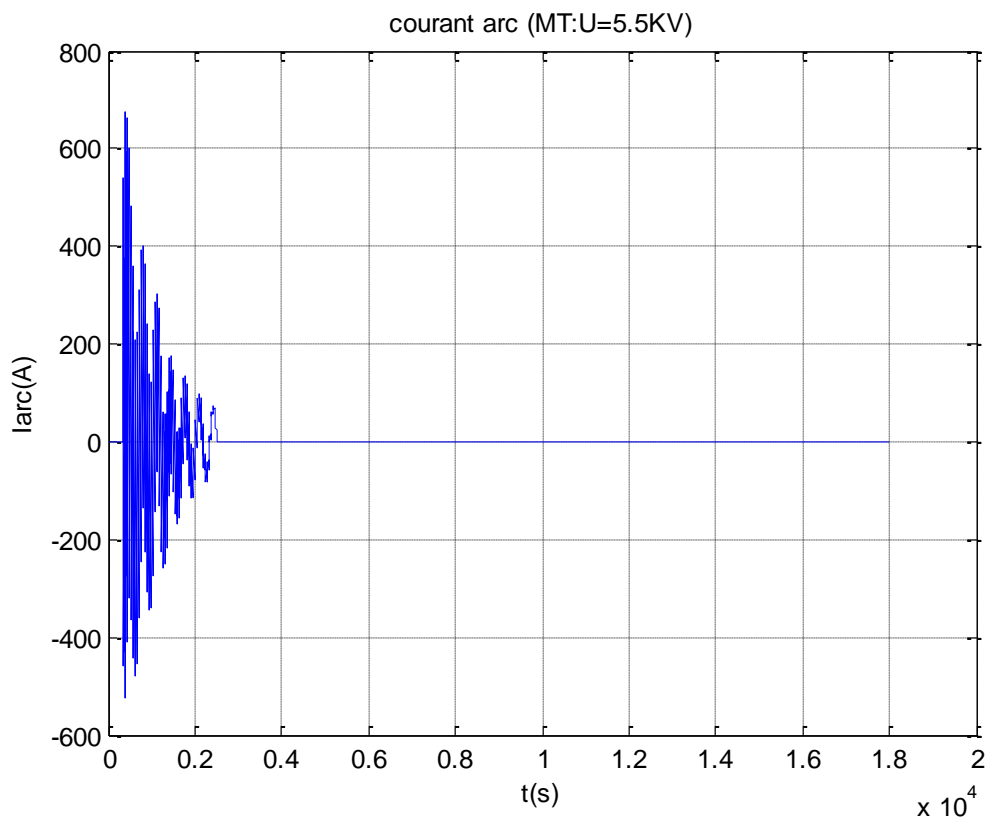


Fig V.9.c : La simulation de courant d'arc après la coupure

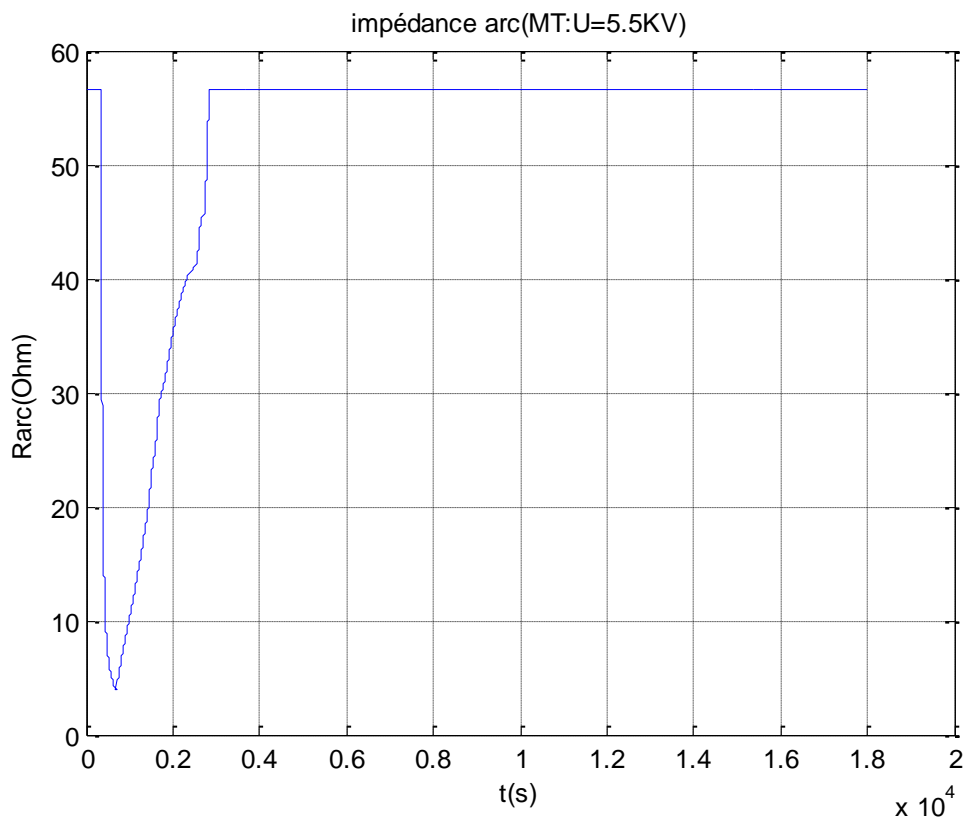


Fig V.9.d : La simulation de l'impédance au moment de la coupure

b) En moyenne tensions $U=10$ KV

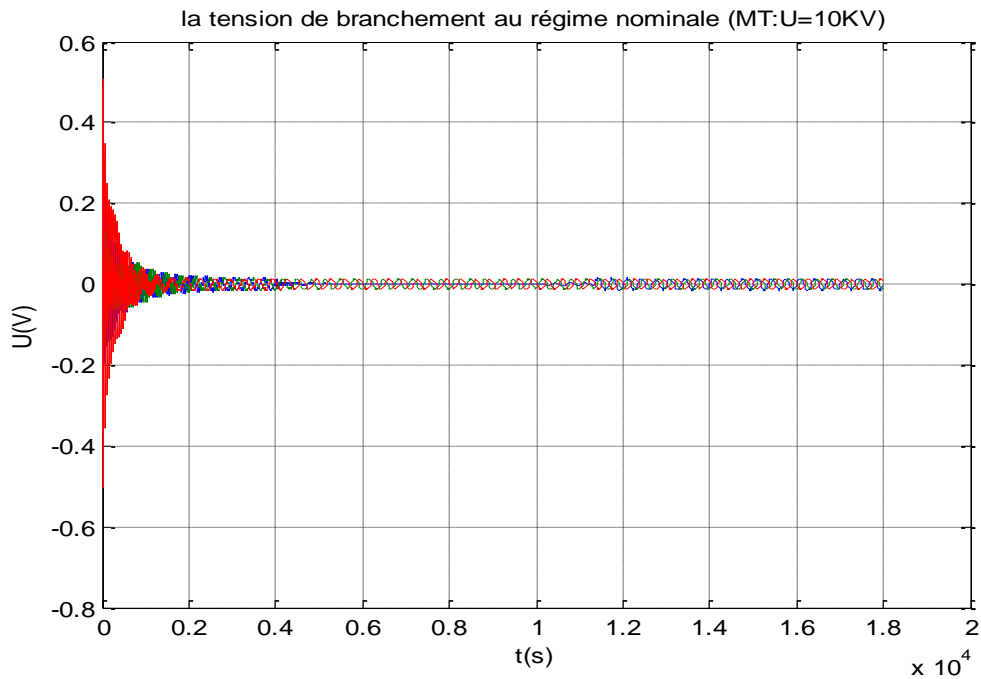


Fig V.10.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

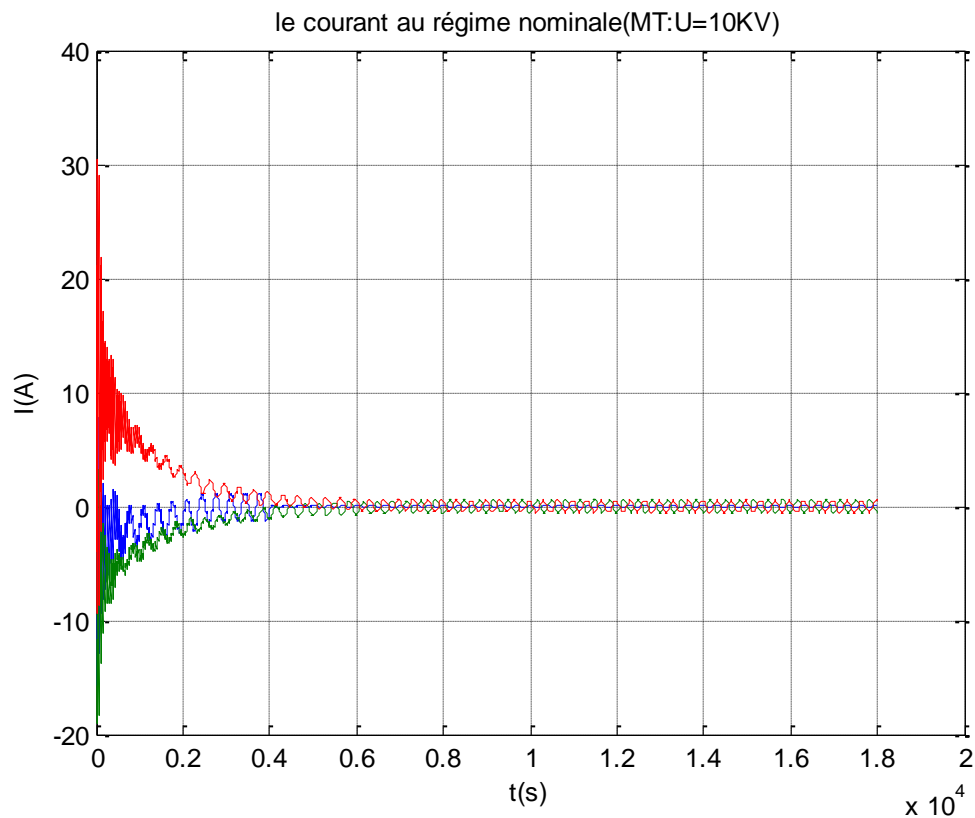


Fig V.10.b : La simulation du courant dans le régime nominale

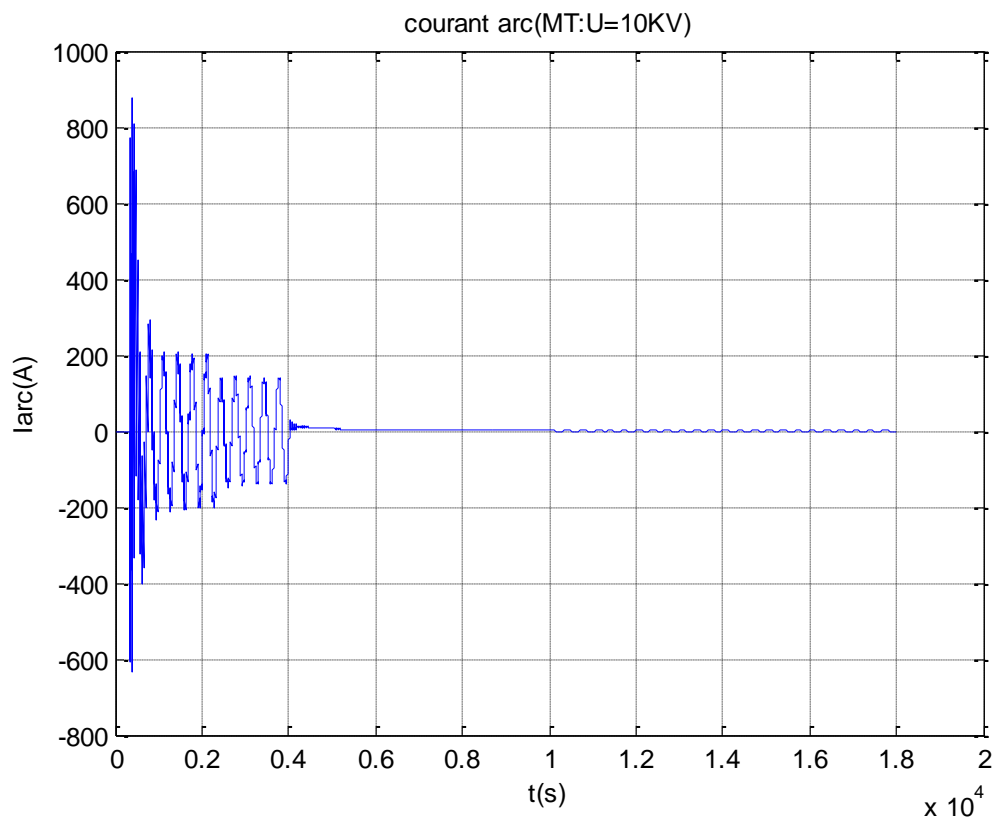


Fig V.10. c : La simulation du courant d'arc après la coupure

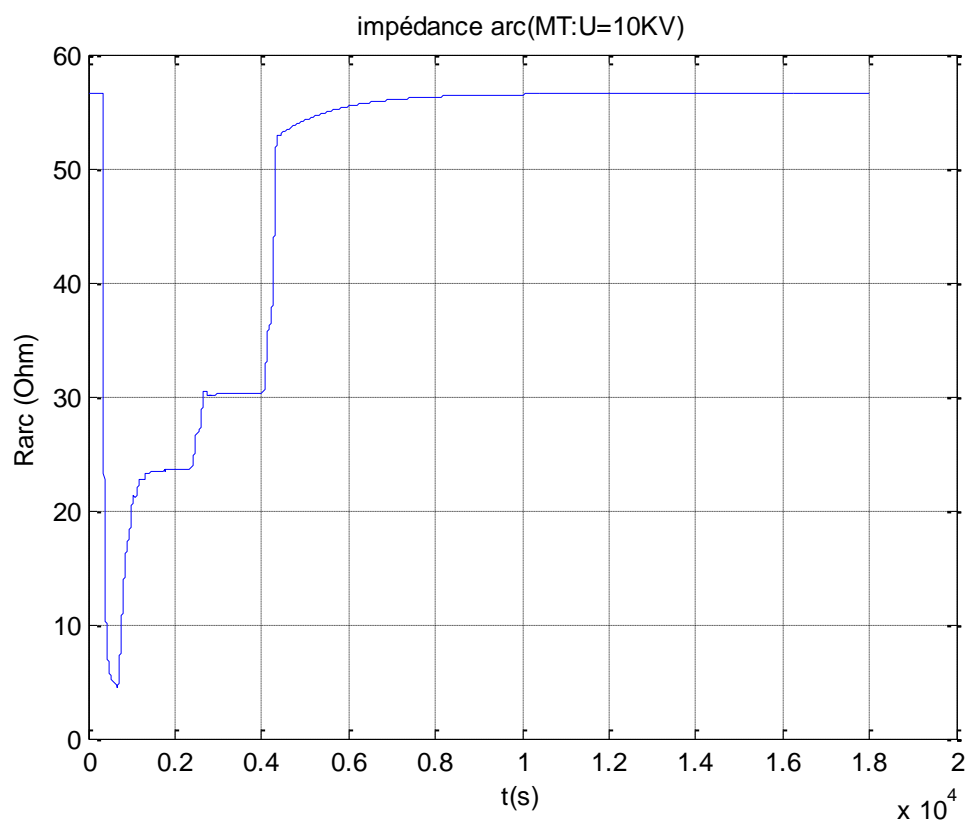


Fig V.10.d : La simulation de l'impédance au moment de la coupure

c) En moyenne tensions $U=15\text{ KV}$

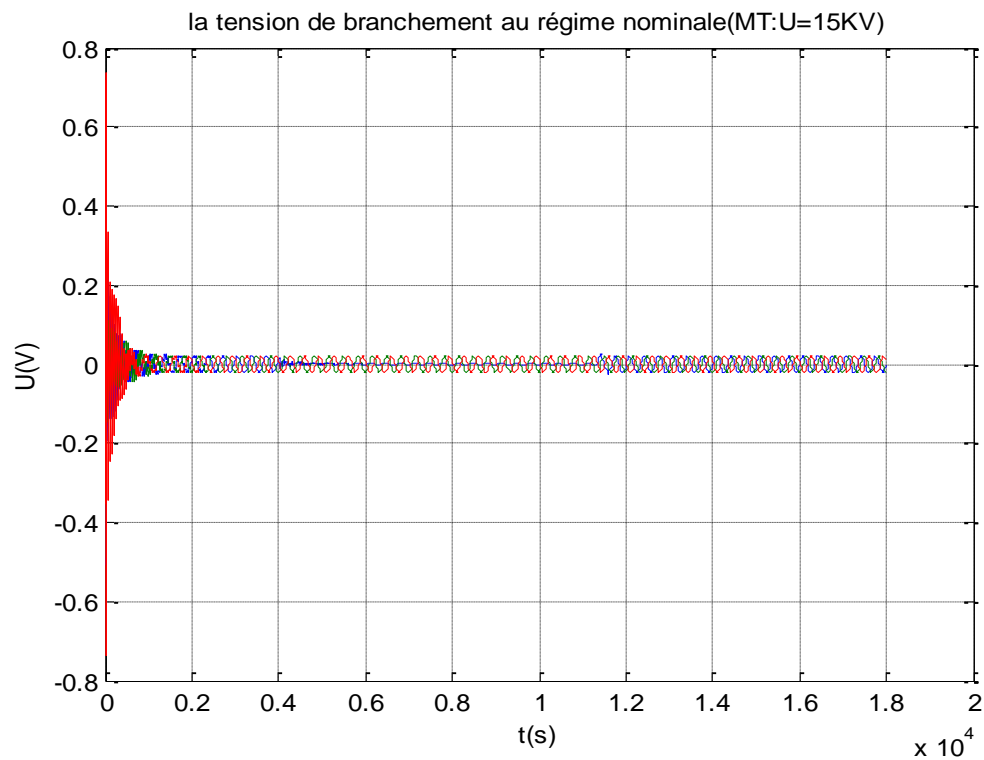


Fig V.11.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

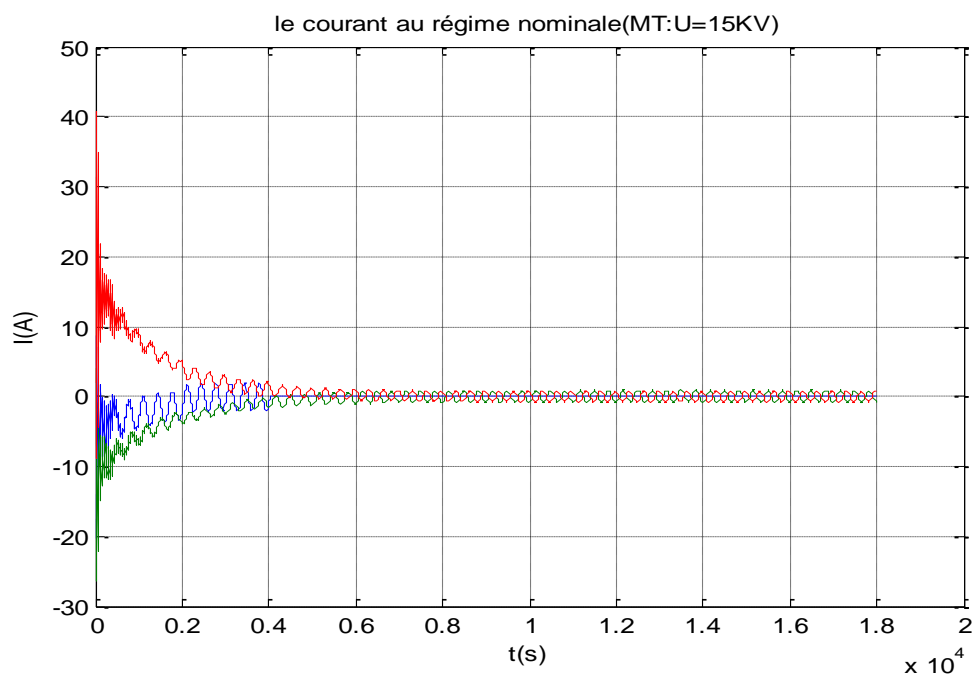


Fig V.11.b : La simulation du courant dans le régime nominale

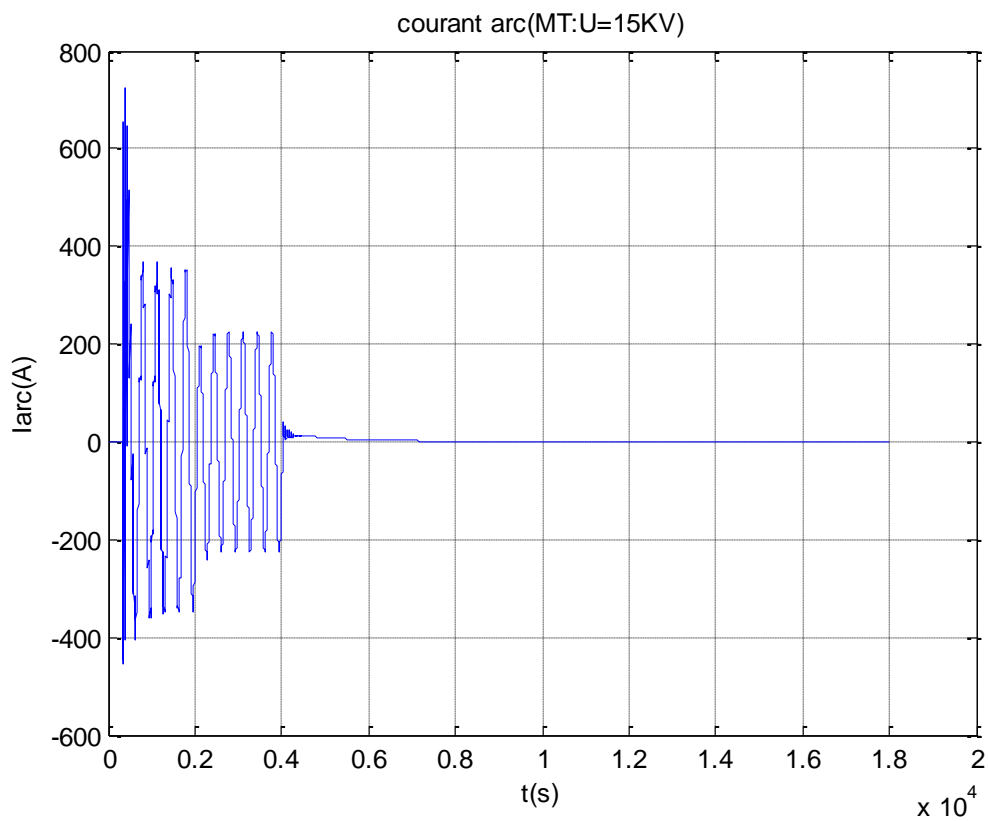


Fig V.11.c : La simulation du courant d'arc après la coupure

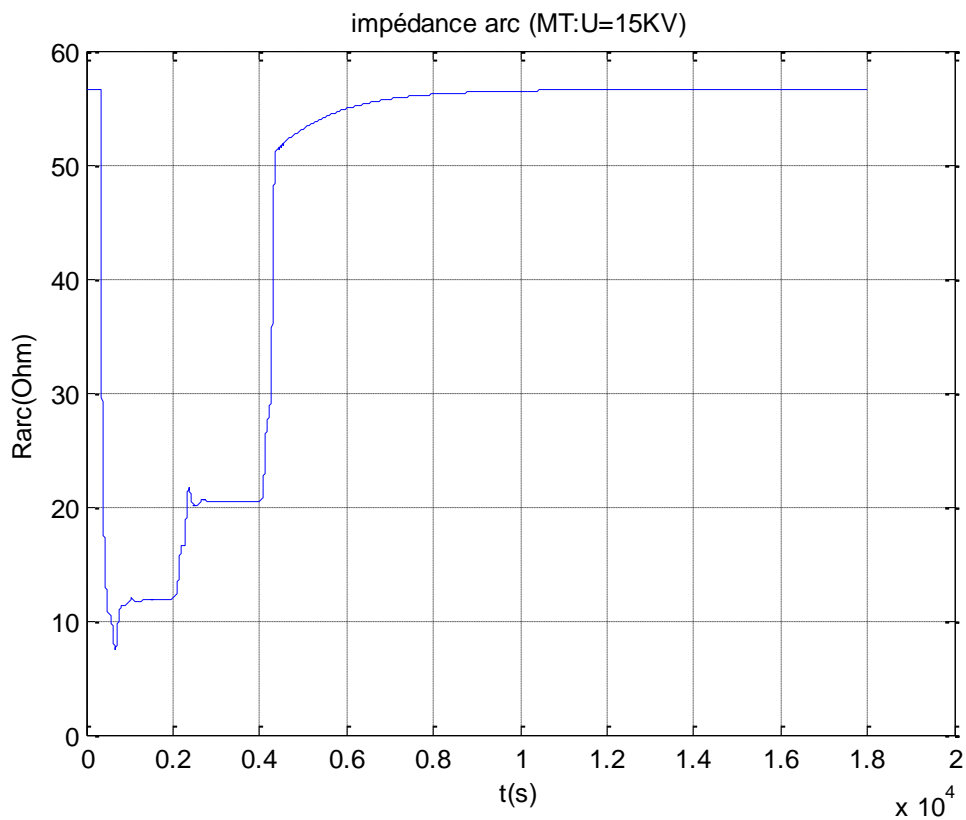


Fig V.11.d : La simulation de l'impédance au moment de la coupure

d) En moyenne tensions $U=60\text{ KV}$

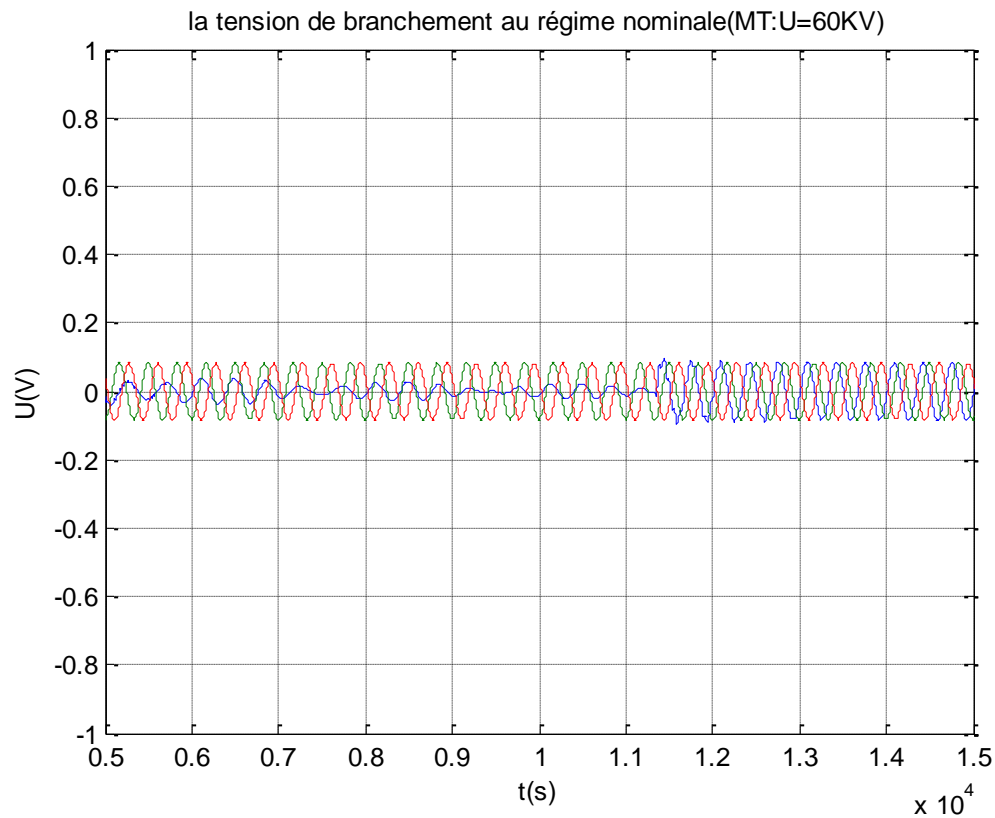


Fig V.12.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

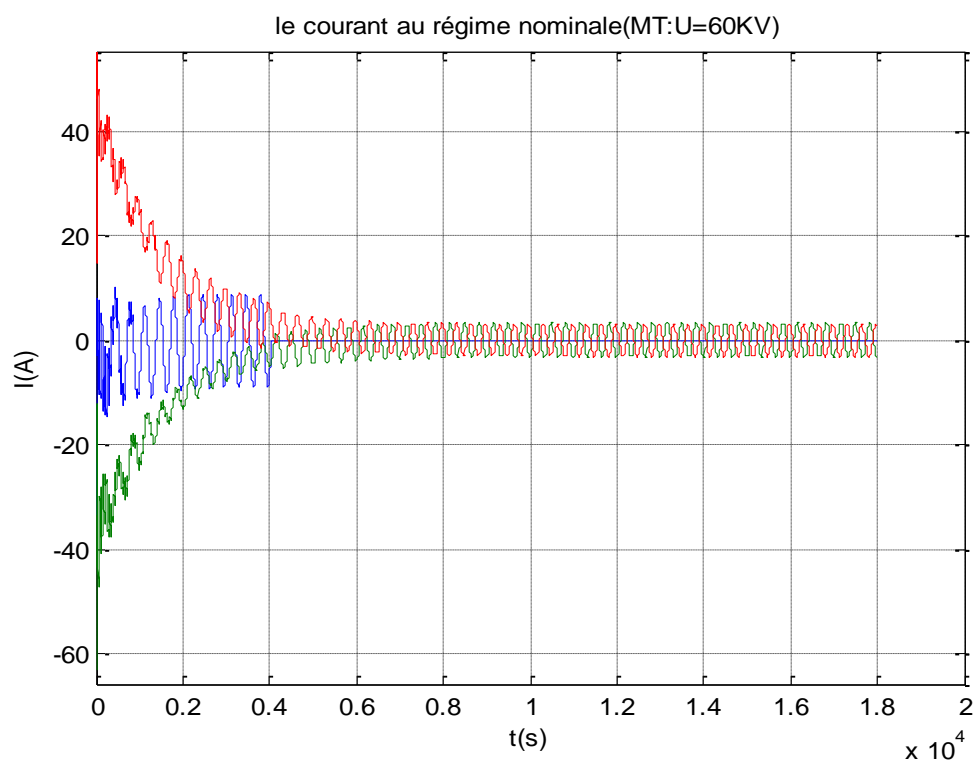


Fig V.12.b : La simulation du courant dans le régime nominale

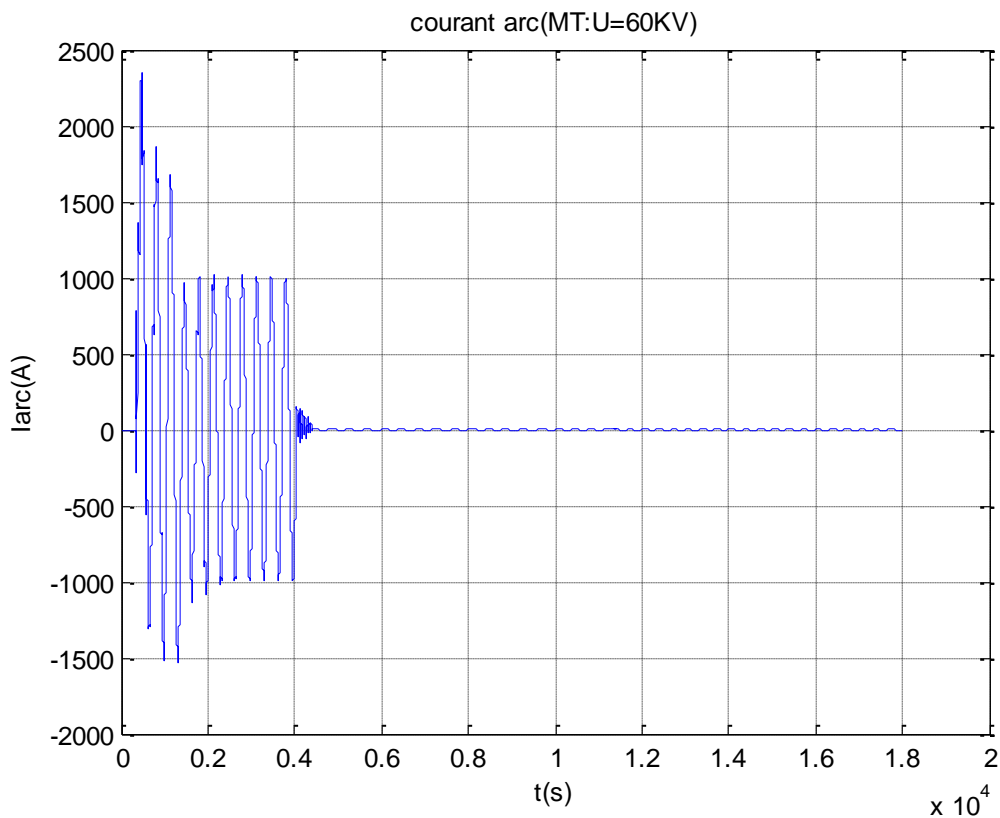


Fig V.12.c : La simulation du courant d'arc après la coupure

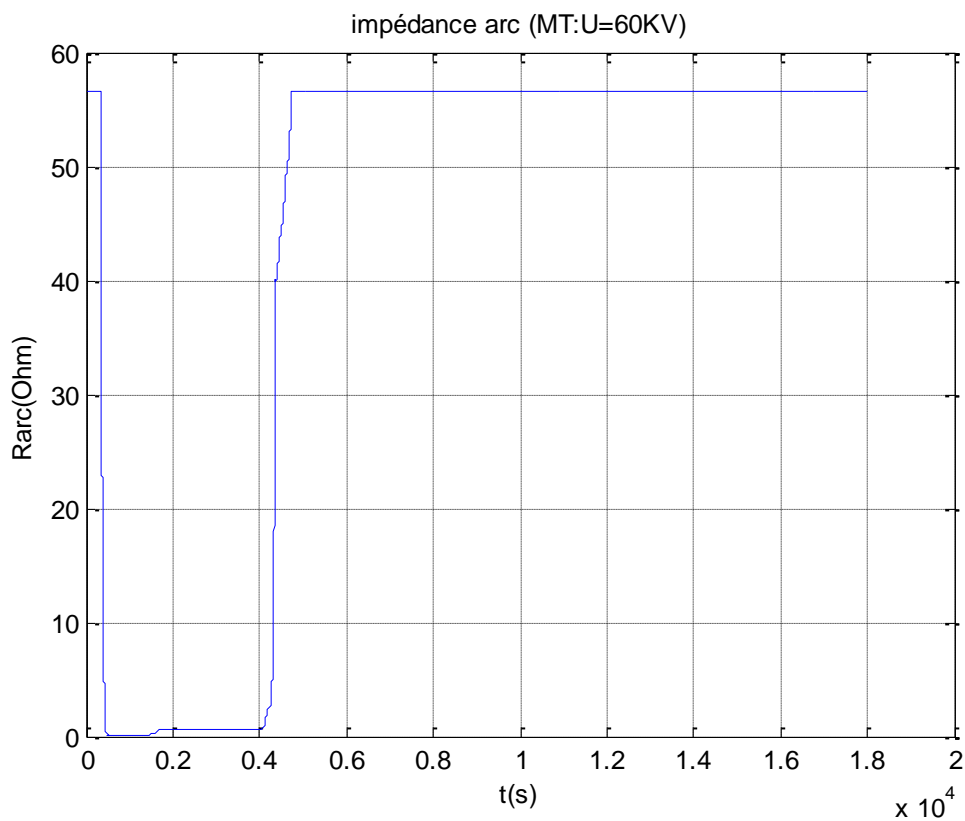


Fig V.12.d : La simulation de l'impédance au moment de la coupure

e) En haute tensions $U=150\text{ KV}$

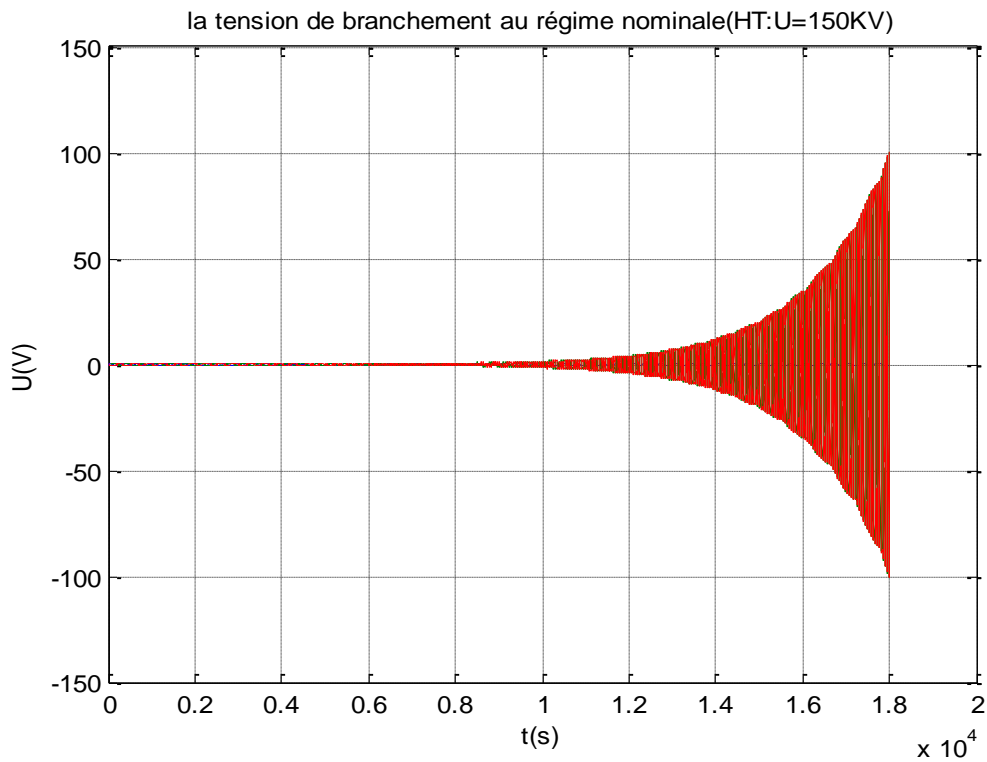


Fig V.13.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

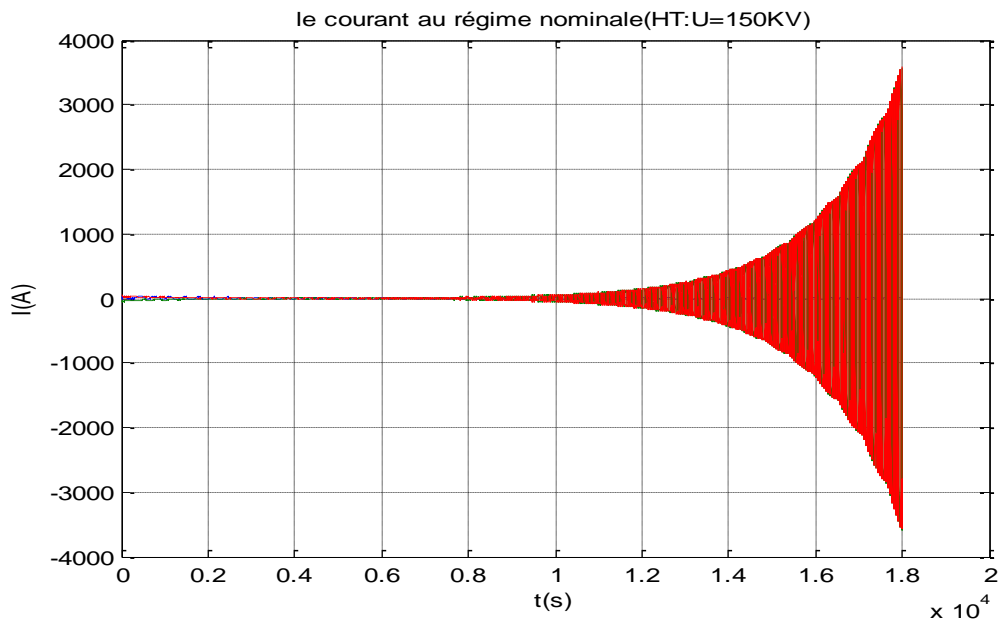


Fig V.13.b: La simulation du courant dans le régime nominale

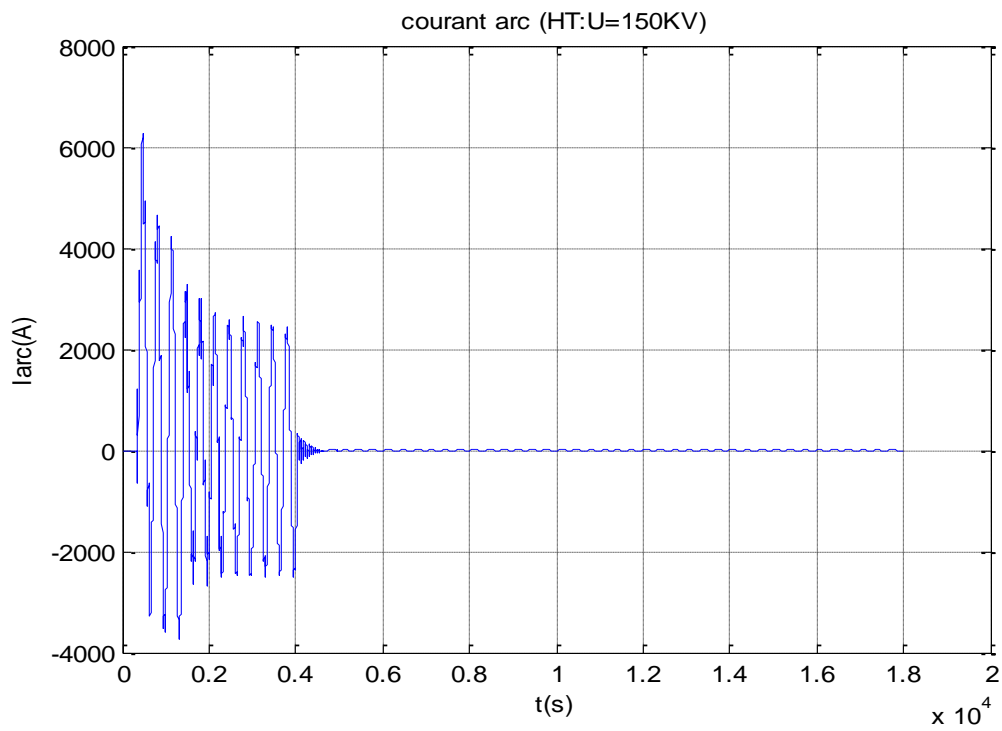


Fig V.13.c : La simulation du courant d'arc après la coupure

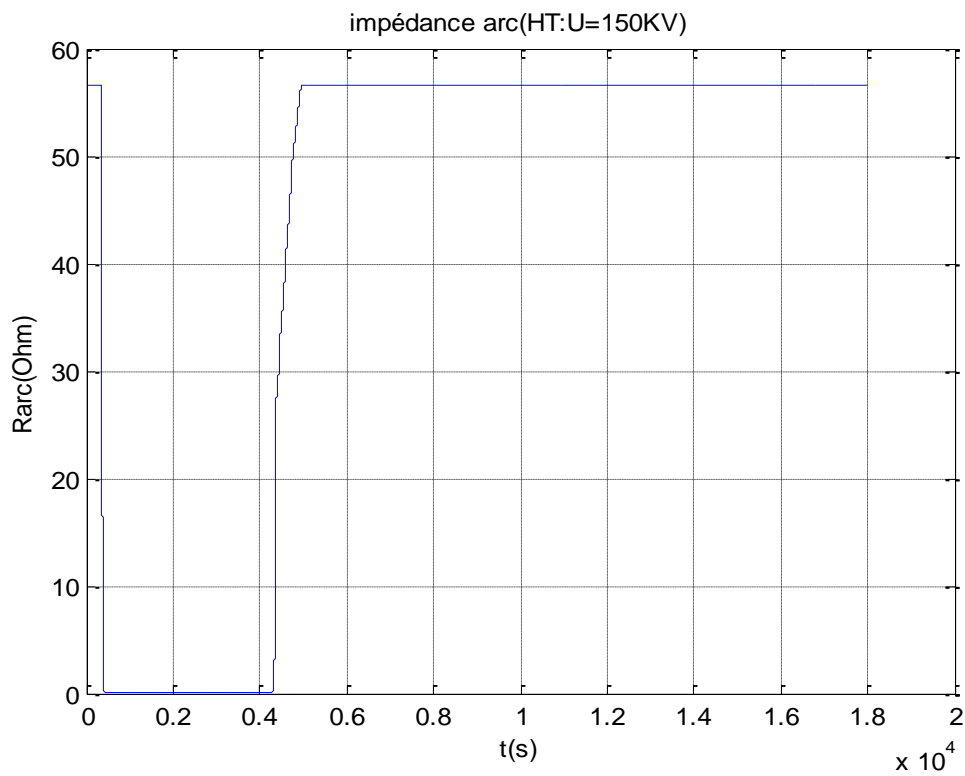


Fig V.13.d : La simulation de l'impédance au moment de la coupure

f) En haute tensions $U=220\text{ KV}$

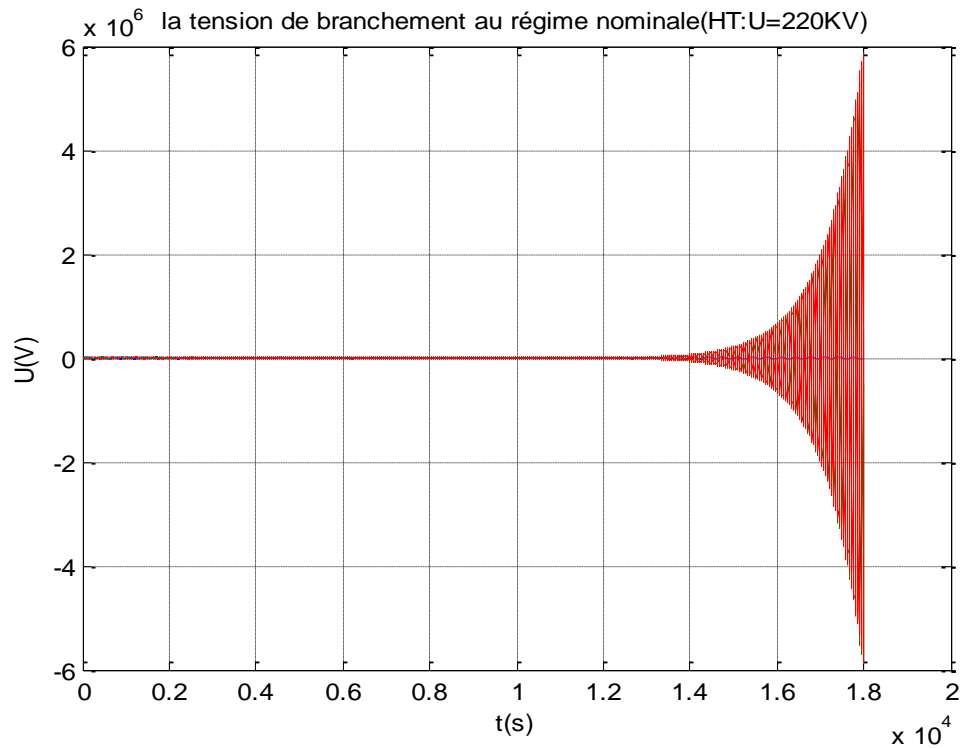


Fig V.14.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

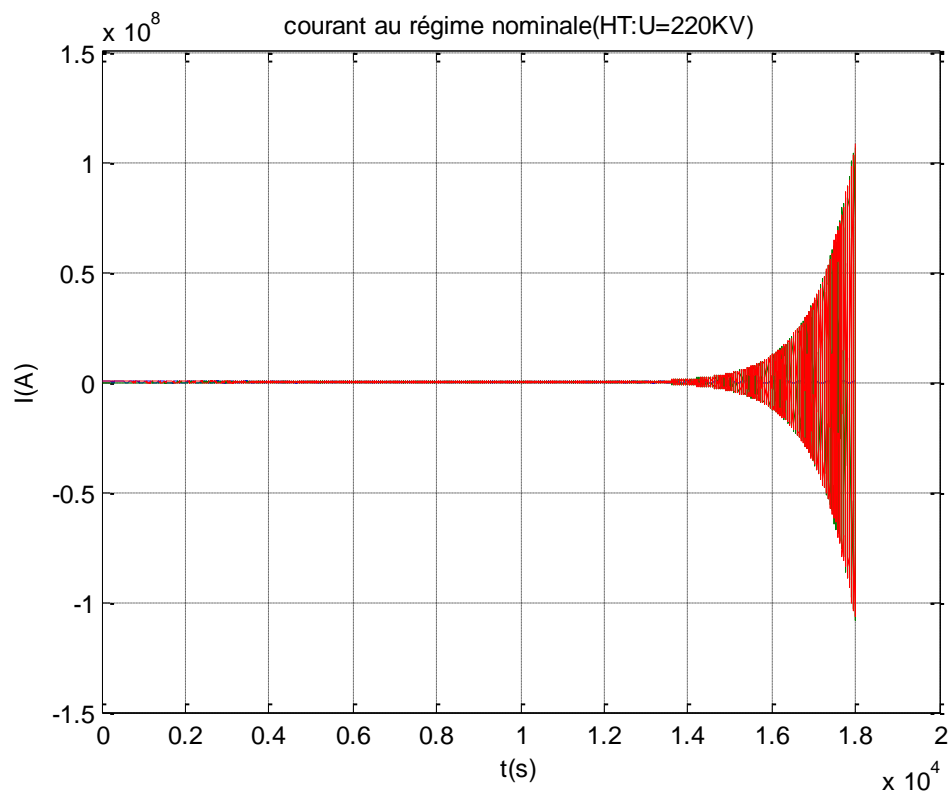


Fig V.14.b : La simulation du courant dans le régime nominale

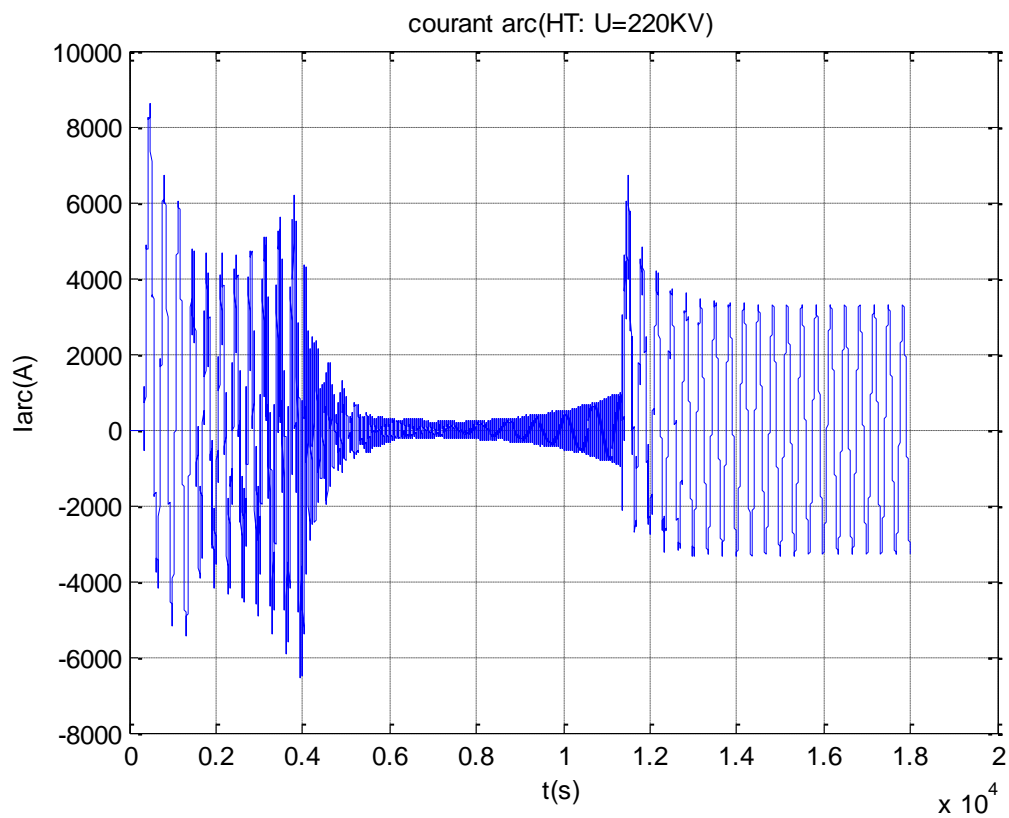


Fig V.14.c : La simulation du courant d'arc après la coupure

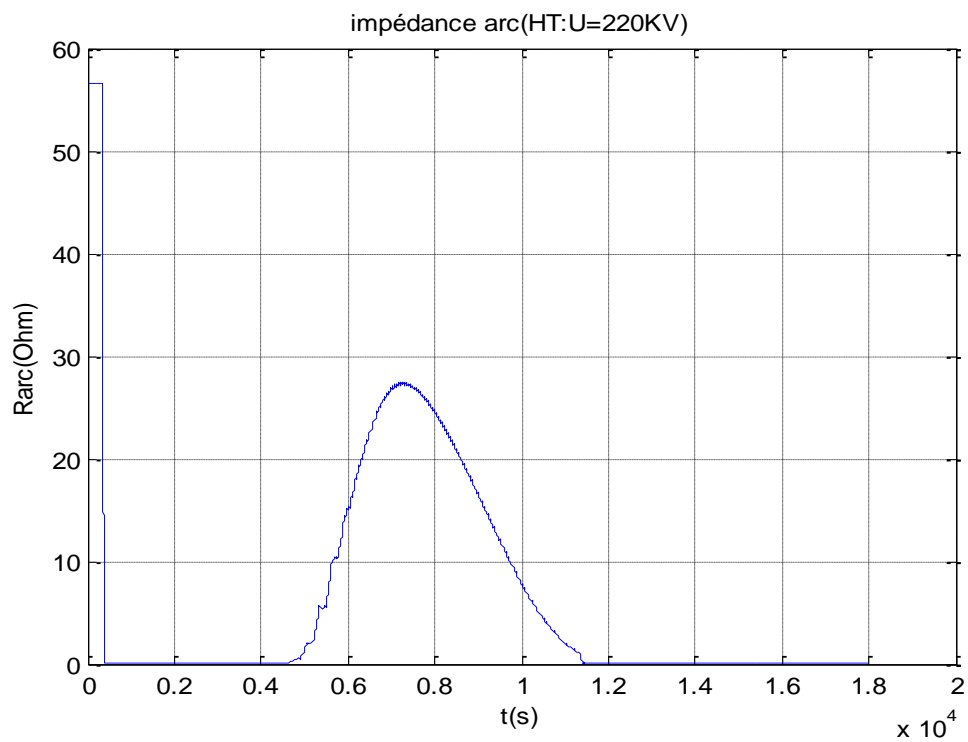


Fig V.14.d: La simulation de l'impédance au moment de la coupure

g) En très haute tensions $U=440$ KV

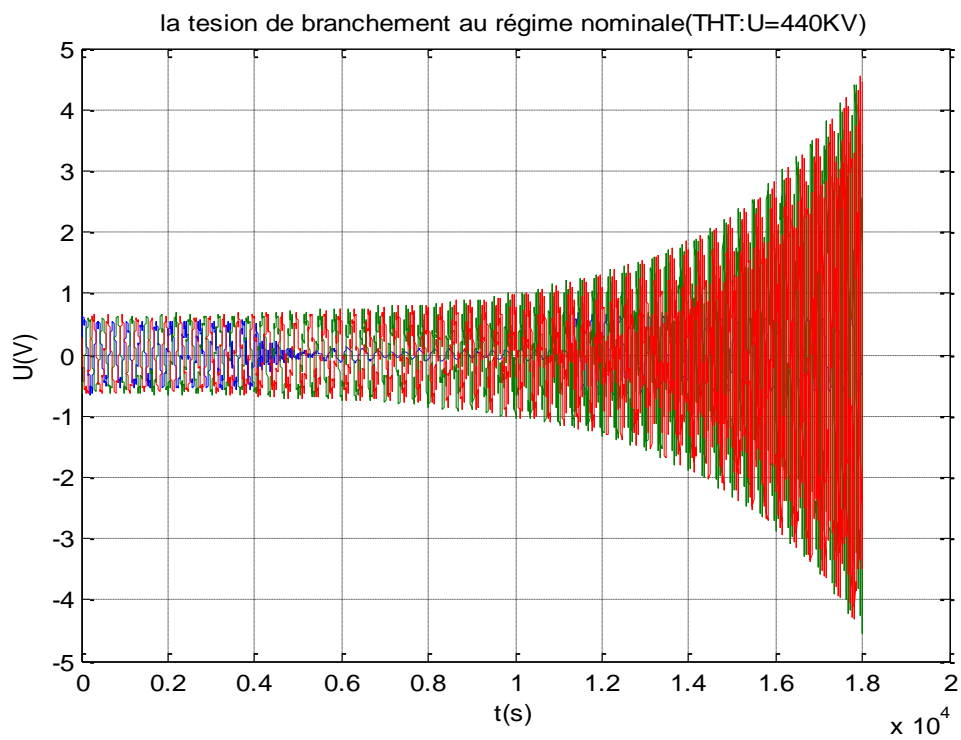


Fig V.15.a : La simulation de la tension de branchement au régime nominale

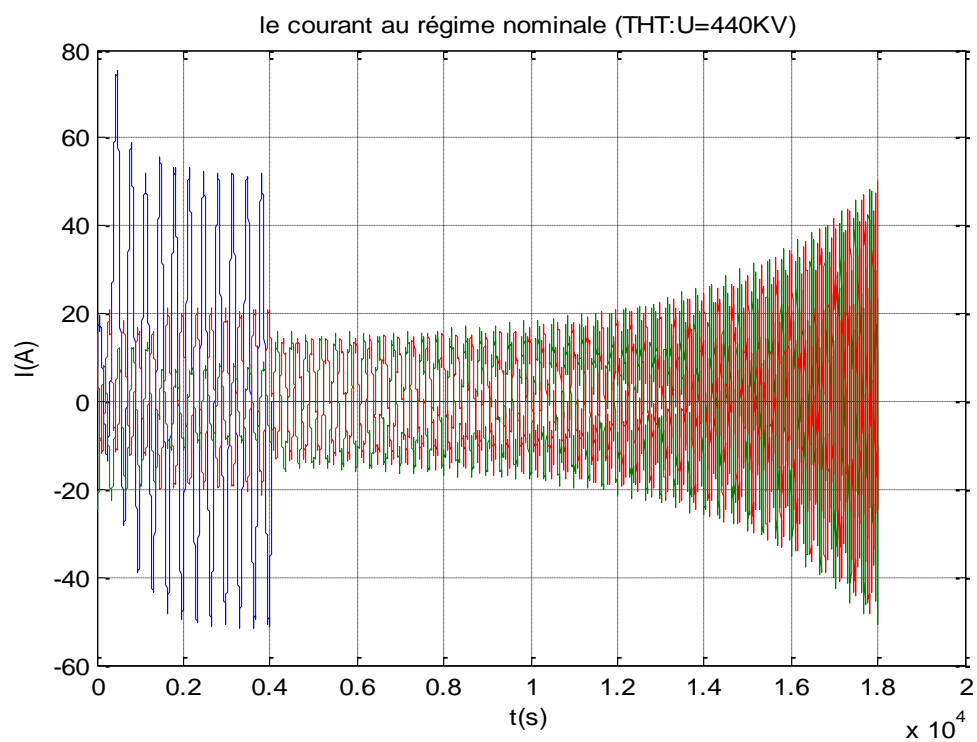


Fig V.15.b : La simulation du courant dans le régime nominale

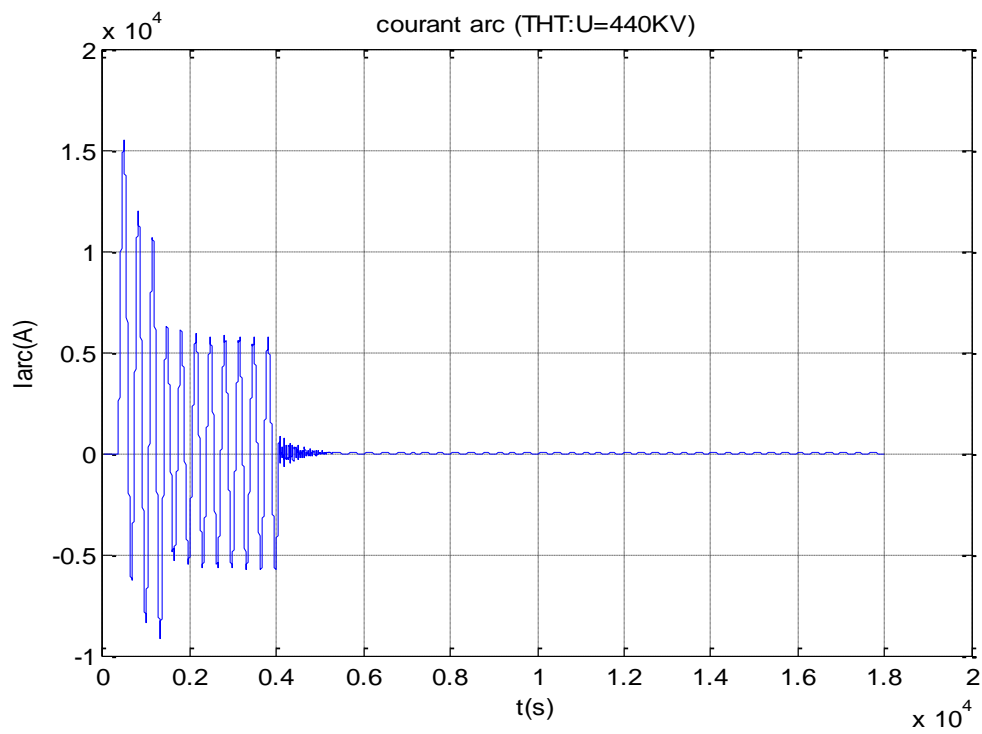


Fig V.15.c : La simulation du courant d'arc après la coupure

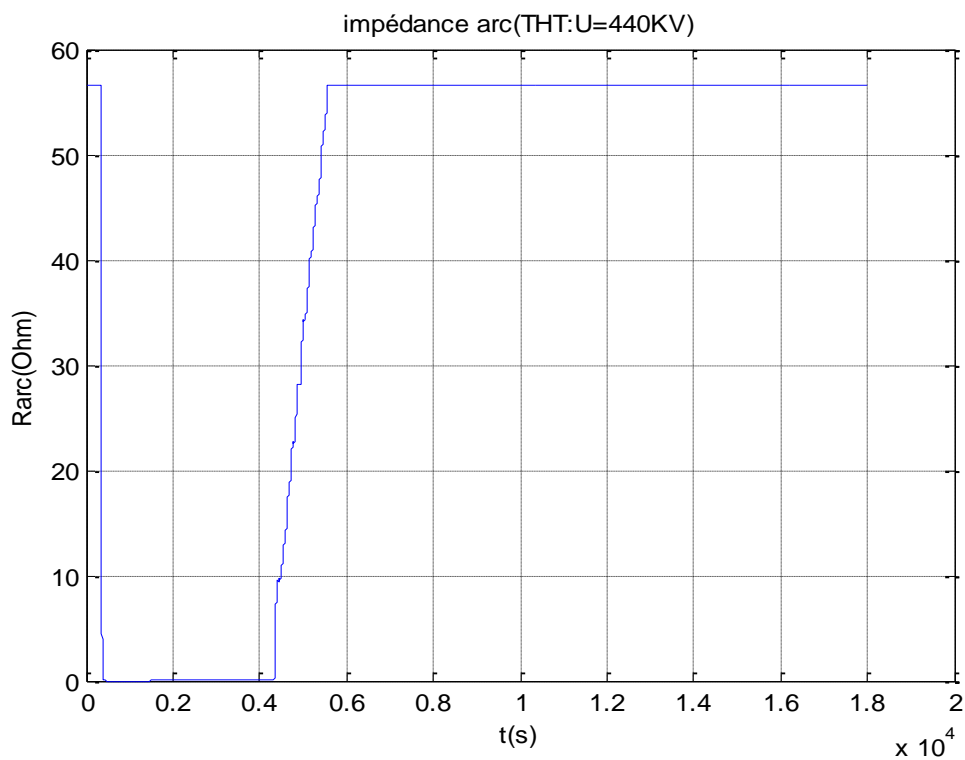


Fig V.15.d : La simulation de l'impédance au moment de la coupure

V.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu le fonctionnement du disjoncteur, son Principe de coupure et la simulation de l'arc dans disjoncteur de haute tension.

La simulation concerne le moment de coupure du disjoncteur amont **fig V.8**

Ces constantes nous donnent des courbes qui ont une analogie avec les courbes de Davy qui elles sont plus précises car les courbes de Davy sont pédagogiques mais les autres sont scientifiques sur **les figures V 9.10.11.12.13.14.a** qui représente la tension de branchement au régime nominal, **les figures V 9.10.11.12.13.14.b** le courant au régime nominal, **les figures V 9.10.11.12.13.14.c** le courant au moment de la coupure et enfin **les figures V 9.10.11.12.13.14.d** la forme de la variation de l'impédance au moment de la coupure jusqu'à l'élimination de l'arc.

VI.1 Introduction

Nous avons insisté sur le rôle fondamental joué par l'arc électrique de coupure, phénomène particulièrement délicat à maîtriser, au point qu'aucune technique d'interruption n'est parvenue jusqu'alors à dominer toutes les autres dans tous les domaines d'emploi.

Inconvénient dû à l'arc électrique :

- pas de rupture instantanée du circuit
- dégradation des contacts par micro fusion (matière arrachée) et risques de soudure
- contraintes thermiques élevées (température d'arc de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de degrés) avec risques de brûlure pour les personnes, d'incendie pour le matériel
- onde parasite, rayonnement U-V

VI.2 Moyens de lutte contre l'arc électrique et technique de coupure

La tension d'arc (formule empirique de Mme Ayrton) s'écrit :

$$U_{arc} = a + b.l + \frac{c + d.l}{I} \quad (VI.1)$$

l : Longueur

a : Chute de tension aux électrodes (V) variable en fonction de la nature des matériaux et de l'état de surface des contacts.

b : gradient de potentiel du milieu diélectrique inter contacts (V/m),

$\frac{c+d.l}{I}$: Terme souvent négligé.

→ D'où la relation simplifiée :

$$U_{arc} = a + b.l \quad (VI.2)$$

Cette relation montre que l'arc peut être perçu comme un simple récepteur « mobile » et de faible résistance monté en série dans le circuit à couper. Cet arc sera d'autant plus difficile à couper que, nous l'avons vu en partie précédemment :

- L'intensité à couper est grande, surtout en courant continu et sur des récepteurs fortement inductifs,
- La vitesse de coupure est lente.

Et on conclure aussi que la ddp U_{arc} doit être la plus grande possible de manière à « dépasser » celle de la source, même si en courant alternatif 50 Hz le passage à 0 du courant se produit toutes les 10ms. ce qui conduit à dire que :

- La longueur de l'arc doit être la plus élevée (plusieurs m en HT), et l'écartement entre les contacts suffisant,

- Le fluide isolant (air, huile...) doit disposer des meilleures qualités diélectriques, ce qui implique une déionisation correcte après coupure et donc un gradient b maximal du plasma.

Augmenter le gradient b	Augmenter la longueur L	Augmenter la vitesse V de coupure
<ul style="list-style-type: none"> • Refroidir, déioniser • Régénérer le fluide chaud par du fluide froid 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecartement des contacts. Auto allongement par air chaud ascendant et effet boucle de (Laplace). • Chemin imposé à l'arc contact à double coupure soufflage pneumatique et magnétique. 	Utilisation de : Ressorts Moteurs Air comprimé

Tableau VI.1 : Moyens de lutte contre l'arc électrique et techniques de coupure

VI.3 Grandes techniques d'interruption

Les techniques de coupure dans l'air à la pression atmosphérique, dans l'huile et dans l'air comprimé, qui jouèrent en haute tension des rôles considérables mais font aujourd'hui un peu figure de technique du passé, nous aborderont les deux grandes techniques actuelles, le SF₆ et le vide, sans oublier une technique d'avenir, la coupure statique, vouée à jouer un rôle sans cesse croissant.

VI.3.1 Coupure dans l'air

La première technique qui apparaît dans le diagramme de **la figure VI.1** est celle des appareils à Coupure dans l'air, à la pression atmosphérique, pour lesquels la dépense d'énergie est de l'ordre de grandeur de la moitié de l'énergie électromagnétique emmagasinée dans le circuit à interrompre.

Ces appareils sont les plus simples et, historiquement, les premiers qui furent utilisés.

L'air à la pression atmosphérique possède une rigidité diélectrique modeste et aucun processus physique particulier ne vient y accélérer la recombinaison des ions et des électrons, de sorte que la constante de temps de déionisation demeure relativement élevée.

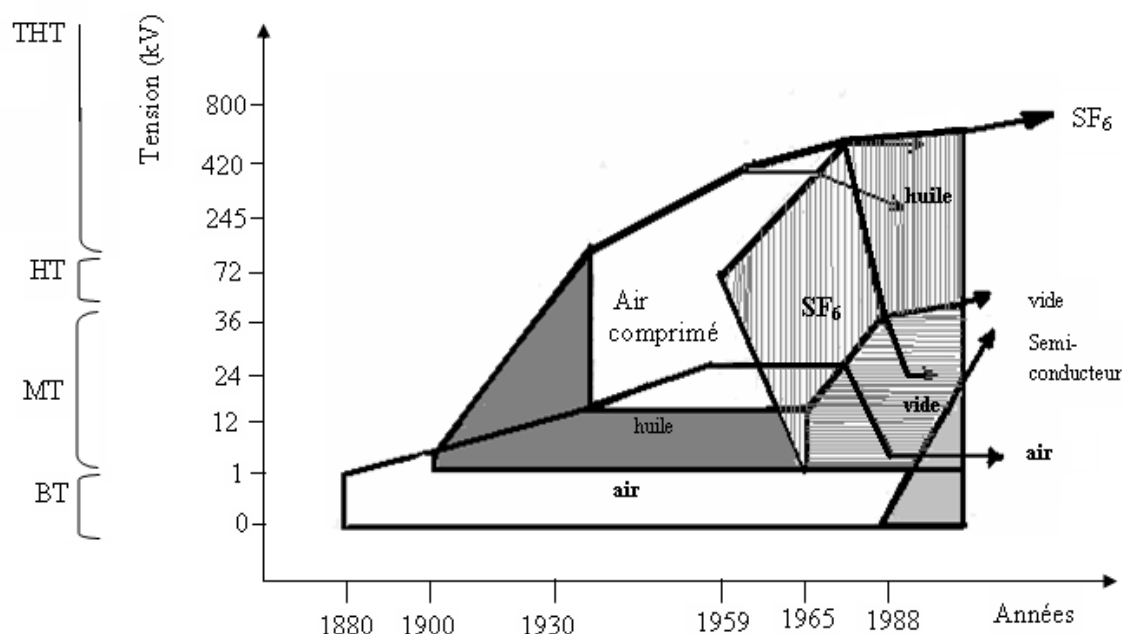


Fig VI.1 : Évolution des techniques de coupure

Les grandes technique de coupure se sont développées successivement simultanément en fonction des besoins à couine et de la disponibilité des technologies correspondantes .certaines de ces technique sont aujourd'hui en déclin, d'autres sont en plein essor. Ce diagramme s'efforce de synthétiser leur évolution historique et leur avenir probable.

VI.3.1.1 Allongement de l'arc

Si une constante de temps très faible est nécessaire au bon fonctionnement d'un appareil Classique en haute tension, il est en revanche possible de réussir une coupure en basse tension, et même en moyenne tension, avec un appareil à constante de temps élevée.

Pour autant que l'on dispose d'une puissance de refroidissement suffisante afin qu'il ne Produise pas d'emballement thermique après le zéro de courant. L'appareil achève alors la coupure en douceur un peu à la manière d'un disjoncteur à courant continu.

Or, dans le cas de la coupure en basse tension, par exemple, il n'est pas besoin d'un grand allongement de l'arc pour que la tension à ses bornes atteigne celle du réseaux ; dès alors, la puissance que peut lui apporter ce dernier devient inférieure à celle cédée au milieu environnant et (l'arc est condamné à mourir de froid).cette formule imagée résume de façon lapidaire la primauté des aspects énergétiques dans le fonctionnement de ce type d'appareils.

VI.3.1.2 Absence de surtension de coupure

Une consigne de temps importante se traduit par l'impossibilité matérielle de provoquer des surtensions de coupure, qualité absolument primordiale pour les réseaux à basse tension. Il n'est donc pas étonnant que la coupure dans l'air ait acquis une position de monopole absolu dans ce domaine, situation renforcée par de grandes simplicité et sécurité d'emploi.

VI.3.1.3 Utilisation en moyenne tension

Le succès remporté en basse tension par la coupure dans l'air a incité les constructeurs et les utilisateurs à étendre son usage vers des tensions supérieures. L'allongement final de l'arc doit alors être nettement plus important, mais il est primordial de noter qu'il n'est pas souhaitable que cet allongement se produise prématurément, alors que le courant est encore élevée, car il en résulterait des dépenses d'énergie inutiles autant que préjudiciables.

Dans la pratique, ces appareils sont donc conçus pour que l'arc demeure court tant que le courant est important et que son allongement ne devienne possible qu'à l'approche du zéro de courant ; cela peut être obtenue en jouant sur les sections de passage offertes à l'arc

Lorsque le courant décroît puis s'annule et s'inverse, il est possible. On utilisant des efforts électromagnétiques appliqués à l'arc, d'allonger suffisamment ce dernier pour que la tension à ses bornes finisse par devenir supérieure à celle du réseau (**fig VI.2**) dès lors, la coupure s'achève sans brutalité, par simple refroidissement de l'arc au contact de matériaux réfractaires.

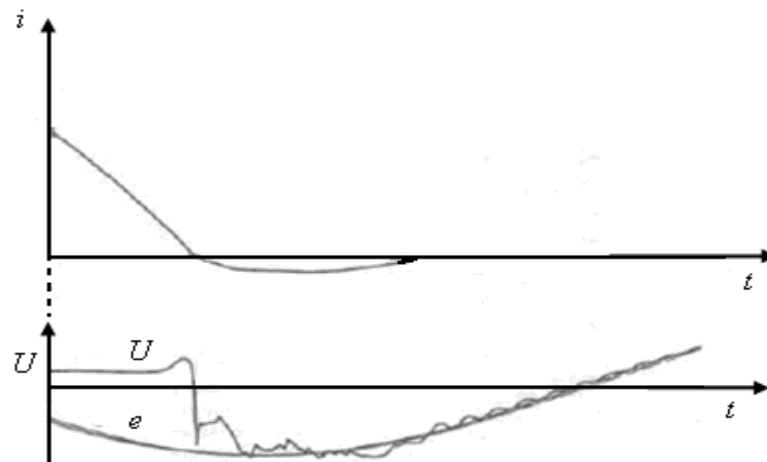


Fig VI.2 : Exemple de coupure d'un courant efficace de 8 kA sous une tension simple efficace de 17 kV à l'aide d'un disjoncteur à coupure dans l'air

- Avant le zéro, le courant i est grand, mais la résection d'arc r est faible, en sorte que ri^2 reste limité
- Après le zéro, la tension d'arc U devient élevée. mais la résistance d'arc est elle-même devient élevée importante, en sorte que i reste faible et que la puissance joule demeure à nouveau limitée.

VI.3.2 Coupure dans l'huile

La coupure dans l'huile a fait son apparition lorsque, les puissances allant en 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.

VI.3.2.1 Formulation d'hydrogène par décomposition de l'huile

Le disjoncteur à hydrogène qui venait de faire son apparition ; mais il révélateur de constater 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 ou 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 à 150 bar.

VI.3.2.2 Théorie de la bulle gazeuse

Dans les anciens appareil 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 **fig VI.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.

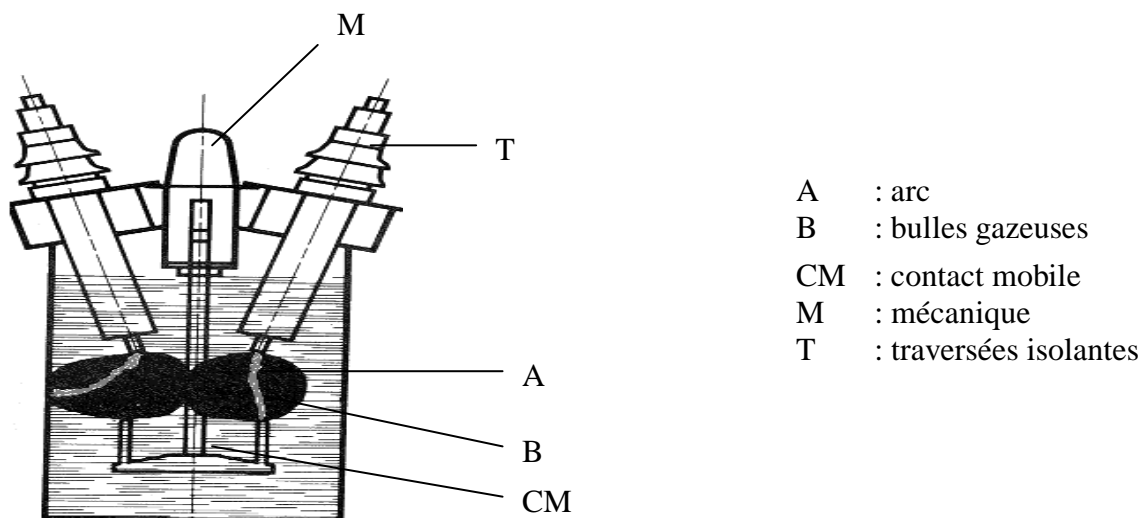


Fig VI.3 : Disjoncteur à bain d'huile : coupe schématique

Si les dimension sont insuffisantes, les bulles gazeuses peuvent communiquer entre elles ou atteindre la cuve. Une fois la coupure terminée, l'hydrogène ainsi formé remonte à la surface pour se répandre dans l'atmosphère et il existe donc toujours un moment où un mélange détonant est présent sous le couvercle.

VI.3.2.3 Appareils modernes

Les appareils modernes confinent la bulle, a fin de réduire son volume dans une chambre de coupure isolante qui résiste à des pressions très élevées. Ils utilisent des quantités d'huile incomparablement plus faible, et tout est mis en œuvre pour réduire au minimum les risques de défaillance, d'amorçage ou de projections incandescentes leur sécurité d'emploi demeure, cependant liée à leur bon état d'entretien, dont on ne peut s'assurer que par démontages périodiques longs et minutieux, ce qui dans les réseaux modernes vient à l'encontre de la nécessaire réduction des opérations de maintenance.

Les coupures répétées entraînent, en effet, la dégradation progressive des contacts, mais surtout, la décomposition de l'huile provoque non seulement la formation d'hydrogène et de gaz divers mais aussi de carbone libre qui restant en suspension dans l'huile, abaisse progressivement ses qualités isolantes **tabl VI.2**.

La coupure dans l'huile représente incontestablement la première technique ayant fait appel à un milieu d'extinction à faible face avec constante de temps d'arc ; cette propriété lui a permis de faire face avec succès aux problèmes de l'interruption des courant sous des tensions progressivement croissantes. Malgré les dangers et inconvénients inhérents à la présence d'huile minérale .il n'est donc pas étonnant que cette technique ait connu une longue période de monopole absolu en haute tension jusque vers 1930.

Energie de coupure		1 k j	10 k j
H ₂	70%	0.1 L	10 L
C ₂ H ₄	20%		
CH ₄	10%		
carbone		0.03 g	3 g

Tableau VI.2 : produits de décomposition de l'huile par arc

VI.3.2.4 Déclin progressif de la coupure dans l'huile

La coupure dans l'huile dut ensuite céder du terrain à d'autres techniques, en particulier dans les domaines supérieurs de tension, de pouvoir de coupure et de courant assigné, c'est-à-dire dans l'ensemble des hautes performances.

Si les disjoncteurs à huile restent encore présents dans le vaste marché des appareils de performances modestes et moyennes, il ne fait aucun doute que les remarquables progrès des techniques de coupure dans le SF₆ et le vide les condamnent à une disparition progressive mais certaine.

VI.3.3 Coupure dans l'air comprimé

L'usage de l'air comprimé comme milieu d'extinction de l'arc en haute tension (> 1 kV) a fait son apparition vers 1930, à la suite d'un certain nombre d'accidents graves provoqués par l'explosion et l'incendie de disjoncteurs à bain d'huile dont le gigantisme avait alors atteint son apogée. C'est donc une technique qui répond avant tout à un souci de sécurité d'emploi.

VI.3.3.1 Sécurité et hautes performances

Comme tous les gaz sous pression, l'air comprimé possède une rigidité diélectrique élevée et des performances thermiques très supérieures à celles de l'air atmosphérique. L'amélioration de ces diverses qualités est directement liée à l'accroissement de la densité moléculaire ; cela a pour effet de multiplier les collisions entre particules et d'accélérer ainsi les échanges thermiques et les réactions de recombinaison entre particules chargées c'est -dire la dés ionisation.

Comme avec l'hydrogène sous pression, on obtient alors des constantes de temps de faible valeur permettant de réaliser la coupure à l'occasion d'un zéro de courant avec des arcs relativement courts. Du point de vue pratique. Tous les disjoncteurs à air comprimé utilisent l'écoulement de ce dernier à travers des tuyères et son échappement à l'air libre, l'arc, centré dans la tuyère et balayé par le courant gazeux. Se trouve soumise à un refroidissement très énergique qui prépare et facilite la désionisation laquelle se trouve favorisée par les phénomènes de turbulence

Fig VI.4

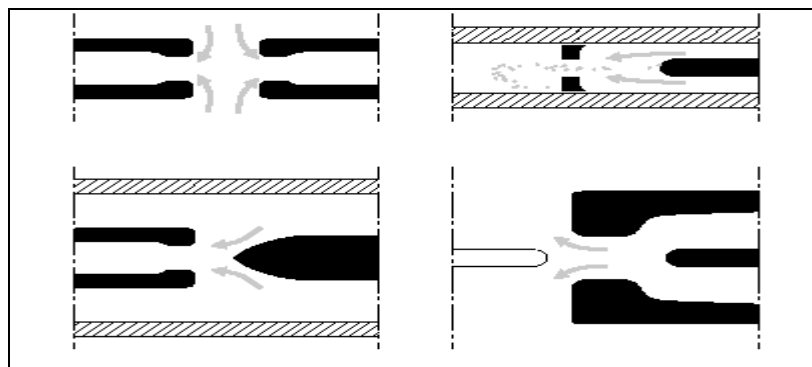


Fig VI.4: Dispositions schématiques de diverses tuyères d'appareils à air comprimé

En jouant sur la pression et le diamètre des tuyères, il est possible d'obtenir les meilleurs pouvoirs. De coupure que l'on puisse espérer.

L'air comprimé sert à la fois de diélectrique. D'agent de coupure et de fluide moteur universel, quand ce n'est pas de fluide réfrigérant comme dans certains disjoncteurs d'alternateurs.

Les appareils à air comprimé exigent un certain entretien, en particulier les stations de compression ; leur domaine d'élection fut tout naturellement celui des très hautes performances. Aux performances moyennes. La nécessité d'une alimentation en air comprimé, soigneusement déshydraté, a constitué de tout temps un sérieux handicap vis-à-vis de techniques plus autonomes.

VI.3.3.2 Domaines réservés aujourd'hui à l'air comprimé.

Après avoir été longtemps des leaders incontestés dans le domaine du transport HT. Les appareils à air comprimé ont, aujourd'hui, cédé le pas aux appareils à SF₆, que leurs multiples avantages ont fait adopter par tous les constructeurs et utilisateurs.

Il reste néanmoins à l'air comprimé quelques applications spécifiques exceptionnelles qui sont :

- les disjoncteurs de protection d'alternateurs;
- les disjoncteurs d'extérieure pour climats très rudes. Capables de répondre d'une manière satisfaisante à l'exigence de bon fonctionnement au-dessous de - 40°C. grâce en particulier à l'absence de tendance à la liquéfaction de l'air comprimé.

L'air comprimé sera peut-être. Un jour, une solution pour les disjoncteurs à courant continu THT à résonance arc- capacité.

VI.3.4 Coupure dans l'hexafluorure de soufre

Le SF₆ mérite bien que nous lui accordions une attention particulière car il est véritablement devenu aujourd'hui le gaz des constructeurs d'appareillages.

VI.3.4.1 La molécule de SF₆

Gaz de synthèse obtenu par la réaction directe du fluor sur le soufre à haute pression et température. L'hexafluorure de soufre se présente à la température ordinaire comme un gaz incolore et inodore qui possède une densité relative élevée par rapport à l'air. Du fait de sa masse moléculaire importante.

VI.3.4.2 Propriétés diélectrique de SF₆

La première des SF₆, pour un constructeur d'appareillages, se manifeste dans le domaine de la rigidité diélectrique ou, à pression égale, il se révèle supérieur à la plupart des milieux connus. Il doit cet avantage à la dimension élevée de sa molécule et aux multiples mécanismes de collisions inélastiques qui lui permettent de ralentir efficacement les quelques électrons libres. Toujours présents, que le champ électrique tend à accélérer et qui constituent les germes de la décharge
fig VI.5

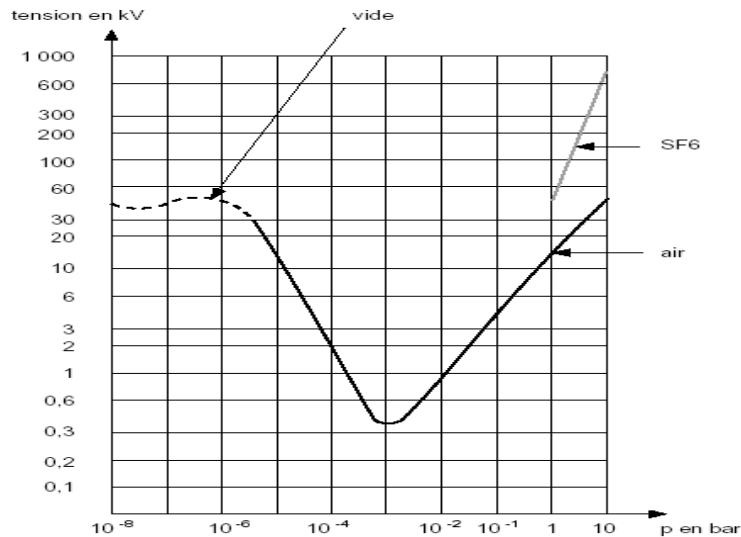


Fig VI.5 : Evolutions de la tension de claquage U_e dans l'air et dans le SF₆ en fonction de la pression

Pour cette figure, le champ électrique est faiblement inhomogène, avec une distance de 12 mm entre électrodes.

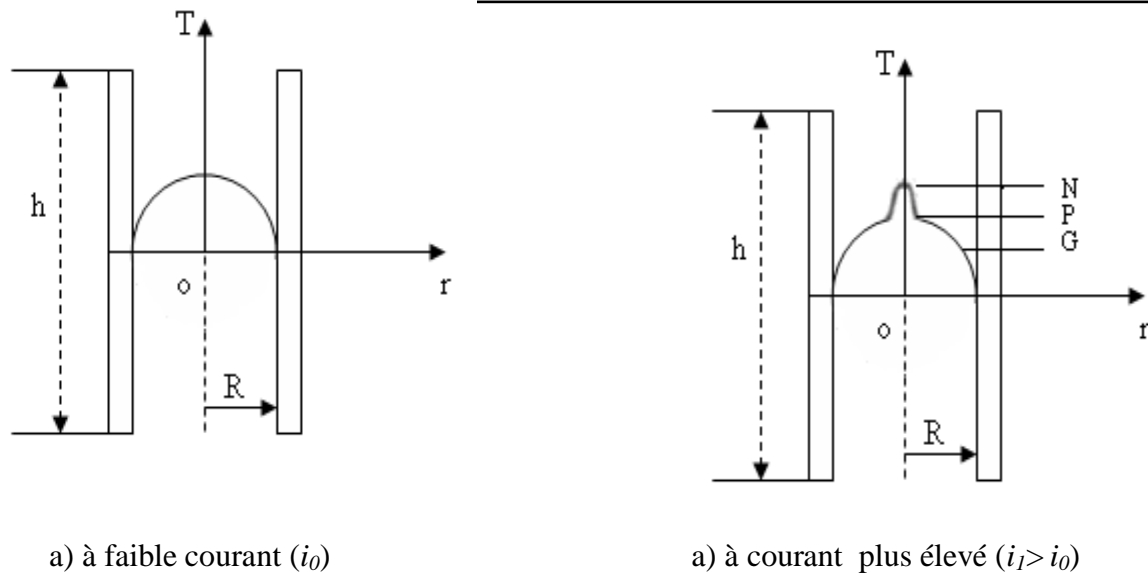
On retrouve, sur ce diagramme, le minimum de la loi de paschen a ces remarquables propriétés collisionnelles s'ajoute une curieuse aptitude de la molécule de SF₆ à couper temporairement un électron libre pour former un ion négatif, lourd, et par conséquent peu vélocité, incapable de provoquer l'ionisation. Cette aptitude résulte du caractère exceptionnellement électronégatif du fluor. Ce mécanisme de capture contribue lui aussi à retarder l'apparition de la rupture diélectrique.

VI.3.4.3 Coupure dans le SF₆

VI.3.4.3.1 Importance des propriétés thermiques de SF₆

Considérons un arc contenu dans un tube cylindrique rempli d'un gaz quelconque et parcouru un courant d'intensité constante i_0 .

Conformément à une logique intuitive, on constate que la température de cet arc est maximale au voisinage de l'axe du tube, puis décroît lorsque l'on s'éloigne **fig VI.6.a**



h : hauteur du tube
 R : rayon intérieur du tube
 r : rayon
 T : température

Fig VI.6 : Courbe de répartition de température d'un arc contenu dans un tube cylindrique

Lorsque le courant augmente, il se forme, dans la plupart des gaz, un noyau central N, séparé de la gaine G qui l'entoure par une sorte de palier P de température

VI.3.4.3.2 Formation du palier de température et du noyau central

Lorsque l'intensité du courant augmente, on observe, dans la plupart des gaz, l'apparition d'une sorte de palier thermique et la formation, au centre du tube, d'une zone cylindrique (noyau de l'arc), où la température s'élève rapidement, entourée d'une zone plus froide dénommée gaine (**fig VI.6. b**). Plus l'intensité augmente, plus la température maximale du noyau est élevée, celle du palier restant inchangée.

VI.3.4.3.3 Dissociation de la molécule

La raison de l'existence du palier est qu'il se produit un changement d'état du gaz à cette température : ses molécules se dissocient en atomes. Comme tout changement d'état, la dissociation exige une certaine dépense d'énergie, dite énergie de dissociation (égale à l'énergie de formation). Tout se passe comme pour l'ébullition de l'eau ou l'énergie de vaporisation assure un refroidissement très important et maintient la température constante à 100°C tant qu'il reste de l'eau dans le récipient.

Ici, la présence de gaz moléculaire dans la gaine, située autour du noyau de l'arc maintient fixe la température de liaison (entre le noyau central et la gaine qui l'entoure), assurant un refroidissement du noyau d'autant plus énergique que cette température est plus basse. Cela se traduit par une sorte d'hyper conductivité thermique du gaz au voisinage de la température de dissociation (**fig VI.7**)

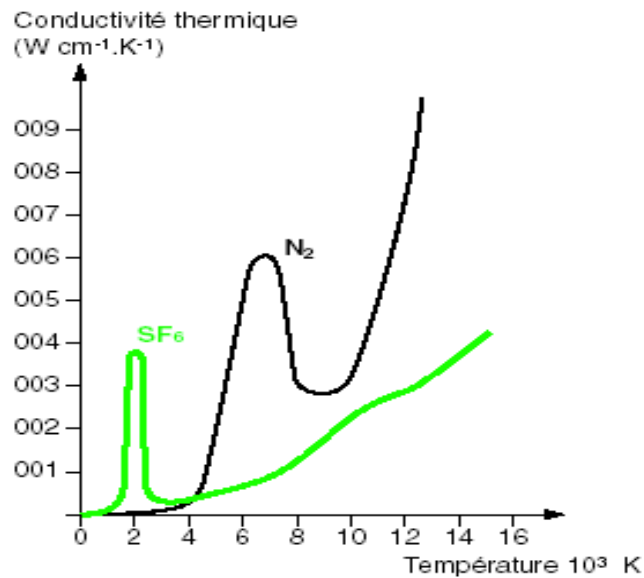
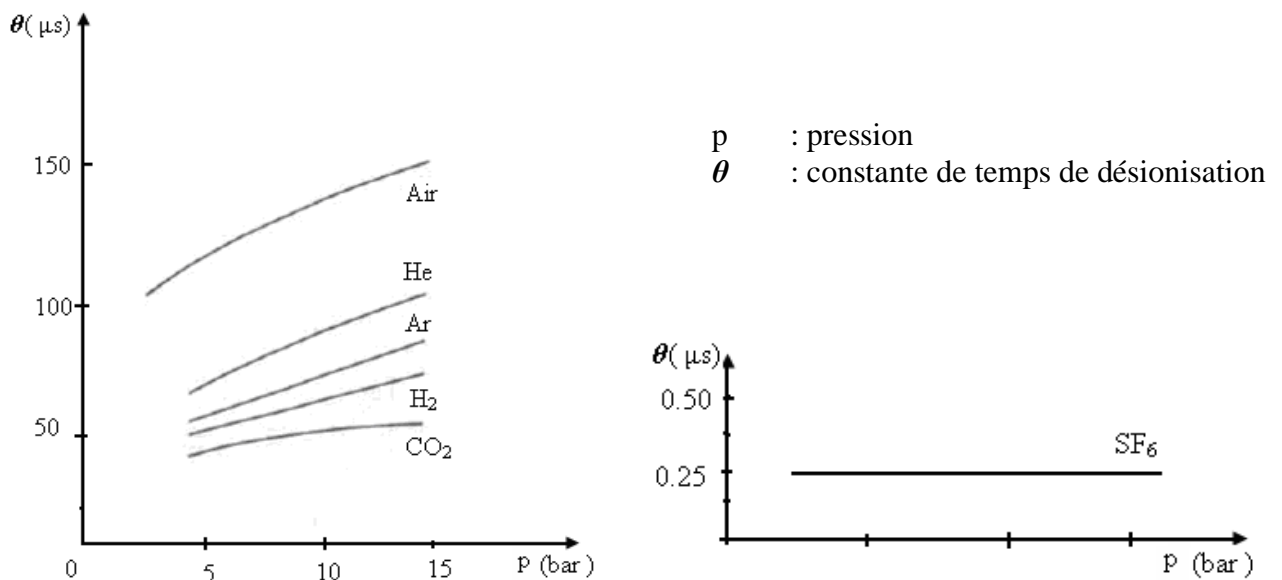


Fig VI .7 : Conductivités thermique de l'azote et de l'hexafluorure de soufre

VI.3.4.3.4 Constante de temps d'arc dans le SF_6 :

Contrairement à ce que l'on observe avec les gaz précédemment employés (N_2 , O_2 , H_2), la constante de temps de désionisation de SF_6 décroît sans cesse lorsque le courant diminue, au voisinage du zéro de courant (**figV.8**)



FigVI.8 : Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz

VI.3.5 Coupure dans le vide

Avec le vide, nous abordons maintenant une technique tout à fait originale dont les propriétés d'interruption ont été clairement mises en évidence dès 1920 ; il fallut pourtant attendre 1950 pour que les premiers interrupteurs fussent commercialisés et si en 1960, un grand constructeur américain proclama avec vigueur que cette technique allait connaître un développement à court terme, il faut reconnaître que cette prédiction s'est réalisée avec un grand retard.

VI.3.5.1 Vide diélectrique

En premier lieu, la remarquable rigidité diélectrique du vide n'est pas due, comme dans les autres milieux, aux multiples causes de ralentissement qui peuvent subir des électrons lors de collisions inélastiques avec des molécules du gaz mais, au contraire, au fait qu'il ne se produit pas de collision.

Dans un vide parfait, il n'existe donc pas de possibilité de déclencher par ionisation en cascade le mécanisme d'avalanche électronique qui entraîne la perforation diélectrique.

Dans la pratique, l'imperfection des vides réels et surtout la présence des électrodes viennent Tempérer.

Cette vision idéale, mais les performances demeurent cependant spectaculaire et un intervalle d'un centimètre par exemple, dans un vide de l'ordre de 10^{-6} mm Hg, est capable de résister à une tension de crête voisine de 200kV.

Toutefois, à l'inverse des autres milieux, la tenue diélectrique du vide augmente peu avec la distance d'isolement, ce qui limite la tension applicable à chaque intervalle de coupure, indépendamment des pressions s'élève **figVI.9**

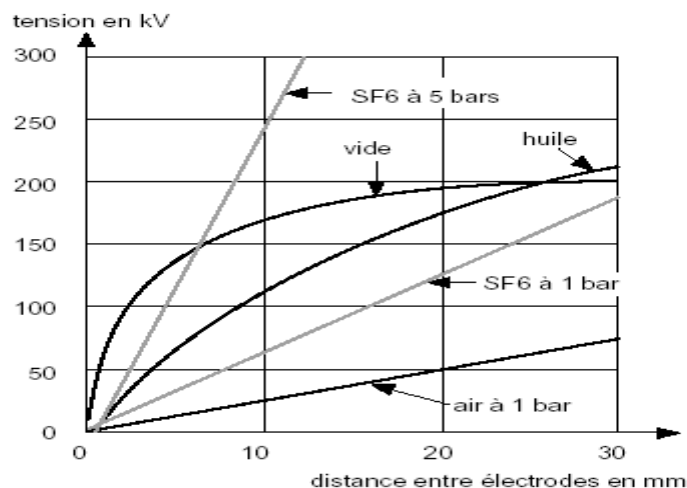


Fig VI.9 : Influence de la distance inter-électrodes sur la tension de claquage

VI.3.5.2 Mécanisme de la coupure dans le vide

Vis-à-vis de la coupure, les mécanismes sont tout aussi singuliers

VI.3.5.2.1 Formation du vapeur métallique

L'amorçage d'un arc de forte intensité dans le vide entraîne une véritable vaporisation des électrodes qui développe rapidement entre les contacts une pression dynamique pouvant atteindre des valeurs atmosphériques.

Au début, cet arc ressemble donc beaucoup à celui des autres appareils avec, en pratique, une conductrice fortement concentrée et un spot cathodique unique et incandescent dont la surface, portée l'ébullition, émet d'abondantes vapeur métalliques.

Lorsque le courant décroît, la pression de vapeur s'abaisse rapidement du fait de la condensation de ces vapeurs sur le contacts eux-mêmes et de leur diffusion vers les régions éloignées de l'arc où elle se trouve pompées en permanence par condensation sur des écrans métalliques disposées en à cet effet.

VI.3.5.2.2 Régime d'arc diffus

Au-dessous d'un certain courant, on constate que le fonctionnement de l'arc se modifie brusquement pour passer du régime de décharge concentrée à un régime de décharge diffuse. Les spots cathodiques se divise alors à grande vitesse en se repoussant mutuellement, de telle sorte qu'ils se répartissent sur toute la surface de la cathode. Le courant de chaque spot est limité à une centaine d'ampères.

Ce pondant comportement est donc très différent de celui que l'on observe avec un arc glissant dans un gaz ou une vapeur métallique sous pression .

VI.3.6 Coupure Statique

Ce panorama de techniques d'interruption ne serait pas complet si l'on n'évoquait pas l'utilisation des semi-conducteurs qui constitue, en outre, la seule alternative valable à opposer au monopole actuel de l'arc électrique. Plus encore que l'arc ne saurait le faire, leur comportement s'approche de celui de l'interrupteur idéal. ne serait-ce que par l'absence de manifestations extérieures.

Leur résistance passe d'une valeur très faible à une valeur considérable à l'occasion du passage à zéro du courant, automatiquement. Comme dans l'arc électrique. Mais, cette fois le phénomène se déroule à la température ambiante.

Malheureusement, les semi-conducteurs possèdent par nature une inertie thermique extrêmement faible qui est à l'origine de leur incapacité de supporter les fortes surcharges même pendant des temps très courts leur chute de tension directe responsable de l'effet joule, se trouve en effet localisée dans un volume de métal (silicium) infime , situé de part et d'autre de la jonction .sur des épaisseurs qui se chiffrent en micromètres.

Ainsi, bien qu'ils se trouvent extrêmement bien situés dans l'échelle des énergies de coupure à peine au-dessus de l'appareil idéal, les semi-conducteurs sont néanmoins incapables de faire face à peu de frais à cette modeste dépense d'énergie. Ils ne sont pas encore directement utilisables en lieu et place de l'arc électrique.

Cependant, les progrès ininterrompus dont ils bénéficient. Depuis des années, en matière de performances, encombrement et prix, les rendent de plus en plus aptes à pénétrer progressivement le domaine de l'appareillage.

Il faut dire que, vis-à-vis des problèmes d'interruption, les semi-conducteurs présentent de sérieux avantages qui sont :

- la réalisation de coupures idéales. Sans surtensions de manœuvre ;
- l'absence d'usure et d'entretien ;
- la possibilité de prédéterminer les performances de l'appareil

En basse tension la coupure statique est déjà une réalité et son champ d'application ne cesse de se développer. Intéressant notamment :

- les dispositifs ultra limiteurs (auto-protégés) à GTO ;
- les disjoncteurs hybrides à semi-conducteurs shuntés par arc en cas de court circuit.

En haute tension, ou plus exactement en moyenne tension. Le défi plus difficile à relever il est probable que. Dans un premier temps, c'est par le mariage avec des contacts à ouverture synchronisée que les semi-conducteurs pourront faire leur apparition dans ce domaine (**fig VI.10**) plus la synchronisation sera précise. Plus la contrainte thermique imposée aux jonctions sera réduite.

L'utilisation d'un contact A, correctement synchroniser, réduit le courant dans les diodes à une petite onde triangulaire (hachurée sur la figure), limitant ainsi fortement la contrainte thermique. Le contact B doit ensuite s'ouvrir avant que la tension de rétablissement ne s'inverse à nouveau.

Compte tenu des remarquables avantages que présentent les semi-conducteurs. Des remarquables. On peut, sans grand risque d'erreur, prédire qu'ils ont un bel avenir en perspective dans le domaine de l'appareillage de coupure.

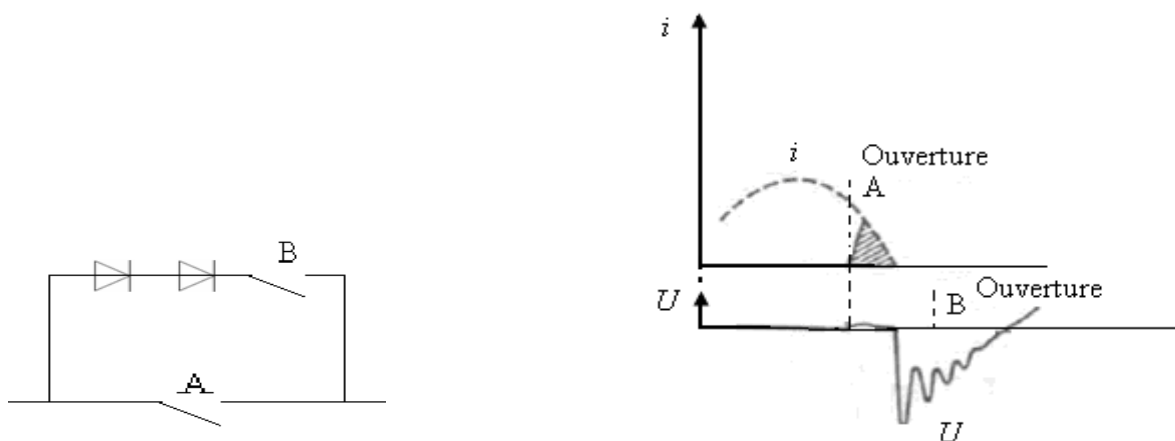


Fig VI.10: fonctionnement schématisé d'un interrupteur synchronisé à diodes

VI.4 Arc tournant

VI .4.1 Principe

Au lieu de comprimer le gaz dans un cylindre pour souffler l'arc dans l'axe d'une tuyère, on provoque le déplacement de l'arc, par rapport au gaz, à l'aide d'un champ magnétique. Le résultat est tout aussi remarquable. Cela permet de réaliser des appareils encore plus compacts,

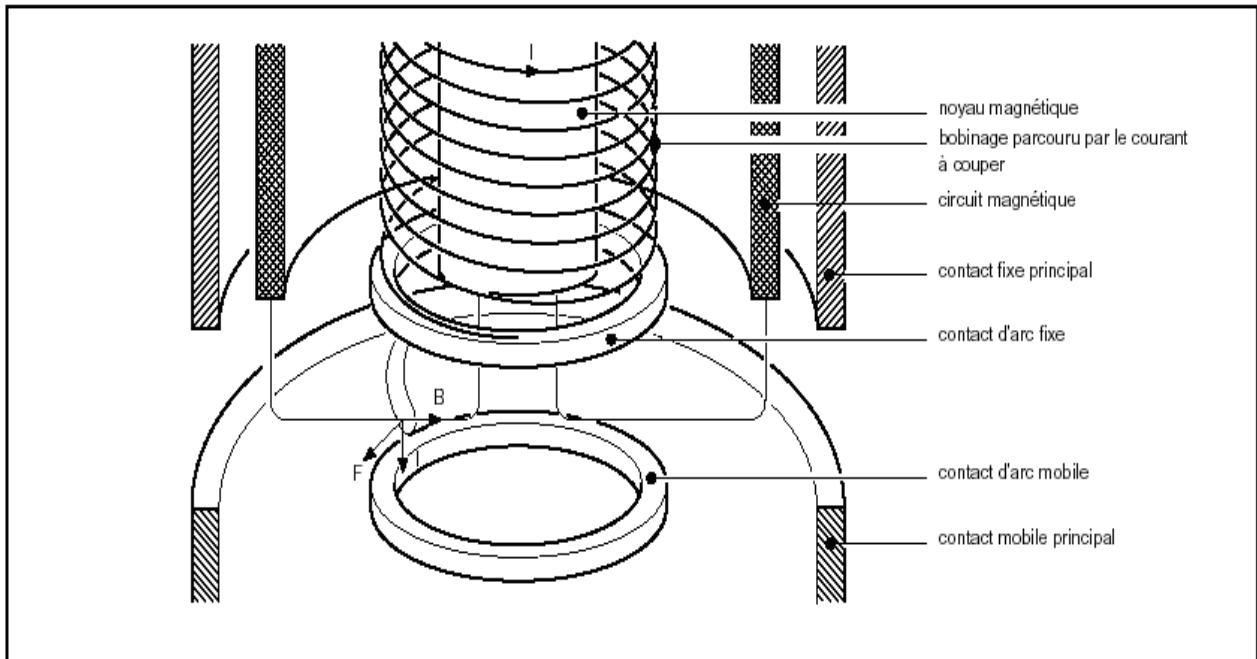


Fig VI.11: Analyse de l'arc tournant

Les contacteurs HT ont bénéficié les premiers de cette technique. Une bobine parcourue par le courant à interrompre engendre le champ magnétique qui provoque la rotation de l'arc sur les contacts en forme de pistes circulaires, protégés de l'érosion par le déplacement rapide des racines de l'arc.

Le principe de l'arc tournant est très favorable à la commande des moteurs HT, car il procure un niveau de surtension extrêmement bas, le champ magnétique étant d'autant plus faible que le courant est plus réduit.

Les performances qui peuvent être obtenues sont telles que ce principe est appliqué maintenant à des disjoncteurs de tension de plus en plus élevée.

VI .4.2 Arc tournant et auto-expansion

La dernière évolution de cette technique consiste à employer le champ magnétique produit par un aimant ou une bobine et à utiliser la dilatation du gaz, provoquée par l'arc , pour engendrer simultanément le soufflage à travers une tuyère ; c'est l'arc tournant avec auto-expansion.

VI .4.3 Sécurité d'emploi et maintenance

Comparativement aux matériels utilisant d'autres technique de coupure, la sécurité d'emploi de l'appareillage à SF₆ est essentiellement liée aux propriétés de SF₆ et la mise en œuvre de celui-ci. Le SF₆ à l'état pur (état où il est livré) ne présente aucun caractère nocif pour les être vivants ; il est aussi respirable que 'azote, parfaitement inerte chimiquement et biologiquement, il conserve totalement ses propriétés lorsqu'il est utilisé comme isolant électrique.

Le SF₆ est ininflammable mais, à haute température, il est décomposé en différents gaz qui restent normalement confinés dans l'appareillage ; ils ne peuvent se répandre à l'extérieur des enveloppes qu'à la suite d'un incident d'autant moins probable que les caractéristiques électriques de SF₆ sont obtenues avec des pressions réduites (surpressions comprises entre zéro et quelques atmosphères). Dans l'éventualité d'un tel incident, des dispositions faisant office de soupapes de sécurité sont prévues sur les réservoirs, de façon à évacuer les gaz sans fragmentation de l'enveloppe et dans une direction différente de celle dans laquelle pourraient se trouver des personnes. Outre le fait odeur caractéristique incite ces personnes à s'éloigner rapidement, la dilution dans l'atmosphère des divers gaz (dont la toxicité n'a pas pu être mise en évidence jusqu'à présent) conduit à des concentrations extrêmement faible extrêmement faibles et insuffisantes pour être la cause d'un quelconque danger.

En ce qui concerne la maintenance, l'évolution se fait actuellement vers des matériels n'exigeant pratiquement plus d'entretien préventif. Par exemple, dans les grande appareilles pour postes s'interconnexion, comme dans les poste blindés, il existe un grand nombre de joints d'étanchéité et n'est pas possible de garantir le maintien de la pression initiale de remplissage pendant toute la durée de vie de ces matériels. Il y a donc lieu de compléter de loin en loin la charge de gaz. L'espace entre de telle opérations se situe généralement entre 2 et 5 ans. Tous ces appareils sont munis de pressostats compensés en température (**figVI.12**) qui signalent toute perte de gaz atteignant la limite d'alerte (premier seuil).

Dans le cas d'un fuite accidentelle importante, un deuxième seuil, situé à une valeur de pression plus faible, déclenche automatiquement les manœuvres de sécurité.

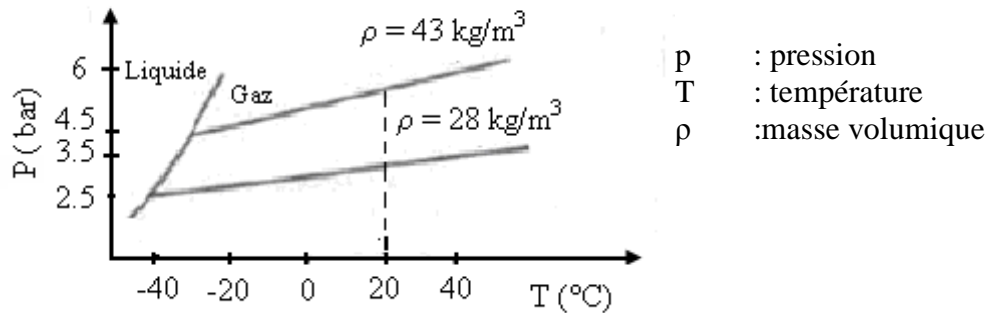


Fig VI.12: Diagramme pression -température pour différentes masses volumique de SF₆ (à 20°C)

VI.5 Choix de la solution la mieux adaptée à chaque utilisation

Parmi les diverses techniques qui s'affrontent dans le vaste domaine de l'appareillage électrique de coupure, le problème du choix de l'utilisateur consiste à sélectionner, pour chaque usage, la ou les techniques qui apporte à la fois :

- La meilleure sécurité d'emploi pour le personne et le matériel ;
- Les plus faibles contraintes de maintenance pour l'exploitant ;
- La parfaite maîtrise des surtensions de manœuvre à des niveaux nom dangereux pour le matériel ;
- La pleine aptitude à répondre aux exigences de progrès technique et de réduction des encombrements dans les conditions économiques optimales.

En fonction des caractères généraux propres à chaque technique, nous sommes efforcés dans un tableau synthétique les conditions d'utilisation les mieux adaptées à chaque d'elles (tal VI.3)

Ce tableau n'est que le reflet des considérations que deux techniques modernes douangent actuellement le domaine de l'appareillage à haute tension ; la coupure dans le vide et, surtout, la coupure dans l'hexafluorure de soufre qui couvre sans lacune la totalité de ce domaine.

Tableau VI.3 : Condition d'utilisation les mieux adaptées à chaque technique										
Critères et utilisation		Technique	Air	Huile	Air comprimé	vide	SF ₆	Postes blindés SF ₆		
								Uni-polaire	Tri-polaire	
UTILISATION	Critères (1)	Sécurité	+	-	+	+	+	++	++	
		Surtension	++	=	-(3)	-(3)	+	+	+	
		Maintenance	+	-	=	+	+	+	+	
		Encombrement	-	=	=	+	+	+	++	
		Coût d'investissement	-	+	-	=	=	-(4)	=	
	MT (2)	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution <ul style="list-style-type: none"> - Poste source - Coupure d'artères - Interrupteurs aériens • Industrie <ul style="list-style-type: none"> - Tableaux principaux - Contacteur HT - Disjoncteur de grande endurance • Centrales <ul style="list-style-type: none"> - Auxiliaires - Disjoncteur d'alternateurs 	<p>○</p> <p>●</p> <p>⊗</p> <p>○</p> <p>●</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>				<p>⊗</p> <p>○</p> <p>⊗</p> <p>⊗</p> <p>○</p> <p>○</p>			
		HT (2)	<ul style="list-style-type: none"> • postes intérieurs • postes extérieures - pas de problème d'environnement - problème d'environnement 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>●</p> <p>○</p>			<p>○</p> <p>⊗</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>⊗</p> <p>⊗</p>
			THT (2)	<ul style="list-style-type: none"> • postes intérieurs • postes extérieures - pas de problème d'environnement - problème d'environnement 					<p>⊗</p> <p>⊗</p>	<p>⊗</p> <p>⊗</p>

(1) Comportement général vis-à-vis du critère concerné :
 ++ excellent
 + bon
 =Satisfaisant
 - Peu satisfaisant

(2) Comportement général vis-à-vis de l'utilisation concerné :
 ○ très bon adapté
 ⊗ Bon adapté
 ● Utilisation avec réserves

(3) Les surtension peuvent être maîtrisées par l'emploi de dispositifs additionnels (par sur tenseurs, capacités, résistance auxiliaires)

(4) Le coût plus élevé du poste blindé peut être rapidement compensé dans certains cas par le gain possible sur le coût du terrain.

VI.6 Conclusion

Aujourd'hui, le principal handicap de l'appareil classique réside dans leur encombrement, conditionné par les dimensions des chambres de coupure et les distances d'isolement dans l'air. Les techniques modernes d'interruption dans le vide et dans le SF₆ ont permis de réduire de manière importante les encombrements, ainsi que le coûts des appareils.

Conclusion Générale

Le travail effectué dans ce mémoire, contribue à l'étude des Propriétaires physiques, électriques de l'arc électrique, les étudier Sous tension continue et alternative.

Nous avons insisté sur le rôle fondamental joué par l'arc électrique de coupure, phénomène Particulièrement délicat à maîtriser, au point qu'aucune technique d'interruption n'est parvenue jusqu'alors à dominer toute les autre dans tous les domaines d'emploi.

On a fait une simulation numérique de l'arc électrique dans un disjoncteur de Haute tension car ce dernier 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,

De par ses caractéristiques, le 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 soit endommagé par ce court-circuit

Pour ce la on a fait une simulation numérique du courant de court-circuit. D'après la simulation en MATLAB on a vu que les courts circuits entraînent l'augmentation considérable du courant qui dépasse beaucoup le courant du régime normal et la diminution importante de la tension, cette baisse de tension peut troubler le fonctionnement des récepteurs électriques et du poste d'interconnexion.

Et finalement en passe à la coupure du courant électrique par un disjoncteur à haute tension qui obtenue par techniques de coupure dans l'air à la pression atmosphérique, dans l'huile et dans l'air comprimé, qui jouèrent en haute tension des rôle considérables mais font aujourd'hui un peu figure de technique du passé, nous aborderont les deux grandes technique actuelles, le SF₆ et le vide, sans oublier une technique d'avenir, la coupure statique.

L'utilisation de l'hexafluorure de soufre a considérablement augmenté dans les appareils de coupure des circuits à haute tension dans les réseaux de distribution d'électricité. le SF₆ présente des propriétés physico-chimiques qui rendent son utilisation favorable telles que sa haute rigidité diélectrique et une bonne conductivité thermique pour une température voisine de 2000 K.

L'ensemble de ces propriétés permet un refroidissement rapide et une forte électro-négativité ce qui favorise la disparition des électrons dans le plasma en extinction.

Les techniques modernes d'interruption dans le vide et dans le SF₆ ont permis de réduire de manière importante les encombrements, ainsi que le coûts des appareils.

Bibliographie

- [1] : Guide de conception des réseaux électriques industriels Schneider Electric
- [2] : METZ-NOBLAT «Calcul des courants de court-circuit » Cahier Technique Schneider Electric n° 158 édition septembre 2005.
- [3] : Mme Laure REYNARD « Modélisation tridimensionnelle de l'amorçage de l'arc électrique dans un disjoncteur basse-tension », Thèse de doctorat Soutenue le 03 Février 2006 devant la Commission d'Examen.
- [4] : **D.KOCH** « Propriétés et utilisation du SF₆ dans les appareils MT et HT », Cahier technique, n° 188.
- [5] : Gonzalez Jean-Jacques « Etude d'un disjoncteur haute tension » Thèse de doctorat.
- [6] : G.pinson physique Appliquée «Appareillage de commande et de protection » Appareillage - C12 / 2.
- [7] : jean-Marc Bauchire «Simulation numérique d'un arc électrique » Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés.
- [8] : Yves PELENC « Appareillage électrique d'interruption à haute tension » technique de l'ingénieur, D4700a.
- [9] : EDOURD KABADANIAN« arc électrique » 27/12/2003.
- [10] : J-B.BELHAOUARI, J-J GONZALEZ, A.GLEIZES « Modélisation 2D de l'extinction d'un arc électrique de SF₆ en déséquilibre chimique » centre de physique des plasmas et de leur application de Toulouse ESA n° 5002.
- [11] : M. SALANNE JEAN-PHILIPPE «Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation. », Thèse de doctorat Soutenue le 18/11/2005.
- [12] : institut en Génie de l'énergie électrique «électricité industrielle », EIE4458/IGEE408 jean Tessier-BBA 2006/01/17.

Bibliographie

- [13] : JACQUES HENNEBERT DAVID GIBBS «disjoncteurs Fluarc au SF6 et protection des moteurs MT», cahiers techniques Merlin Gerin n° 143.
- [14] : Robert Morel «techniques de coupure des disjoncteurs BT », Cahier Technique Merlin Gerin n° 154.édition décembre 1994.
- [15] : Georges Bernard «la coupure par auto-expansion », Cahier Technique Merlin Gerin n° 171 édition décembre 1993
- [16] : Philippe PICOT «La coupure du courant électrique dans le vide », Cahier Technique Schneider Electric n° 198, Avril 2000.
- [17] : PIERRE CHEVRIR « simulation numérique de l'arc électrique écoulement gazeux dans disjoncteur moyenne et haute tension », Thèse de doctorat Soutenue le 22/05/1990.
- [18] : FETTAH A. « Etude et analyse du réseau est algérien en 60 Kv et 90Kv » Soutenue en juin 1989.
- [19] : F Buret et A Beroual « Détecteur optique de phase liquide dans un disjoncteur au SF6 sous pression » AVRIL 1991,
- [20] : Gonzalez - Aguilar, J. « Etude théorique et expérimentale de plasma pour des applications industrielles : découpe par plasma », Thèse de doctorat Soutenue en 1999, à l'Université de Cantabrie, Département de physique appliquée, Espagne
- [21] : B. DE METZ-NOBLAT« Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques», Cahier Technique n° 18-.
- [22] : B. DE METZ-NOBLAT« Les calculs sur les réseaux électriques BT et HT», Cahier Technique n°213.
- [23] : Claude BERNARDIN «Les courants de court circuit » 27 avril 1999
- [24] : Jean-Pierre TOUMAZET « Systèmes de coupure de courant Disjoncteurs basse tension Dynamique de l'arc » 06 Octobre 2006 Bonascre.

Bibliographie

[25] : Roche Christiane « L'arc électrique » 2007

[26] : Denis Dufournet « Disjoncteurs SF₆ » évolution de 1959 à 1994, Revue Générale de l'Électricité Mai 1994, n°5

[27] : Browne Jr (T.E.), Leeds (W.M.) - CIGRE Session « Un nouvel agent d'extinction pour l'appareillage d'interruption » 1960, Rapport n°111

[28] : Jacques Vigreux - Bulletin «Contribution au développement de l'appareillage à hexafluorure de soufre » la société Française des Electriciens, octobre 1962

[29] : Ruben Carlomagno IUFM de Lorraine «Les Disjoncteurs » avril 1999

[30] : EDGAR DULLNI «Physique de la coupure du courant de court circuit dans les disjoncteurs à vide»,5/1993

[31] : S. THEOLEYRE Les «techniques de coupure en MT», Cahier Technique n°193 1998