

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou**



**Faculté de génie électrique et de l'informatique**

**Département d'électrotechnique**

# **Mémoire de fin d'étude**

**En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat**

**En électrotechnique**

**Option : Réseaux électriques**

## **Thème**

**Etude des surtensions d'amorçage d'arc  
dans un réseau de tension nominale  
110kV**

**Proposé et dirigé par :**

**Mr.: MUFIDZADA N.A**

**Etudié par :**

**Mr.: KACHIH Mohammed**

**Mr.: ZOREIK Hakim**

**Promotion : 2010/2011**

# Remerciement

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à notre promoteur Monsieur MUFIDZADA.N.A Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, de nous avoir proposé ce sujet et de nous avoir encadré , pour sa disponibilité permanente, pour son aide, ses orientations ainsi que pour les conseils précieux qu'il n'a cessés de nous prodiguer qui ont contribué énormément à l'élaboration de ce modeste mémoire.*

*Notre reconnaissance va particulièrement à Monsieur H. HOUASSINE, Maître de conférence classe B, chargé de cours à l'université de Médéa, pour ses précieuses aides, pour ses conseils, sa courtoisie si raffinée et ses qualités humaines.*

*Par la même occasion, nos remerciements vont également à tous les responsables du laboratoire de recherche (Laboratoire De Conception Et De Conduite Des Systèmes De Productions) en particulier Monsieur T. OTHMANE CHERIF, de nous avoir permis de suivre notre travail au sein de ce dernier.*

*Nous ne saurons terminer nos remerciements sans exprimer notre profonde gratitude à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de notre travail, ainsi que à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*Enfin, nous adressons nos vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.*



**Dédicaces**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :  
Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'éclairer la vie et à qui je dois tout ;*

*mes chères grands parents paternels Arezki et Dahbia et mon cher grand père maternel  
Arezki; et à la mémoire: de ma très chère et regretté grande mère maternel Dahbia que dieu  
l'accueille dans son vaste paradis*

*Mes frères (Belaid et Mustapha) et mes sœurs (Zahia, et Chahira);*

*Ma sœur Fazia et son mari Youcef sans oublier son petit ange Bilal ;*

*A ma chère amie Karima que j'estime beaucoup et j'espère qu'elle sera ma future femme, sa  
sœur Louiza et leurs famille;*

*Tous mes oncles et tentes et leurs familles;*

*Tout mes cousins et cousines, en particulier : Amar, mouloud, Smail, Brahim et sans oublier  
ma grande famille en France ;*

*Mes très chers oncles (Said et Belaid) et leur famille;*

*Mon très cher ami Farid que j'estime beaucoup et sa famille;*

*Touts mes amis : Amar, Kadir, Nasim, Marzouk, Ali, akli, Mourad, Yacine, Hakim, Hacene,  
Madjid, Belaid, ...;*

*Mon très cher ami et collègue Amar et sa famille ;*

*Toute personne qui pense à moi de proche ou de loin;*

*Tous les étudiants de département électrotechnique et de la cité 1<sup>er</sup> Novembre d'Oued-Aissi.*

*Hakim*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'éclairer la vie et à qui je dois tout ;*

*A la mémoire de mes grands parents ; que dieu les accueille dans son vaste paradis.*

*Mon cher frère Smaïl et mes chères sœurs (Souad, Amel, Fatma, et Zohra) ;*

*Ma sœur Razika et son mari Hamid à Londres ;*

*Ma chère et ma future femme Zahia que j'aime beaucoup et sa famille.*

*Tous mes oncles et leur famille ;*

*Mohand akli, idir et ahcene, Omar, Tahar*

*A toutes mes tentes et leurs familles : amti zehour, malika, cherifa, fadma*

*Tout mes cousins et cousines, en particulier : Mourad, Fouad, Yousef ,...Saïd et sa famille au Canada ,hamza, Fadkila, Djamila et leurs familles, Nassima, Naima, Dalila, Souad et leurs familles ,Yasmina ainsi toute ma grande famille soit en Algérie ou a l'étrangers ;*

*Mes très chers amis Saad, hacène, Arezki, Omar, Brahim, Lotfi, m'hena que j'estime beaucoup ;*

*Touts mes amis : Samir, Kader, Nassim, Hicham, moh, Meziane, Samy, idir...*

*Mon très cher ami et collègue Hakim et sa famille;*

*Toute personne qui pense à moi de proche ou de loin;*

*Tous les étudiants de département électrotechnique et du C.D.E.T.H.*

*MOHAMMED*



# Sommaire

## Sommaire

---

Introduction Générale .....	1
1) Généralités sur les réseaux électriques.....	3
1.1) Généralités sur les réseaux électriques.....	3
1.2) Différentes structures de réseaux .....	3
1.2.1) La structure maillée .....	3
1.2.2) La structure bouclée .....	4
1.2.3) La structure radiale.....	4
• Alimentation en antenne .....	5
• Alimentation en coupure d'artère .....	5
1.3) construction du réseau .....	6
1.3.1) Les lignes .....	6
a) Définition et composants .....	6
• Les conducteurs .....	6
• Les pylônes .....	6
• Les isolateurs.....	7
• Le fil de garde .....	8
• Les jeux de barres .....	9
b) Types des lignes .....	9
1.3.2) Les transformateurs .....	9
a) Définition .....	9
b) Types des transformateurs .....	10
b-1) Transformateurs monophasés .....	10
• Réalisation .....	10
• Principe de fonctionnement du transformateur .....	10
• Construction .....	11
b-2) Transformateurs triphasés .....	12
• Description .....	12
• couplage des enroulements.....	13
1) Indice de couplage .....	13
2) Différentes couplage .....	14
c) Classification des transformateurs .....	14
d) Les transformateurs de mesures .....	16
1) Les Transformateurs De Tensions .....	16
2) Les Transformateurs De Courant .....	16
e) Echauffement et refroidissement des transformateurs.....	16

## Sommaire

---

1°) L'échauffement .....	16
• Les pertes joule .....	16
• Les pertes fer .....	16
• Les pertes par hystérésis .....	16
• Les pertes par courant du Foucault .....	17
2°) Le refroidissement .....	17
• Refroidissement à air .....	17
• Refroidissement à l'huile .....	17
• Refroidissement par radiateur d'huile .....	17
1.3. 3) : les dispositifs de protection contre les surtensions .....	17
a) Les éclateurs .....	18
• Fonctionnement .....	18
• Avantages .....	18
• Inconvénients .....	19
b) Les parafoudres .....	19
• Définitions .....	19
• Type des parafoudres .....	20
2°) Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO) .....	21
• principe de fonctionnement .....	21
• Caractéristiques .....	23
• choix des parafoudres à oxyde de zinc .....	24
II. Les régimes de neutre .....	26
Introduction .....	26
II.1.1) Les différents régimes de neutre .....	26
II.1.1.1) Neutre isolé .....	27
a) Avantage et Inconvénients .....	27
• Avantage .....	27
• Inconvénients .....	28
II.1.1.2) Neutre mis directement a la terre.....	28
a) Avantage et Inconvénients .....	28
❖ Avantages .....	28
❖ Inconvénients .....	29
II.1.1. 3) Le neutre mis à la terre a travers une résistance .....	29
a) Avantage et Inconvénients .....	30
❖ Avantages .....	30
❖ Inconvénient.....	30
II.1.1.4) Le neutre mis à la terre via une réactance (bobine de Peterson) .....	30
a) Avantage et Inconvénients .....	31
❖ Avantages.....	31

## Sommaire

---

❖ Inconvénients.....	31
<b>III. Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique .....</b>	<b>32</b>
<b>III.1 Les surtensions dans les réseaux à moyennes tensions .....</b>	<b>32</b>
<b>III.1.2 .Définition des surtensions .....</b>	<b>32</b>
<b>III. 2) Origine des surtensions .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2.1) Les surtensions externes .....</b>	<b>32</b>
III.2.1.1) Le phénomène de la foudre .....	32
III.2.1.2) Mécanisme du coup de foudre .....	33
III.2.1.3) Schéma électrique équivalent.....	34
a) Impact direct dans le conducteur d'une ligne aérienne .....	35
b) Impact direct dans le fil de garde .....	35
c) Impact dans un pylône mis à la terre .....	36
III.2.1.4) Forme d'onde de la foudre .....	36
<b>III.2.2) Surtension d'origine interne .....</b>	<b>36</b>
III.2.2.1) Surtensions de manœuvres .....	36
III.2.2.1.a) Surtension due à la coupure d'un courant inductif .....	37
III.2.2.1.b) Surtension due à la coupure d'un courant capacitif .....	38
III.2.2.2) Surtensions par Ferro-résonance.....	38
<b>III.2 .2.3) Surtension provoquée par un défaut d'isolement .....</b>	<b>40</b>
III.3.1.4) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti) .....	41
III. 3) Théorie de l'arc électrique dans les réseaux à moyenne tension .....	41
III.3.1) Définition d'un arc électrique : un arc électrique est un courant de la	
III.3.2) Naissance d'un arc électrique .....	41
III.3.3) Modélisation de l'arc électrique .....	42
A) Les équations d'arc .....	42
B) Les essais D'Arc.....	43
C) Les résultats de Simulation D'Arc .....	47
4.3 Extinction des arcs de défaut.....	49
Conclusion.....	51
<b>IV. Etude des surtensions d'amorçage d'arc dans un réseau de tension</b>	
<b>nominale 110kV .....</b>	<b>52</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.1) Définition du réseau .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.2) schéma équivalent de réseau.....</b>	<b>53</b>
<b>IV-3): calcul des paramètres du réseau.....</b>	<b>53</b>

## Sommaire

---

IV.3.1): calcul des paramètres des lignes $l_1$ et $l_2$ .....	53
Calcul de la résistance (R) .....	53
• Calcul de l'inductance (L) .....	54
• Calculs des capacités .....	54
➤ Ligne1 .....	55
1) Résistance.....	55
2) Inductance.....	55
3) capacités .....	55
➤ La ligne 2 .....	56
1) résistance .....	56
2) L'inductance.....	56
3) Les capacités .....	56
➤ Le jeu de barre .....	56
4) La IV-3-2): calcul des paramètres des charges $ch_1$ et $ch_2$ .....	57
1) La charge 1 ( $ch_1$ ) .....	57
2) La charge 2 ( $ch_2$ ) .....	57
IV-4) Simulation et interprétation des résultats.....	58
• Simulation avec neutre isolé de la terre .....	59
• simulation avec le cas de neutre mis directement à la terre .....	62
• Simulation avec le neutre mis à terre à travers les différentes valeurs de R = (10, 20, 50 et 100) .....	63
IV-4-2 : simulation avec grands courants capacitifs (compensation des courants capacitifs) .....	65
• simulation avec le neutre mis à la terre via une réactance (bobine de Peterson) .....	65
IV-4-6) L'influence de l'extinction de l'arc lors de passage du courant transitoire sa valeur 0 et le passage du courant de 50Hz (le courant forcé) de sa valeur 0 .....	66
IV-4-7) L'influence de l'élément de neutre (isolé, mis directement à la terre, mis à la terre via R=50 et L=0.25H) .....	69
Conclusion générale.....	71
Bibliographie .....	72
Annexes.....	75

# **Introduction Générale**

### **Introduction Générale :**

L'énergie électrique joue un rôle moteur dans l'économie moderne dont son intégration inévitable dans toutes ces composantes : l'industrie, le transport, ....etc. cela impose aux producteurs d'électricité d'assurer la continuité de l'alimentation surtout pour certains secteurs stratégique où la coupure peut leur causer des pertes importantes soit au terme de matériels où au terme de la production. Alors le réseau doit être bien dimensionné et bien protégé pour réduire les coupures d'énergie électrique aux maximums.

Les réseaux électriques sont toujours exposés à des phénomènes dangereux de toute nature, telle que les surintensités, les surcharges, et les sursensions, qui peuvent engendrer les défauts d'isolation sur les points les moins rigides, ce qui provoque des dangers sérieux sur les équipements. Les spécialistes dans le domaine ont toujours consacré leurs temps pour chercher des solutions les plus adéquates pour fiabiliser la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique. Cela par un choix plus au moins fidèle de régime de neutre selon la nature du réseau ainsi que les protections (par relais, par disjoncteurs automatiques et rapide, les parafoudres...etc.).

Le choix de la mise à la terre du neutre des réseaux a été longtemps un sujet de controverses, compte tenu de l'impossibilité de trouver un compromis unique pour les différents types des réseaux. L'expérience acquise permet aujourd'hui d'effectuer un choix pertinent en fonction des contraintes propres à chaque réseau.

Ce travail présente et compare les différents types de liaisons à la terre du neutre, qui se distinguent par leur mode de raccordement du point neutre et leur technique d'exploitation à savoir la continuité de service et la maintenance. Voir aussi leurs influences sur les surintensités et les sursensions internes résultant des défauts à la terre et de leurs éliminations, dans le but de réduire ces dernières. Pour cela on opte pour un réseau de 110kV fonctionnant avec le neutre isolé de la terre et faire varier l'élément du neutre: mis directement à la terre, à travers des résistances et via une inductance (bobine de Peterson).

Dans notre travail, nous allons étudier les sursensions d'amorçage d'arc provoqué par un défaut monophasé sur un réseau de tension nominale 110kV. Pour mieux approfondir dans notre étude nous avons partagé notre travail en quatre chapitres.

## **Introduction Générale :**

---

Dans le premier, nous avons articulé sur certaines composants d'un réseau de transmission de l'énergie électrique (les conducteurs, les pylônes, les isolants les transformateurs ...) ainsi que quelque protections comme les parafoudres et les éclateurs...etc.

Dans le chapitre II, nous avons accentué sur les différentes surtensions et leurs origines ainsi leurs influences sur les isolations des éléments des réseaux électriques. De même, nous avons été conduits à la modélisation de l'arc électrique.

Puis on a procédé à résumer les différents régimes de neutres dans le troisième chapitre ou nous avons cité leurs avantages et leurs inconvénients.

En fin le quatrième chapitre a été réservé pour l'étude des surtensions d'amorçage d'arc produite dans le réseau considéré où nous avons calculé ces paramètres des lignes. L'étude des surtensions dans le réseau considéré fonctionnant avec un neutre isolé de la terre est réalisée par le logiciel PSPICE en tenant compte de l'allumage et l'extinction de deux arcs consécutifs. Nous avons analysé le fonctionnement de notre réseau avec différents régimes de neutres .Et on termine par une conclusion générale.

**Généralités sur les réseaux électriques  
et les particularités des réseaux de  
tensions nominales 110KV**

## 1. Généralités sur les réseaux électriques

### 1.1. Généralités sur les réseaux électriques

Le réseau électrique est une unification des centrales électriques, des lignes, des postes assurant le transport de l'énergie électrique des points de production jusqu'aux points de consommations.

Pour assurer la continuité d'alimentation des usagers et d'augmenter la fiabilité de fonctionnement on fait les liaisons entre différents réseaux électriques. Les schémas des réseaux électriques sont différents, ceci dépend des régions et des caractères des charges.

Pour contrôler les régimes de fonctionnement des réseaux électriques il faut toujours avoir des informations sur les schémas fonctionnant selon les charges, les tensions, le régime de neutre et l'influence sur l'environnement.

La connaissance des exigences nécessaires des réseaux électriques assure la fiabilité de leurs fonctionnements la qualité d'énergie électrique, l'économie, et la sûreté.

### 1.2. Différentes structures de réseaux

#### 1.2.1. La structure maillée

C'est La structure la plus appropriée pour les réseaux d'interconnexion et de transport, car elle permet d'assurer la continuité du transport même en cas d'éventuel défaut. Dans cette structure, les branches du réseau forment des mailles, (figure I.1).

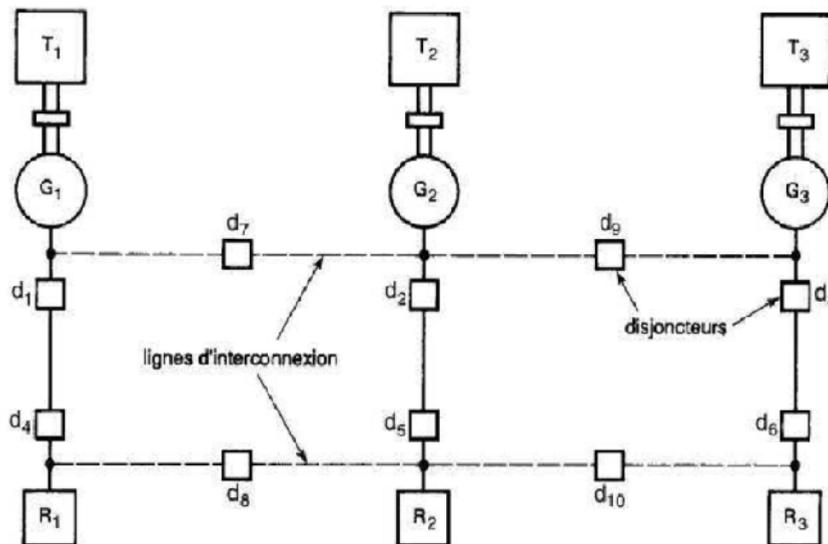


Figure I.1) Schéma d'un réseau maillé. [1]

### 1.2.2. La structure bouclée

C'est une structure comprenant des boucles fermées, chaque boucle comprend un certain nombre de source. L'avantage que présente cette structure c'est que l'énergie peut transiter de chemins différents, ce qui assure la continuité de l'alimentation en cas de défaut sur l'une des lignes (figure I-2).

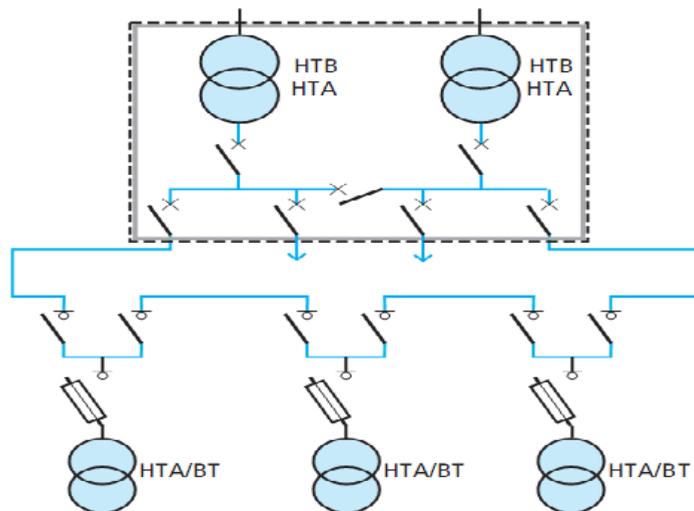


Figure I-2) Schéma d'un réseau bouclé. [18]

### 1.2.3. La structure radiale

C'est une structure unifilaire arborescente, chaque départ se sépare en plusieurs ramifications à la manière des branches d'arbre, l'origine de cette structure est le poste de transformation (figure I-3).

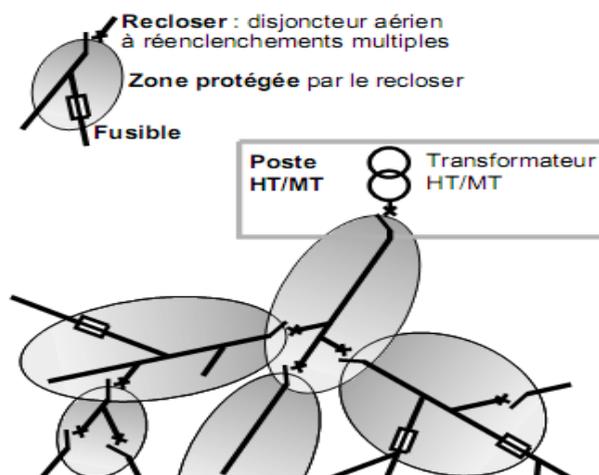


Figure I-3) : Schéma d'un réseau radial. [19]

Pour cette structure on distingue deux types d'alimentation :

- **Alimentation en antenne**

Ce type est adapté lorsque les exigences de la continuité d'alimentation sont faibles (figure I-4).

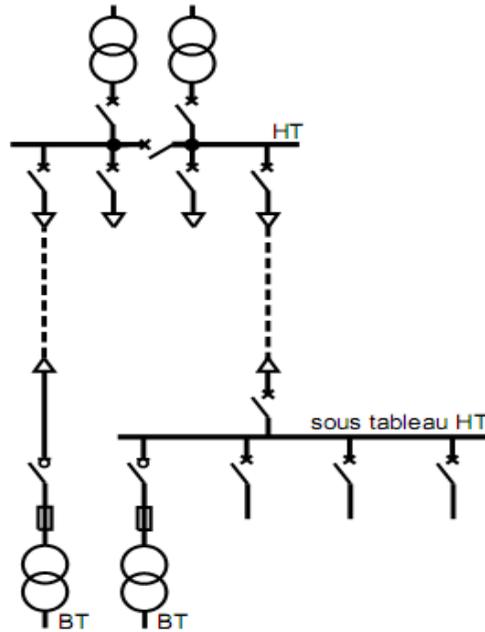


Figure I-4 : Schéma d'un réseau en antenne. [20]

- **Alimentation en coupure d'artère**

C'est un cas particulier du réseau radial où il existe que la ligne principale sur laquelle sont raccordés les différents postes.

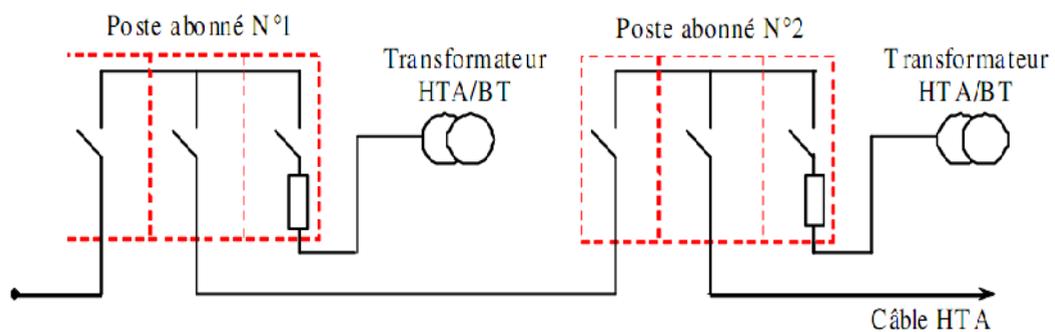


Figure I-5 : Schéma d'un réseau en coupure d'artère.

### 1.3. Construction du réseau

#### 1.3.1. Les lignes

##### a) Définition et composants

Ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux. Leur tension est comprise entre 3 kV et 60kV [1]. Une ligne se compose de conducteurs supportés par des poteaux ou des pylônes à l'aide des chaînes d'isolateurs.

- **Les conducteurs : [1]**

Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des bruns toronnés pour but d'augmenter la surface du conducteur, ils sont isolés l'un de l'autre par une couche d'oxyde, encore se sont des fils en cuivre et en aluminium avec une âme en acier qui assure une résistance mécanique plus élevée et aussi plus économiques (L'aluminium est très léger, moins cher, sa résistivité est 1,62 fois plus que celle de cuivre, soit  $36 \text{ m} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ . Le cuivre est très rare dans les lignes neuve).

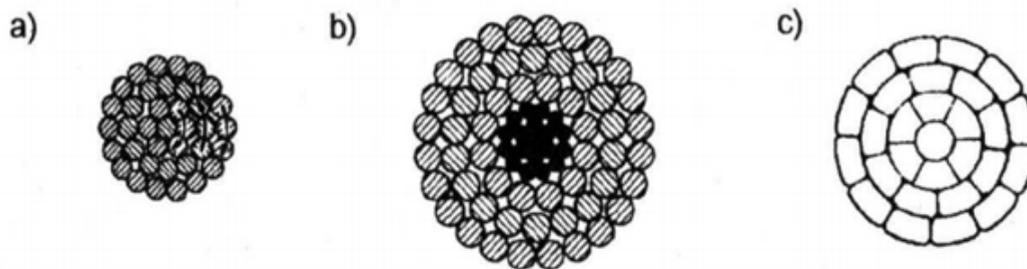


Figure (I.6) : Conducteurs des lignes aériennes.

a) Conducteur simple    b) Conducteur Al-acier    c) Conducteur compact.

- **Les pylônes**

Pour les lignes de moins de 70kV, on peut employer comme supports de simples poteaux en béton ou en bois ; pour des tensions supérieures, le bois n'est utilisé que sous forme de portiques Le bois est souvent injecté de créosote ou de certains sels métalliques pour le préserver contre la pourriture. Pour les lignes à très haute tension, on emploie toujours des pylônes métalliques .Ils sont constitués de fers cornière boulonnés. [1]

La figure suivante montre les différents types de pylônes :

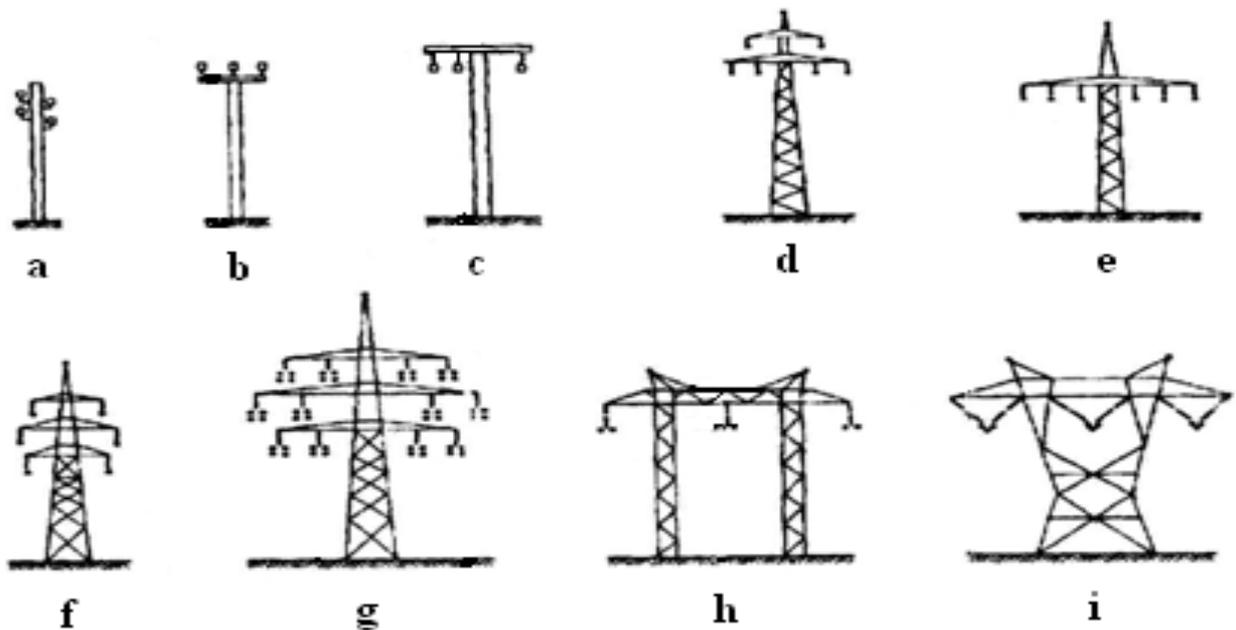


Figure I.7) les différents types de pylônes.

- a) Poteau de bois.
- b) poteau avec isolateurs rigides (moyennes tensions).
- c) Poteau en béton (moyennes tensions).
- d), e), f) Pylônes en treillis pour lignes à deux ternes (hautes tensions).
- g) pylône à plusieurs ternes (hautes tensions).
- h), i) pylônes simple à un terne (hautes tensions).

- **Les isolateurs : [1]**

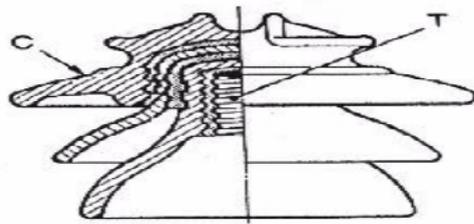
Les chaînes d'isolateurs servent à supporter, à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et les pylônes. Ils sont presque toujours fabriqués en verre ou en porcelaine ayant respectivement une rigidité diélectrique de 120 kV/mm et de 12 à 28 kV/mm. [8]

Au point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. Afin d'augmenter leur distance de contournement, on leur donne une forme de jupe. Au point de vue mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les forces énormes dues au poids et à la tension mécanique des conducteurs. Les isolateurs sont de deux types principaux: rigides et à chaîne. La partie supérieure des isolateurs rigides sur laquelle est fixé le conducteur

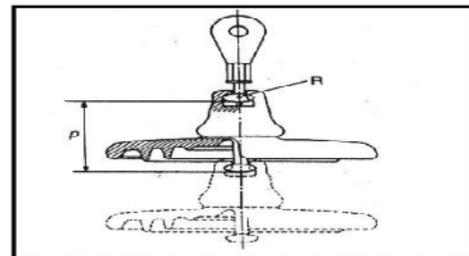
constituée d'une ou de plusieurs jupes en porcelaine. Une tige vissée à l'intérieur des isolateurs permet de les fixer à un support. [1]

Il existe plusieurs types d'isolateurs parmi eux on trouve : les isolateurs rigides qui sont utilisés pour des tensions inférieurs à 50 kV, les isolateurs suspendus fabriqués en Plusieurs éléments sont plus économiques car en cas de détérioration seul l'élément d'défectueux sera remplacé, les isolateurs de traversé qui sont utilisés pour faire traverser une paroi mise à la terre par un conducteur à haute tension, les isolateurs supports qui sont utilisés particulièrement dans les postes de transformation comme support de matériels et d'appareils se trouvant sous la tension de service.

Les figures suivantes représentent quelques types d'isolateurs :

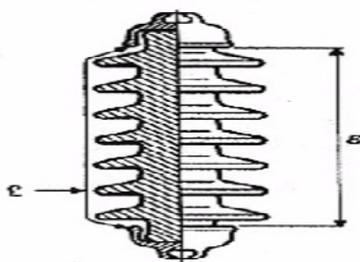


Isolateur rigide en verre

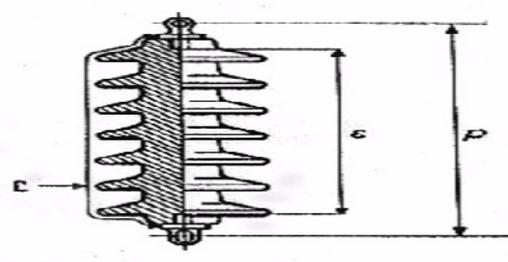


Assemblage à rotules

Scellement externe



Scellement interne



Isolateur à long fût en porcelaine

Figure I.8) Différents types d'isolateurs.

- **Le fil de garde : [1]**

Le fil de garde est un conducteur en acier disposé aux sommets des pylônes, il serve à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tensions, on le relie solidement à la terre à chaque pylône.

- **Les jeux de barres**

C'est un conducteur en cuivre ou en aluminium utilisé pour la distribution de l'énergie électrique dans un poste électrique, Pour avoir un courant maximal il faut avoir une section maximale du conducteur de jeu de barre. Dans les postes HT on utilise des tubes creux d'épaisseur de (8÷ 10mm) pour une fréquence de (50÷60) car cette forme permette de réduire efficacement les pertes par effet de peau.

**b) Types des lignes : [1]**

On distingue quatre types de lignes selon la gamme de tension appliquée :

- **Lignes de distribution à basses tensions BT :**

Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons, ces lignes fonctionnent à des tensions allant entre 120 et 600V.

- **Lignes de distribution à moyennes tensions MT:**

Ce sont les lignes ayant des tensions allant entre 3 et 60kV qui relient les clients aux postes de transformations principaux.

- **Les lignes de transport à hautes tensions HT :**

Ce sont les lignes reliant les postes de transformations principaux aux centrales de génération, ces lignes fonctionnent avec des tensions 110 et 220 kV.

- **Les lignes de transport à très hautes tensions THT :**

Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisations, ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000Km et elles fonctionnent avec des tensions 330, 400 et 500 kV.

- **Les lignes de transport à ultra hautes tensions UHT :**

Se sont les lignes fonctionnant avec des tensions supérieures à 765kV.

### **1.3.2) Les transformateurs**

**a) Définition : [4]**

Le transformateur appartient à la famille des composants passifs, il est l'appareil statique qui convertit un système de tensions et de courants en un autre, sans changer la fréquence, cette conversion se fait à travers un circuit magnétique. Il se compose d'une ou de plusieurs enroulements placées à proximité d'une ou de plusieurs autres bobines.

Le transformateur est utilisé pour coupler des circuits de courant alternatif. Les bobines primaires sont connectées à une source d'énergie et les bobines secondaires

sont connectées à une charge. Le transformateur élévateur de tension, ou survolteur, est un transformateur dans lequel la tension secondaire est supérieure à la tension primaire. Dans le cas contraire, il s'agit d'un transformateur abaisseur de tension, ou dévolteur.

Les transformateurs électriques doivent être efficaces et doivent également dissiper aussi peu d'énergie calorifique que possible pendant la transformation. Les rendements dépassent couramment 95 % du fait de l'utilisation d'alliages d'acier spéciaux permettant de coupler les champs magnétiques induits entre les bobines primaires et secondaires.

La perte d'énergie électrique n'est que de 0,5 % dans un transformateur de taille importante. Cependant, un tel dispositif dégage une chaleur importante et requiert donc des systèmes de refroidissement spécifiques.

### b) Types des transformateurs

On distingue deux types des transformateurs les plus utilisés qui sont :

#### b-1) Transformateurs monophasés

- **Réalisation : [2]**

Sont réalisés à deux variantes, avec enroulements simples ou doubles. Le parcours du flux magnétique est représenté dans la figure (I.9).

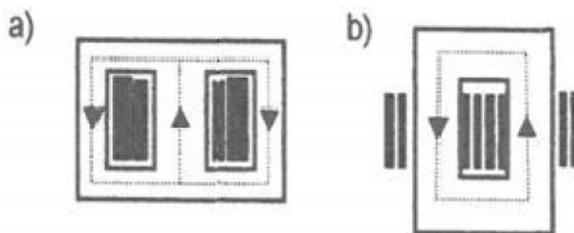


Figure (I.9) : Transformateur monophasé :

- a) Enroulement simple
- b) Enroulement double.

- **Principe de fonctionnement du transformateur: [1]**

Une bobine à noyau d'air est alimentée par une source de tension  $E_g$ , le courant magnétisant  $I_m$  produit un flux total  $\Phi$  qui disperse autour de l'enroulement figure (I.10), si l'on approche de ce montage une deuxième bobine, une partie de ce flux est captée par les spires de cette dernière et une f.e.m  $E_2$  est induite à ses bornes. L'ensemble de ces

deux bobines constitue un transformateur, la bobine accrochée à la source est appelée primaire, l'autre est appelée secondaire.

Le flux  $\Phi$  créé par le primaire est subdivisé en deux parties : un flux mutuel  $\Phi_m$  qui accroche les spires de secondaire et un flux de fuite  $\Phi_f$  qui ne les accroche pas. Lorsque les bobines sont éloignées l'une de l'autre, le flux mutuel est faible par rapport au flux total, on dit alors que le couplage est faible.

Pour obtenir un meilleur couplage en rapprochant les deux enroulements.

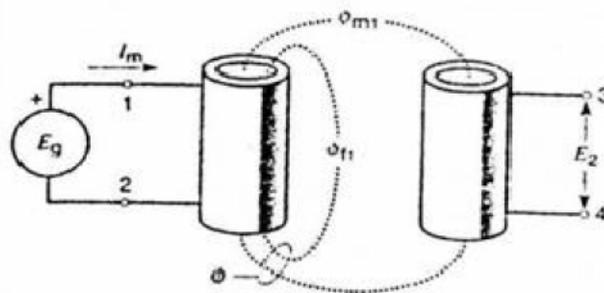


Figure (I.10) : Transformateur élémentaire.

On peut l'améliorer de beaucoup en bobinant le secondaire par-dessus de primaire figure (I.11), avec cette construction la presque totalité de flux est accrochée par le secondaire.

- **Construction :**

Habituellement, la construction des transformateurs utilisés en pratique est telle que leurs propriétés se rapprochent de celle de transformateur idéal. Ainsi, afin d'obtenir une bonne perméabilité, le noyau est fait en acier électrotechnique de bonne qualité. De plus, pour minimiser les pertes fer, le noyau laminé en utilisant de l'acier en silicium [1].

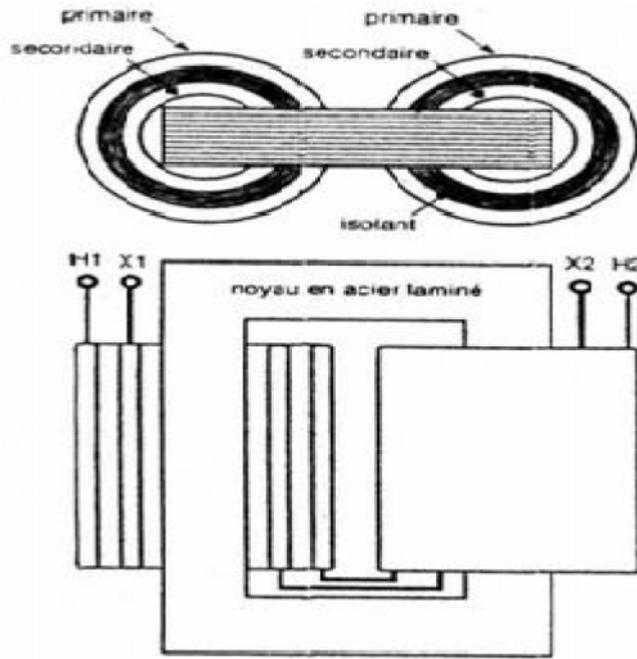


Figure (I.11) : Construction d'un transformateur monophasé.

Il s'ensuit que le courant magnétisant  $I_m$  est 5000 fois plus petit que si le noyau est composé d'un matériau non magnétique, le courant  $I_f$  fournissant les pertes dans le noyau est de 2 à 10 fois plus faible que le courant  $I_m$ .

Simple solution précédente, en bobinant le primaire et le secondaire l'un par-dessus de l'autre, tout en réduisant la distance qui les sépare. Cependant, afin de conserver une isolation adéquate entre les enroulements, on ne peut diminuer cette distance en deca d'une valeur critique. Autrement, l'isolation risque de claquer lors des surtensions dues aux chocs de foudre ou aux manœuvres sur le réseau.

## b-2) Transformateurs triphasés

- **Description : [2]**

On peut obtenir simplement un transformateur triphasé par couplage triphasé de trois transformateurs monophasés, ce qui est onéreux à cause de gaspillage du matériel. La solution habituelle pour ce type est le transformateur à trois colonnes. La figure (I.12) illustre sa formation en partant de trois transformateurs monophasés figure (I.12.a), à la place de six colonnes on a besoin seulement de quatre colonnes figure (I.12.b).

La somme des trois flux déphasés de  $120^\circ$  étant nulle en régime équilibré, on peut même renoncer à la colonne centrale dans la figure (I.12.b) en pointés avec épargne

supplémentaire de matériels. Si en fin on ramène les trois colonnes restantes dans un plan figure (I.12.c), on obtient une solution très simple présentant une légère dissymétrie magnétique qui cependant ne perturbe pas les bons fonctionnements.

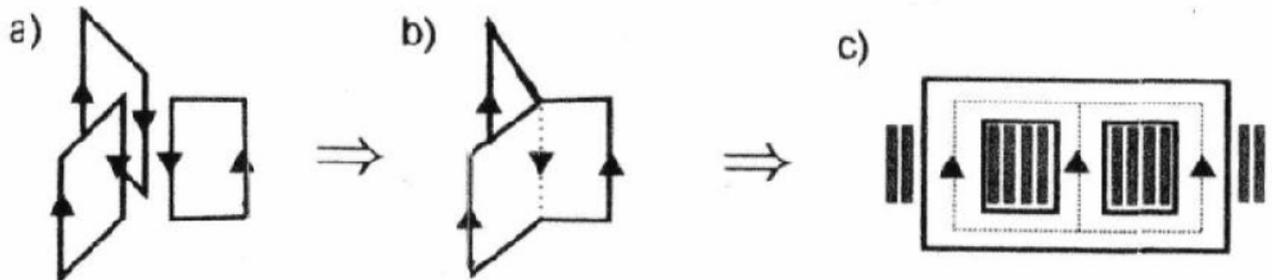


Figure (I.12) : Formation de transformateur triphasé.

- **couplage des enroulements**

Pour un transformateur triphasé, il existe différents types de couplage d'enroulements

- Le couplage étoile, défini par la lettre Y.
- Le couplage triangle, défini par la lettre D ou .
- Le couplage zig-zig, défini par la lettre Z.

### 1) Indice de couplage

Pour un transformateur triphasé, il existe différents types de couplage d'enroulement : C'est la caractéristique d'un transformateur triphasé indiquant le type de couplage réalisé au primaire et au secondaire ainsi que le déphasage entre le système de tensions primaires et le système de tensions secondaires. Les systèmes triphasés de tension sont : « triangle » (D ou d) et « étoile » (Y ou y). Dans le système « étoile », le « neutre » (point central de l'étoile) peut être sorti au borne du transformateur : ceci est indiqué par la présence de la lettre N (ou n) dans l'indice de couplage. Il existe également le couplage zig-zag (z), utilisé majoritairement au secondaire ; il possède un neutre. Ce couplage permet, lors de la perte d'une phase au primaire, d'avoir au secondaire une tension pratiquement identique sur les trois phases. Enfin, l'indice de couplage est complété par un « indice horaire » qui donne, par pas de  $30^\circ$ , le déphasage horaire en 12èmes de tour (comme sur une montre) entre le primaire et le secondaire du transformateur (ex.: 11 =  $11 \times 30^\circ = 330^\circ$  en sens horaire ou  $30^\circ$  en sens antihoraire).

## 2) Différentes couplage

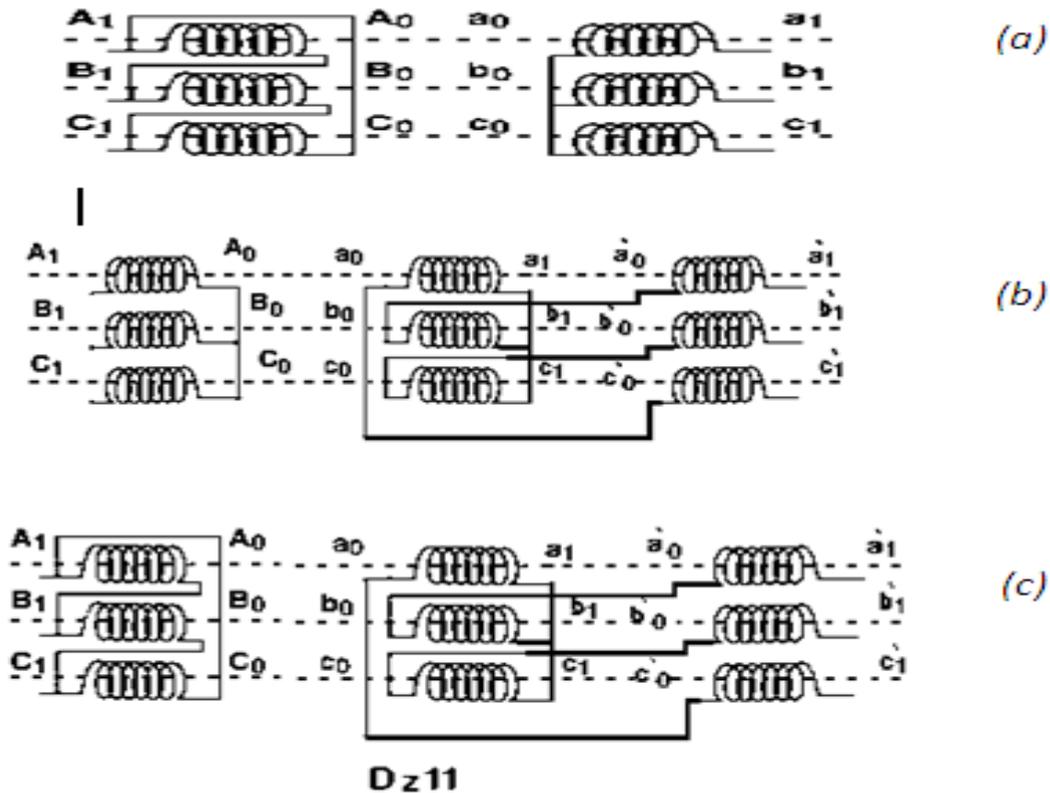


Figure (I.13) : Modes de couplage de transformateur triphasé

a) Couplage triangle étoile. b) Couplage étoile zig-zag. c) Couplage triangle zig zag

### C) Classification des transformateurs : [7]

Les transformateurs se classifient selon leurs puissances fournissent, on distingue :

- Petits transformateurs :  $1 \text{ kVA} < S < 25 \text{ kVA}$ .
- Transformateurs de distribution :  $25 \text{ KVA} < S < 2000 \text{ kVA}$ .
- Transformateurs pour le transport d'énergie :  $S > 2000 \text{ kVA}$  jusqu'à  $1000 \text{ MVA}$ .
- Transformateurs de puissance

La Figure (I.14) représente quelques types des transformateurs de puissance.

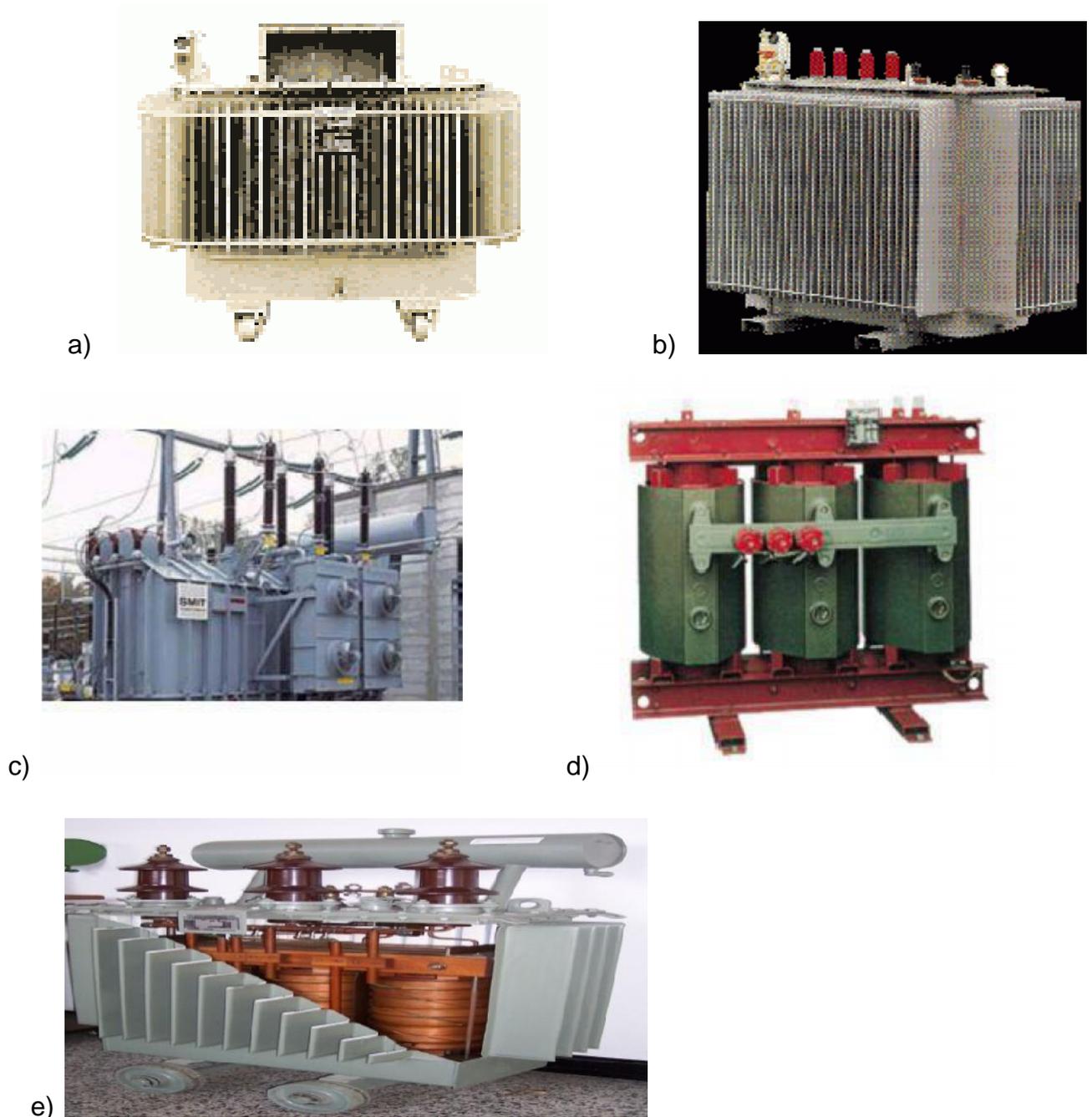


Figure (I.14) : Différents types des transformateurs de puissance.

La Figure (I.14.a) : Transformateur à l'huile avec niveau d'isolement primaire et secondaire jusqu'à 36 kV, ajustable par commutateur hors tension, avec enroulements en cuivre.

Figure (I.14.b) : Transformateur de puissance TTHI immergé dans l'huile ou sec enrobé époxy pour des puissances de 100 à 1250 kVA en complément d'une large gamme de transformateurs de distribution en HTA/HTI.

La Figure (I.14.c) : Transformateur de puissance SMIT (5 à 1000 MVA).

La Figure (I.14.d) : Transformateur SEC avec une autoextinguibilité en cas d'incendie, résistant aux variations de charge et aux surcharges, et insensibilité à la pollution et à la condensation

#### **d) Les transformateurs de mesures**

- **Les transformateurs de tensions**

Ce sont des transformateurs à haute précision dont le rapport de transformation varie très peu avec la charge. La tension secondaire et celle de primaire sont en phase. Ils sont utilisés sur les lignes à haute tension pour brancher les appareils de mesures et les protections (relais). Le primaire est branché en parallèle avec la ligne, son rapport de transformation est choisit de telle façon à avoir une tension secondaire peut être supporté par les appareils de mesures (0÷150V).

- **Les transformateurs de courant**

Ces transformateurs ont une très haute précision et un rapport de transformation demeure constant malgré la variation de la charge, ils sont utilisé pour ramener des courants intenses à des valeurs facilement mesurables. Ils servent aussi à isolé les appareils de mesures et de protections, le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne.

#### **e) Echauffement et refroidissement des transformateurs**

##### **1°) L'échauffement**

- **Les pertes joule**

C'est la dissipation d'énergie sous forme de chaleur provoqué par le passage du courant dans l'enroulement primaire et secondaire

- **Les pertes fer**

La magnétisation des tôles s'accompagne des pertes d'énergie sous forme de chaleur, Elles sont de deux sortes.

- **Les pertes par hystérésis**

Sont dues au fait que la magnétisation du matériau n'est pas totalement réversible, elles dépendent à la fois du courant magnétisant et de la mémoire du matériau.

- **Les pertes par courant du Foucault**

Elles sont provoqués par des courants induits, ces derniers sont d'autant plus

Important que la surface traversée par le champ magnétique soit grande.

Les pertes par courant de Foucault dépendent du carré de l'épaisseur de la tôle.

## **2°) Le refroidissement**

Vue les causes d'échauffement dans le transformateur et les solutions utilisées, le phénomène d'échauffement reste toujours important pour ne pas avoir une détérioration du transformateur, il faut utiliser un très bon moyen de repartitionnement.

- **Refroidissement à air**

Les tôles de la partie de la cuve forment des ondes qui augmentent sa surface, favorisent l'échange thermique avec l'extérieur.

- **Refroidissement à l'huile**

L'huile favorise les échanges thermiques et permet le refroidissement des canaux aménager au cœur des enroulements pour permettre son passage et améliorer l'homogénéité de la température.

- **Refroidissement par radiateur d'huile**

Ce radiateur indépendant de la cuve est lié avec le transformateur par des tuyaux qui assurent la circulation d'huile du radiateur vers le transformateur à l'aide d'une pompe et vice versa, la circulation de l'huile froide dans le radiateur vers le transformateur fait refroidir la partie intérieur du transformateur.

### **1.3.3. Les dispositifs de protection contre les surtensions**

Les éclateurs et les parafoudres sont les dispositifs utilisés pour limiter les surtensions de fortes amplitudes. Ils sont généralement dimensionnés pour intervenir sur les surtensions de foudre.

### 1.3.3.1. Les éclateurs

- **fonctionnement**

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre.

A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (voir fig. I-15). Par exemple,  $B = 40$  mm sur les réseaux EDF 20 kV

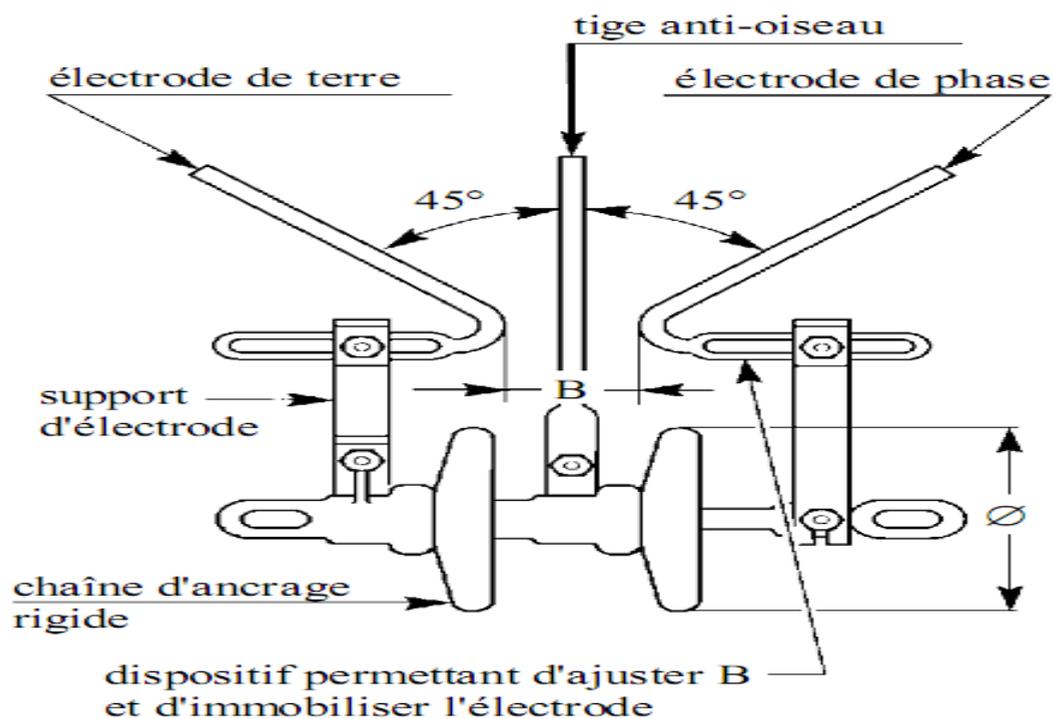


Figure (I.15) : éclateur MT avec une tige anti-oiseaux

- **avantages**

Les principaux avantages des éclateurs sont :

- leur faible prix
- leur simplicité
- la possibilité de réglage de la tension d'amorçage.

- **inconvénients**

- les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables (jusqu'à 40 %) en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression) qui modifient l'ionisation du milieu diélectrique (l'air) entre les électrodes.

- le niveau d'amorçage dépend de la valeur de la surtension.

- l'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase-terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, celui-ci dure jusqu'à son élimination par les appareils de coupure (ce court-circuit s'appelle courant de suite). Cela rend nécessaire l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de ré-enclenchement rapide sur les disjoncteurs situés en amont. De ce fait, les éclateurs sont inadaptés à la protection d'une installation contre les surtensions de manœuvre.

- l'amorçage provoqué par une surtension à front raide n'est pas instantané. En raison de ce retard à l'amorçage, la tension réellement atteinte dans le réseau est supérieure au niveau de protection choisi. Pour tenir compte de ce phénomène, il est nécessaire d'étudier les courbes tension-temps de l'éclateur.

- l'amorçage provoque l'apparition d'une onde coupée à front raide susceptible d'endommager les enroulements des transformateurs ou des moteurs situés à proximité.

Encore en place sur certains réseaux de distribution publique, les éclateurs sont actuellement remplacés par des parafoudres

### **1.3.3.2. Les parafoudres**

Pour palier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service.

Les parafoudres à résistance variable avec éclateur sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleures.

- **Définitions**

- Courant de décharge d'un parafoudre :

- C'est l'Onde de courant écoulee par le parafoudre après amorçage des éclateurs série.

- Courant de suite d'un parafoudre :

- C'est le courant à fréquence industrielle débité par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge.

➤ Tension résiduelle d'un parafoudre :

C'est la tension qui apparaît entre les bornes d'un parafoudre pendant le passage du courant de décharge

➤ Chute de tension sur le parafoudre :

• **Type des parafoudres**

**1°) Parafoudre à résistance variable avec éclateur**

**- principe de fonctionnement**

Dans ce type de parafoudre, on associe à un éclateur une résistance variable (varistance) qui limite le courant après passage de l'onde de choc.

Après écoulement de l'onde de choc à la terre, le parafoudre n'est soumis qu'à la tension du réseau, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

L'extinction de l'arc se fait systématiquement après le passage à zéro de l'onde à 50Hz du courant de défaut monophasé à la terre.

La tension résiduelle est maintenue proche du niveau d'amorçage grâce à la variation de la résistance. En effet, cette résistance diminue avec l'augmentation du courant.

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistance et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC).

Certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflage de l'arc (aimants ou bobines de soufflage magnétique), pour égaliser la répartition de l'intensité du champ électrique(E) le long du parafoudre.

**-Caractéristiques :**

Les parafoudres à résistance variable sont caractérisés par :

- la tension assignée, qui est la valeur spécifiée maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement. Cette tension peut être appliquée de façon continue au parafoudre sans que cela modifie ses caractéristiques de fonctionnement.

- les tensions d'amorçage pour les différentes formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre, ...).

- le pouvoir d'écoulement du courant de choc.

## **2°) Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO)**

- **principe de fonctionnement :**

La figure (I.16) montre que, contrairement au parafoudre à résistance variable avec éclateur, le parafoudre à oxyde de zinc est constitué uniquement d'une résistance variable fortement non linéaire.

La résistance passe de 1,5 M $\Omega$  à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à 10 mA) à 15  $\Omega$  pendant la décharge.

Après le passage du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre devient égale à la tension du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre est très faible et se stabilise autour de la valeur du courant de fuite à la terre. La forte non linéarité du parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension.

Par exemple, lorsque le courant est multiplié par 107, la tension n'est multipliée que par 1,8.

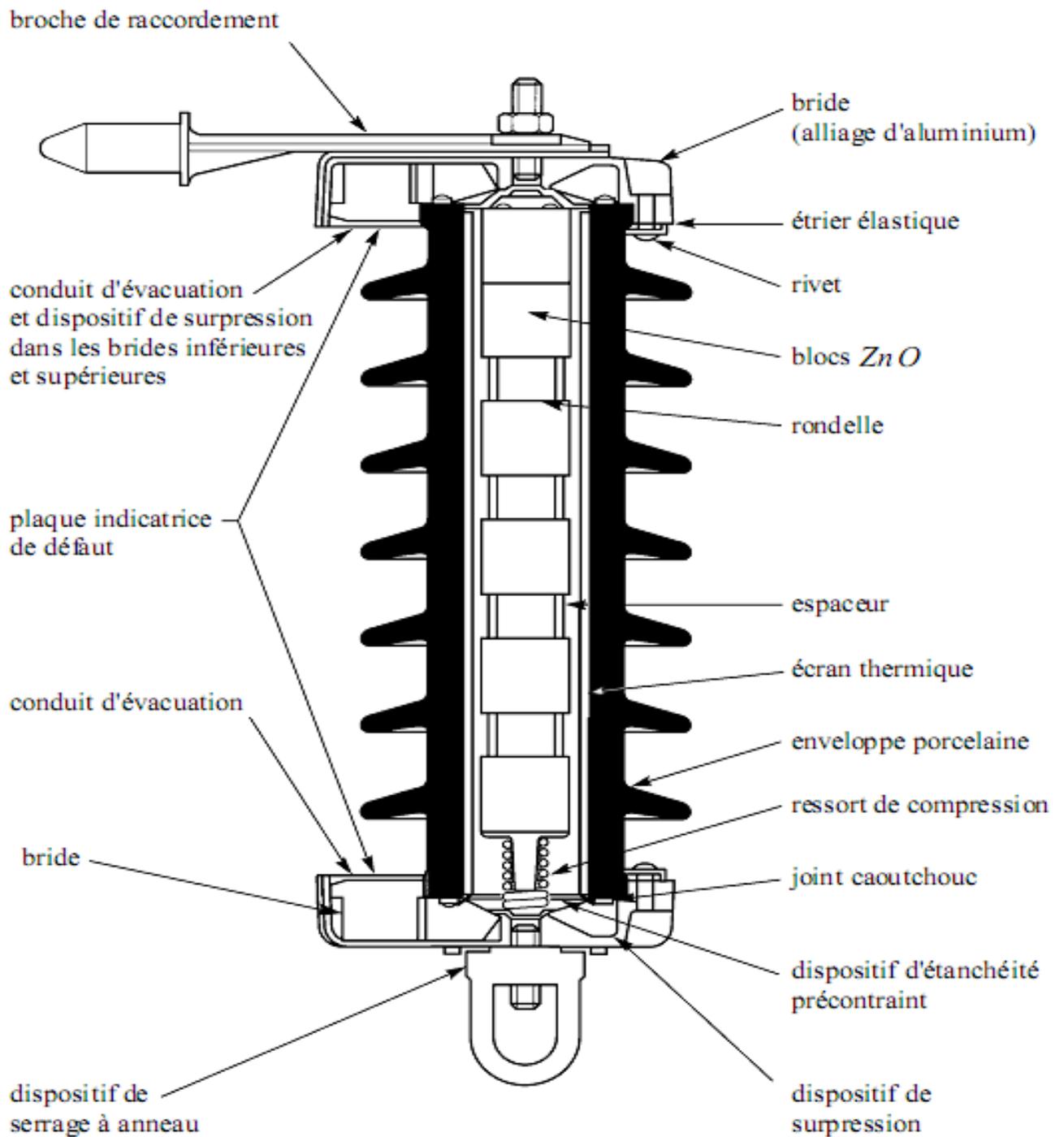


Fig I.16) exemple de structure d'un parafoudre  $ZnO$  en enveloppe porcelaine pour les réseaux 20 KV.

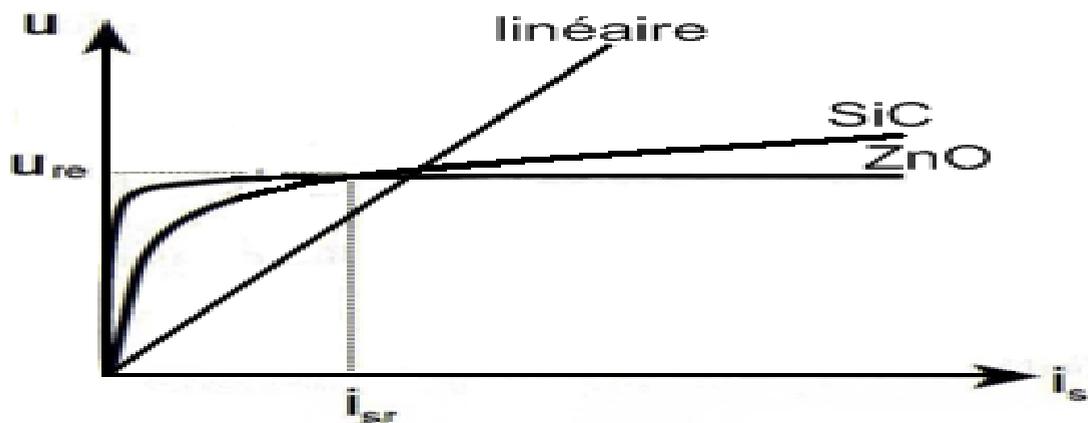


Figure I-17) : caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection 550kV/10kA.

SiC : parafoudre a distance variable avec éclateur constitué d'une résistance carbure de silicium

ZnO : parafoudre a oxyde de zinc

Linéaire : courbe U proportionnelle a I

### • Caractéristiques

Les parafoudres ZnO sont caractérisés par :

- La tension de régime permanent qui est la valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliquée de façon continue entre les bornes du parafoudre.
- La tension assignée qui est la valeur maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement dans les conditions de surtension temporaires définies dans les essais de fonctionnement (une surtension à fréquence industrielle de 10 secondes est appliquée au parafoudre ( CEI 99-4)
- Le niveau de protection défini arbitrairement comme étant la tension résiduelle du parafoudre lorsqu'il est soumis à un choc de courant donné (5, 10 ou 20 kA selon la classe), de forme d'onde 8/20  $\mu$ s
- la tenue aux chocs de courant à front raide (1 $\mu$ s), de foudre (8/20  $\mu$ s), de longue durée, de manœuvre
- le courant nominal de décharge.

Le tableau ci-dessous donne un exemple de caractéristique d'un parafoudre ZnO phase-terre pour un réseau de distribution publique 20 kV (avec déclenchement au premier défaut).

Tension maximale permanente (phase-terre)	12,7 kV
Tension assignée	24 kV
Tension résiduelle au courant nominal de décharge	< 75 kV
Courant nominal de décharge (onde de 8/20 $\mu$ s)	5 kA
Tenue au courant de choc (onde de 4/10 $\mu$ s)	65 kA

Tableau 1 : Exemple de caractéristique d'un parafoudre ZnO pour un réseau 20kV.

• **choix des parafoudres à oxyde de zinc**

La méthode générale de choix d'un parafoudre à oxyde de zinc en HT consiste à déterminer ses paramètres caractéristiques à partir des données du réseau, à l'endroit où il sera installé.

Les paramètres caractérisant le parafoudre sont :

- UC, tension de régime permanent
- Ur, tension assignée
- Ind, courant nominal de décharge
- classe de décharge et capacité énergétique
- caractéristiques mécaniques.

Les données relatives au réseau sont :

- Um, tension la plus élevée pour le matériel
- TOV (Temporary Over Voltage), surtensions temporaires (apparaissant lors d'un défaut à la terre ou un délestage sur le réseau de distribution publique).

Le choix du parafoudre consiste en un compromis entre les niveaux de protection des équipements et la capacité énergétique du parafoudre.

Le niveau de protection doit être le plus bas possible pour la tenue des équipements. Cela implique un dimensionnement en tension le plus faible possible, donc une plus grande difficulté à tenir les surtensions temporaires.

**Les régimes de neutre.**

## II.1) Les régimes de neutre : [12]

### Introduction

Dans tout système triphasé à haute ou basse tension existent trois tensions simples, mesurées entre chacune des phases et un point commun appelé "point neutre". En régime équilibré ces trois tensions sont déphasées de  $120^\circ$  et ont pour valeur :  $U/\sqrt{3}$  .

U étant la tension composée mesurée entre phases.

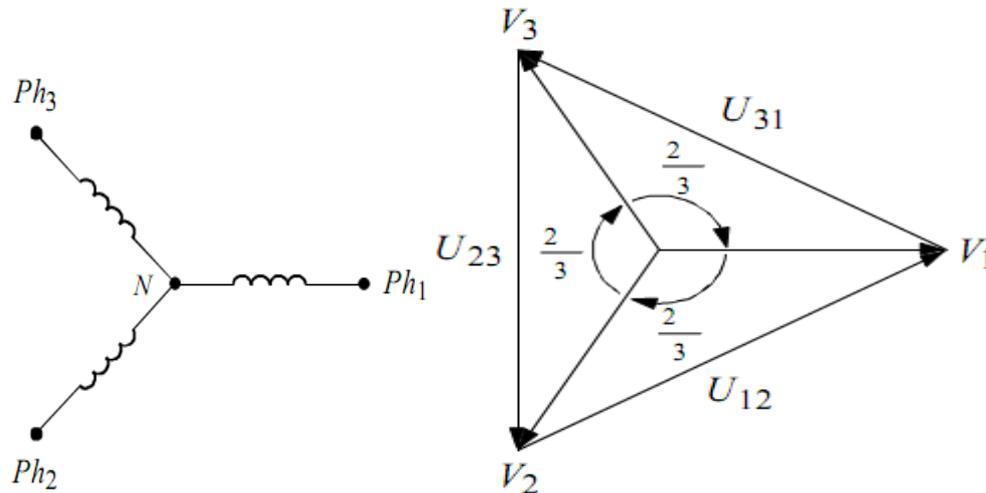


Figure II-1) : schéma triphasé.

Physiquement, le neutre est le point commun de trois enroulements montés en étoile. Il peut être sorti ou non, distribué ou non.

Dans une installation haute ou basse tension, le neutre peut ou non être relié à la terre. On parle alors du régime de neutre.

Le neutre peut être relié directement à la terre, résistant, impédant ou isolé de la terre.

Dans un réseau, le régime du neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut d'isolement, ou de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre.

### II.1.1) Les différents régimes de neutre

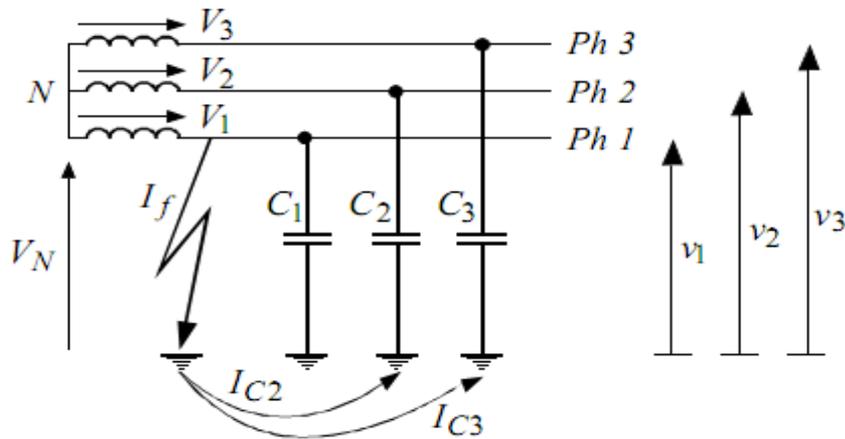
#### On distingue

- le neutre directement mis à la terre
- le neutre isolé de la terre.

- le neutre mis à la terre a travers une résistance
- le neutre mis a la terre a travers une bobine d'extinction de Peterson

**II.1.1.1) Neutre isolé**

Il n'existe aucune liaison électrique entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection.



$$I_f = I_{C1} = I_{C2} + I_{C3}$$

$$I_{C2} = \sqrt{3}jC\omega V_2$$

$$I_{C3} = \sqrt{3}jC\omega V_3$$

$$I_C = 3jC\omega V_1$$

$$|I_f| = 3jC\omega |V_1|$$

$$U_1 = 0$$

$$U_2 = U_3 = \sqrt{3}U_{ph}$$

$$U_n = U_{ph}$$

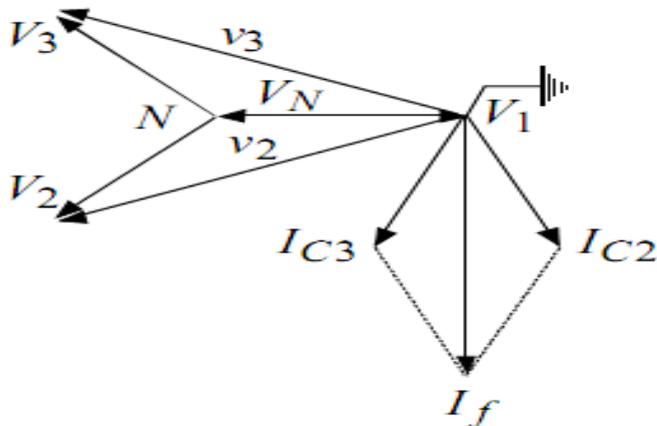


Figure II.2) : schéma de neutre isolé de la terre et son diagramme vectoriel.

**a) Avantage et Inconvénients**

• **Avantage**

L'avantage essentiel est la continuité de service au premier défaut parce que le courant de défaut très faible permet de ne pas déclencher automatiquement les protections, c'est un deuxième défaut qui nécessitera une coupure.

### • Inconvénients

- ✓ La création des surtensions d'amorçage d'arc.
- ✓ En cas de mise à la terre d'une phase, les autres se trouvent portées à la tension composée à fréquence industrielle ( $U = \sqrt{3} \cdot V$ ) par rapport à la terre, ce qui renforce la probabilité d'un second défaut.
- ✓ Le coût d'isolement est plus élevé car la tension composée reste appliquée entre phase et terre pendant une durée qui peut être longue puisqu'il n'y a pas de déclenchement automatique.
- ✓ La surveillance de l'isolement est obligatoire, avec signalisation du premier défaut.
- ✓ Un service d'entretien équipé du matériel adéquat pour la recherche rapide du premier défaut d'isolement est nécessaire.
- ✓ La mise en œuvre de protections sélectives au premier défaut est délicate.
- ✓ Il y a des risques de surtensions créées par Ferro-résonance.

#### II.1.1.2) Neutre mis directement à la terre :

Une liaison électrique directe est réalisée entre le point neutre et la terre.

$$V_3=0 ; \quad V_2=V=V_{ph} ; \quad U_N=0$$

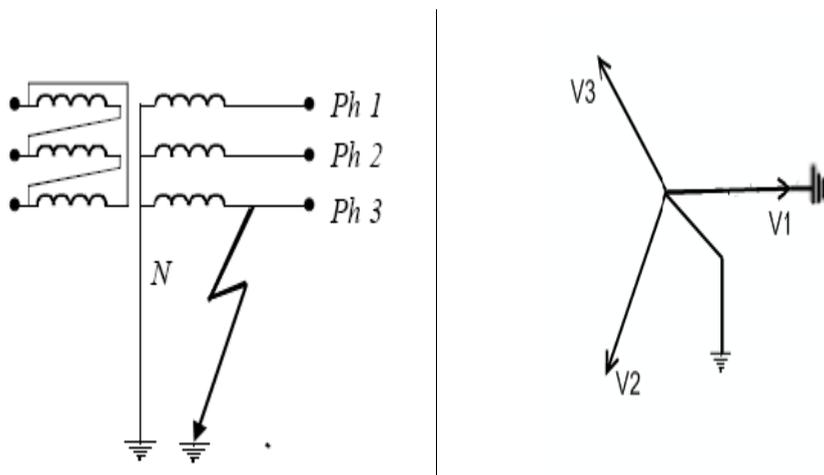


Figure II.3) : Schéma de neutre mis directement à la terre et le diagramme vectoriel.

#### a) Avantage et Inconvénients

##### ❖ Avantages

- Il permet l'emploi de matériels ayant un niveau d'isolement dimensionné pour la tension simple.

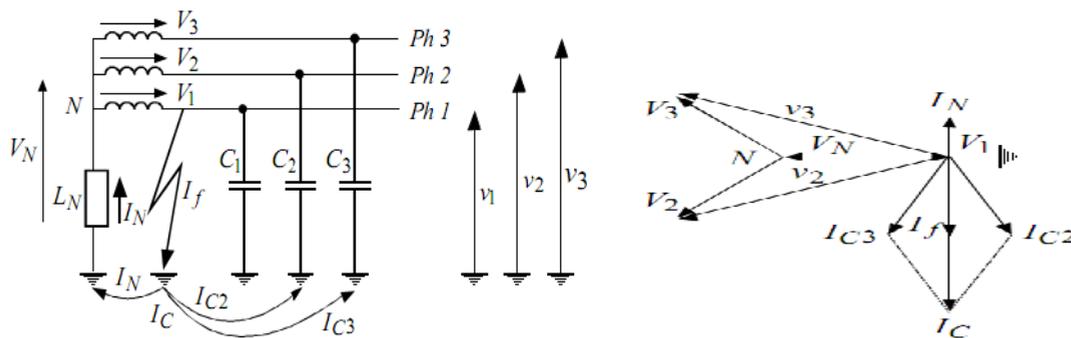
- Il n'y a pas de protections spécifiques : les protections normales de surintensités de phases peuvent être sollicitées pour éliminer les défauts phase-terre.

❖ **Inconvénients**

- Ce schéma entraîne tous les inconvénients et dangers d'un fort courant de défaut à la terre : dégâts et perturbations sont maximaux.
- Il n'y a pas de continuité de service du départ en défaut.

**II.1.1. 3) Le neutre mis à la terre a travers une résistance**

Une résistance est connectée entre le point neutre et la terre.



$$I_f = I_N + I_{C1} + I_{C2} + I_{C3}$$

$$I_N = \frac{V_1}{R_N}$$

$$I_{C2} = J\sqrt{3} C\omega V_2 \quad ; \quad I_{C3} = J\sqrt{3} C\omega V_3$$

$$I_{C1} = J3C\omega V_1 \quad ; \quad I_f = -\frac{V_1}{R_N} + J3C\omega V_1$$

$$|I_f| = |V_1| \sqrt{\left(\frac{1}{R_N}\right)^2 - 9 C^2 \omega^2}$$

$$U_1 = 0; \quad U_2 = U_3 = \sqrt{3} U_{ph}; \quad U_N = U_{ph}$$

Figure II.4) : schéma et diagramme vectoriel de la mise à la terre de neutre via une résistance.

**a) Avantage et Inconvénients**

❖ **Avantages**

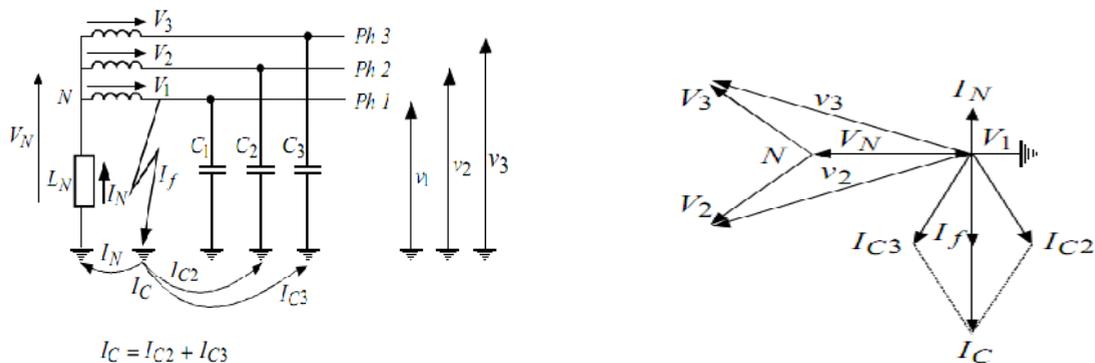
- ✓ Ce schéma est un bon compromis entre un courant et une tension de défaut faible.
- ✓ Les protections sont simples, sélectives et le courant est limité.

❖ **Inconvénients**

- ✓ La continuité de service après le premier défaut est dégradée ; en effet, en cas de défaut à la terre, celui-ci doit être éliminé aussitôt (coupure au premier défaut).
- ✓ Le coût de la résistance de mise à la terre croît avec la tension et le courant limité.

**II.1.1.4) Le neutre mis à la terre via une réactance (bobine de Peterson)**

Une réactance est insérée entre le point neutre et la terre :



$$V_1 = 0 ; \quad V_2 = V_3 = \sqrt{3} U_{ph} \quad ; \quad V_N = V_{ph}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_N + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C3} \quad ; \quad \dot{I}_N = -j \frac{V_N}{L_N \omega} + 3j C \omega V_N = j V_N (3C \omega - \frac{1}{L_N \omega})$$

$$\frac{1}{L_N \omega} = 3\omega C \quad \text{et} \quad \frac{1}{L_N \omega} = 3\omega C$$

Figure II.5) : schéma et diagramme vectoriel de la mise à la terre de neutre via une réactance. [3]

### **a) Avantage et Inconvénients**

#### **❖ Avantages**

- ✓ Ce système permet de diminuer les courants de défaut même si la capacité phase terre est grande : extinction spontanée des défauts à la terre non permanents.
- ✓ A l'endroit du défaut, les tensions de contact sont limitées.
- ✓ Le maintien en service de l'installation est assuré malgré un défaut permanent.
- ✓ La signalisation de premier défaut est donnée par la détection du passage du courant dans la bobine.

#### **❖ Inconvénients**

- ✓ Le coût de la réactance de mise à la terre peut être élevé en raison de la nécessité de modifier la valeur de la réactance pour adapter la compensation.
- ✓ Pendant la durée du défaut, il faut s'assurer que le courant résiduel circulant ne présente pas de danger pour les personnes et les biens.
- ✓ Les risques de surtension transitoire sur le réseau sont importants.
- ✓ La présence d'un personnel de surveillance est nécessaire.

# **Théories de la Création Des Surtensions et De l'Arc Electrique.**

## **CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.**

### **III.1 Les surtensions dans les réseaux à moyennes tensions :**

#### **III.1.2 Définition des surtensions :**

On définit par phénomène transitoire, l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanent. On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale. [6]

Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets. Les perturbations peuvent conduire à :

- Des interruptions courtes (ré-enclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes).
- Des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel). Pour cela, la compréhension préalable des différents types de surtension est indispensable. [7]

#### **III. 2) Origine des surtensions :**

Les surtensions ont différentes origines sont les suivants :

Des surtensions dites externes consiste les chocs de la foudre et internes peuvent apparaître à la suite des phénomènes transitoires dans le réseau. Leurs causes sont:

- Enclenchement ou déclenchement des circuits, dites surtensions de manœuvre ou surtensions de commutations.
- Surtension d'amorçage d'arc lors d'un court-circuit monophasé
- *Par Ferro-résonance.*

#### **III.2.1) Les surtensions externes :**

##### **III.2.1.1) Le phénomène de la foudre : [1]**

Par un procédé qui n'est pas entièrement conçue, il se produit à l'intérieur de certains nuages une répartition des charges positives et négatives, les charges positives se

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

déplace vers le haut, les charges négatives restent en bas. Cependant la charge négative proche de la surface de la terre chasse des électrons de celle-ci, de sorte que la région située au dessous du nuage prend une charge positive par influence. Par conséquent, des lignes de champ et une ddp s'établissent entre le bas du nuage et la terre.

Le transfert de charge se poursuit à l'intérieur du nuage, le champ électrique en dessous s'intensifie, pouvant atteindre la valeur critique d'ionisation de 3MV/m. lorsque le champ devient assez intense, un éclair jaillit entre le nuage et la terre. La décharge d'un éclair est accompagnée d'un transfert de charges électriques de 0.2 à 20 coulombs sous une tension de plusieurs centaines de milliers de volts.

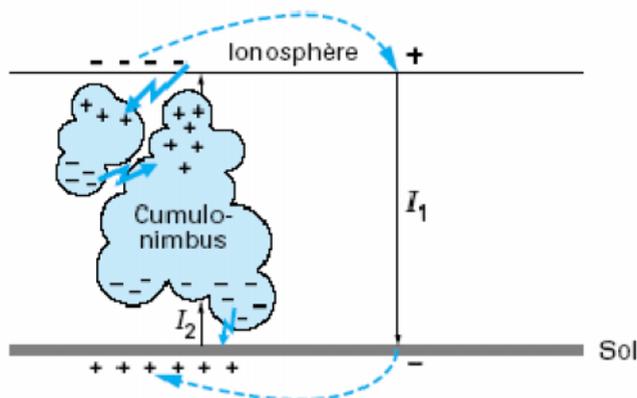


Figure (III.1): Circuit atmosphérique. « I2 courant associé au coup de foudre ». [21]

#### **III.2.1.2) Mécanisme du coup de foudre : [2,1]**

Les chercheurs ont montrés que 85 à 90% des foudres sont négatives. Le déroulement d'un coup de foudre négatif fait intervenir une série d'impulsions dont la représentation schématique est donnée sur la figure (III.2). La première impulsion débute par une série de pré décharges, qui trace un chemin préférentiel (précurseur par pas), du nuage vers le sol pour un coup de foudre descendant, sous la forme d'un canal ionisé. Dès que ce chemin est continu entre le nuage et le sol, la décharge principale va s'effectuer du sol vers le nuage (arc en retour). Cette première impulsion est en général la plus longue et fournit au sol plus d'énergie que les suivantes.

**CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.**

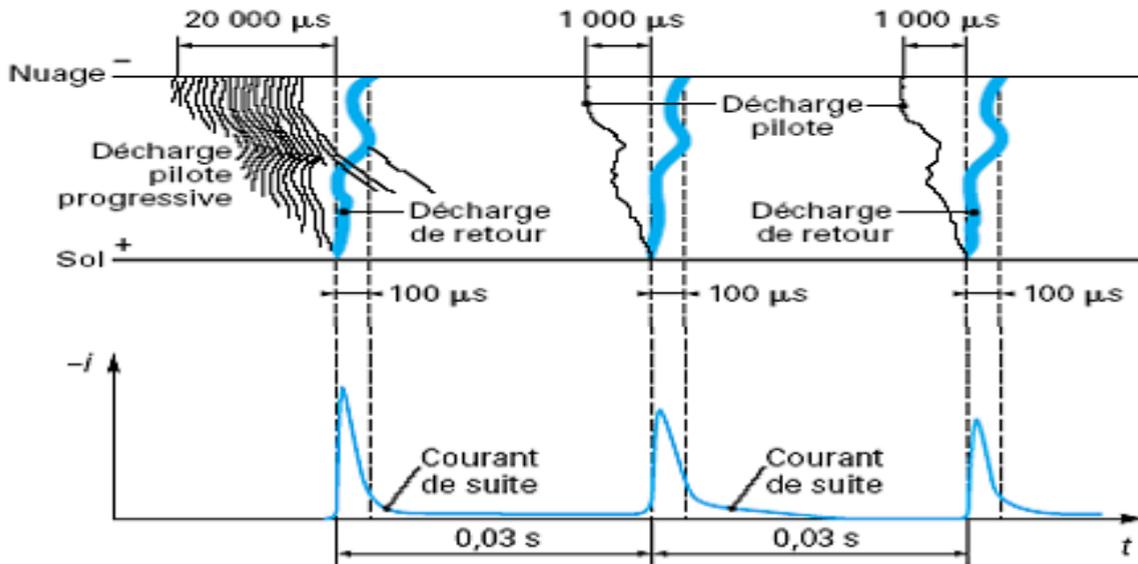


Figure (III.2): Mécanisme du coup de foudre.

Les surtensions ont des composantes à la fréquence du réseau et d'autres à des fréquences supérieures, se situent entre 100Hz et 50 kHz.

**III.2.1.3) Schéma électrique équivalent: [2 ,1]**

Le schéma équivalent pour les décharges est donné sur la Figure (III.3). Les valeurs de la résistance  $R$  et de l'inductance  $L$  dépendent du chemin pris par le courant de décharge  $i$ . La différence de potentiel correspondante :  $u = R i + L di/dt$  n'est donc pas une donnée intrinsèque du coup de foudre, qui ne peut être défini que par son courant, c'est-à-dire par une surintensité.

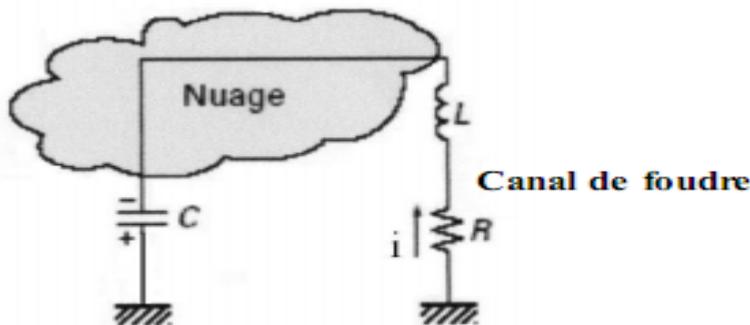


Figure (III.3): schéma électrique équivalent de la décharge.

Surtensions dues à la foudre:

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

Au voisinage du canal de la foudre, une tension proportionnelle au courant de foudre et à l'inductance mutuelle entre circuit et canal de foudre sera induite. Les réseaux d'énergie électrique sont particulièrement touchés par les impacts directs de la foudre soit sur les conducteurs, les fils de garde ou les pylônes des lignes. Analysons les trois cas suivant:

#### **a) Impact direct dans le conducteur d'une ligne aérienne : [2]**

Le courant de foudre se divise et se propage comme onde de courant dans la ligne avec une vitesse voisine de celle de la lumière (près de 300000Km/s). Selon la théorie des lignes l'onde de courant est accompagnée d'une onde de tension de même forme en valeur crête  $\hat{u}$  qui est égale au produit d'un quart de courant de foudre  $1/4 \cdot \hat{i}$  fois l'impédance caractéristique de la ligne  $Z_c$ .

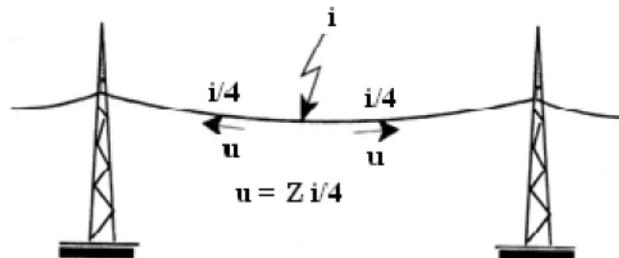


Figure (III.4): Coup de foudre sur les conducteurs d'une ligne.

#### **b) Impact direct dans le fil de garde : [2]**

Si la foudre tombe sur le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique (pylônes) par rapport à la terre. La surtension  $U$  correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV.  $U = R \cdot i/4 + 1/4 L di/dt$  avec  $R$  : résistance en onde raide de la prise de terre et  $L$  : l'inductance du pylône.

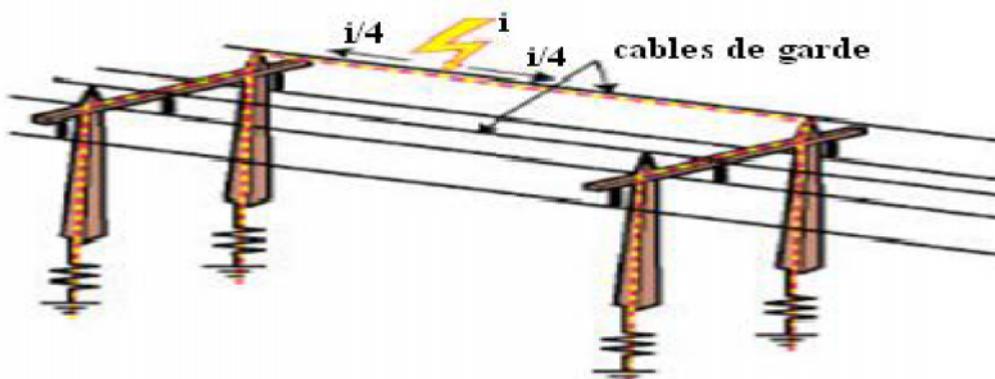


Figure (III.5): Coup de foudre sur le fil de garde.

**c) Impact dans un pylône mis à la terre : [2]**

Le courant de foudre s'écoule à la terre et produit une surtension

$U = R.i + L \frac{di}{dt}$  avec R : résistance en onde raide de la prise de terre et L: l'inductance du pylône.

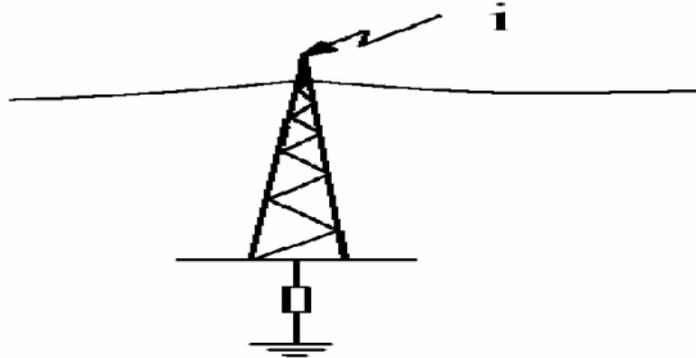


Figure (III.6): Coup de foudre sur un pylône d'une ligne aérienne.

**III.2.1.4) Forme d'onde de la foudre :**

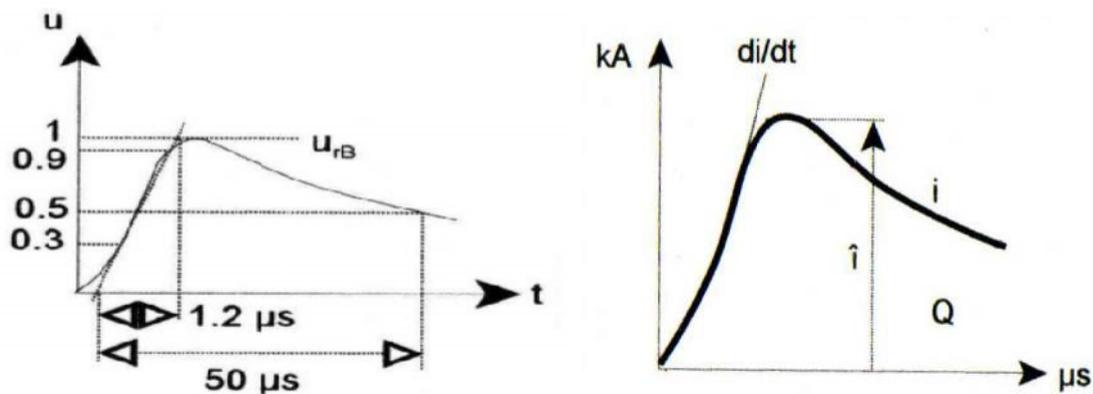


Figure (III.7): Allure de l'onde de tension et du courant de foudre.

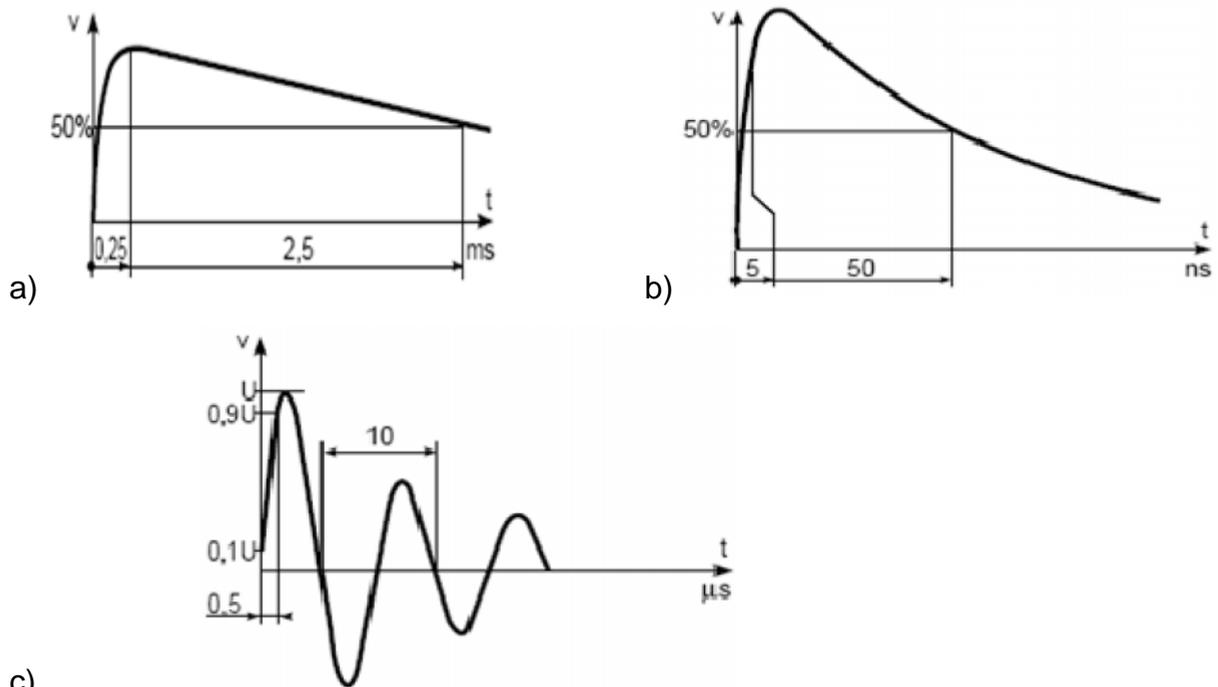
**III.2.2) Surtension d'origine interne: [2,5]**

Des surtensions dites internes peuvent apparaître à la suite de phénomènes transitoires dans le réseau. Les causes sont:

**III.2.2.1) Surtensions de manœuvres :**

Ce type de surtensions apparait sur les réseaux électriques subissant des modifications rapides de leurs structures, ces surtensions se propagent en général sous forme d'ondes haute fréquence à amortissement rapide. L'étude statique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des ondes représentées sur la figure (III.8).

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.



**Figure (III.8):** Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre.

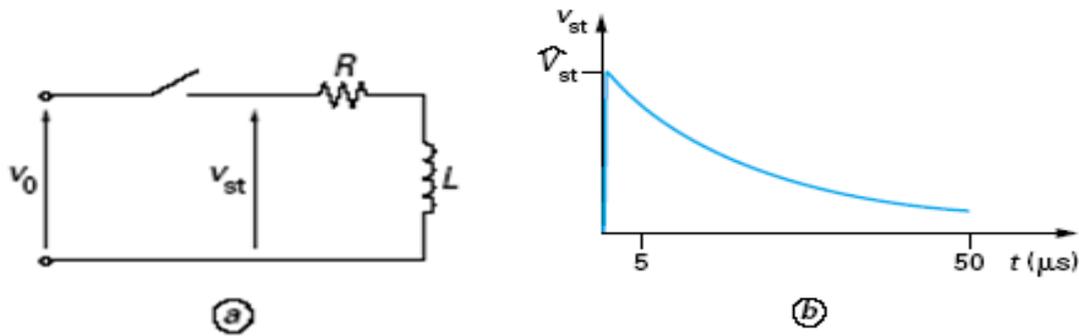
- a) Onde 250/2500  $\mu$ s dite onde longue amortie.
- b) Onde 5/50 ns dite onde impulsionnelle récurrente.
- c) Onde 0,5  $\mu$ s/100 kHz dite onde sinusoïdale amortie.

#### III.2.2.1.a) Surtension due à la coupure d'un courant inductif : [11]

Ces surtensions sont des impulsions de tension apparaissant lors de la commutation (ouverture et fermeture) de circuits comportant des éléments inductifs tels que inductances, enroulements de moteurs ou de transformateurs,...etc.

En effet, la coupure d'un circuit, tel que celui représenté sur la figure (III.8.a), entraîne une brusque variation de l'intensité du courant électrique parcourant l'élément d'inductance  $L$  ; celui-ci engendre alors, dans le circuit, une surtension  $V_{st}$ , tel que :

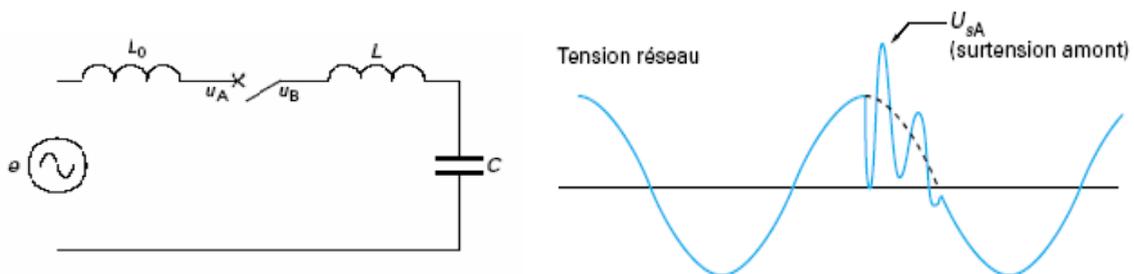
$V_{st} = - L \frac{di}{dt}$ , Cette surtension est particulièrement élevée lors de la coupure brusque ( $\frac{di}{dt}$  ). Toutefois, l'énergie de la surtension est limitée par l'énergie totale  $W$  stockée dans l'inductance :  $W = 1/2 L i_0^2$  avec  $i_0$  courant parcourant l'inductance avant la coupure. Du fait de sa forte valeur, la surtension est donc limitée dans le temps figure (III.8.b)



**Figure (III.9):** Forme de décharge inductive due à la coupure d'un circuit avec inductance  $L$ . ( $V_0$ : tension aux bornes du circuit avant la coupure).

### III.2.2.1.b) Surtension due à la coupure d'un courant capacitif : [6]

Les courants capacitifs ont principalement trois origines, les câbles à vide, les lignes aériennes longues et les batteries de condensateurs. La coupure des courants capacitifs se fait en principe sans difficulté. En effet, lorsque l'appareil interrompt le courant, des surtensions importantes à fréquence élevée dues à des réamorçages peuvent avoir lieu et remettre en cause la coupure et l'intégrité des installations. De plus, la fermeture de l'appareil sur circuit capacitif génère des phénomènes particuliers.



**Figure (III.10) :** Forme de la surtension lors du couplage au réseau d'une batterie de condensateurs.

### III.2.2.2) Surtensions par Ferro-résonance:[10]

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple). Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manœuvre (ouverture ou fermeture d'un circuit) est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané. Le circuit représenté par le schéma de la

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

figure(III.11), une inductance à noyau saturable  $L$  en série avec une capacité du réseau  $C$ .

La courbe de  $U_C$  est une droite de pente  $1 / C * \omega$ ,

La courbe de  $U_L$  présente un coude de saturation  $L$  et  $C$  est nulle et deux autres points de fonctionnement stables  $M$  et  $P$  ;  $N$  est un point d'équilibre instable. Les tensions aux bornes de  $L$  et de  $C$  (point  $P$ ) sont élevées. Le passage de  $M$  vers  $P$  peut être dû qu'à une transitoire qui augmente momentanément la tension  $e$  à une valeur supérieure à  $E$ .

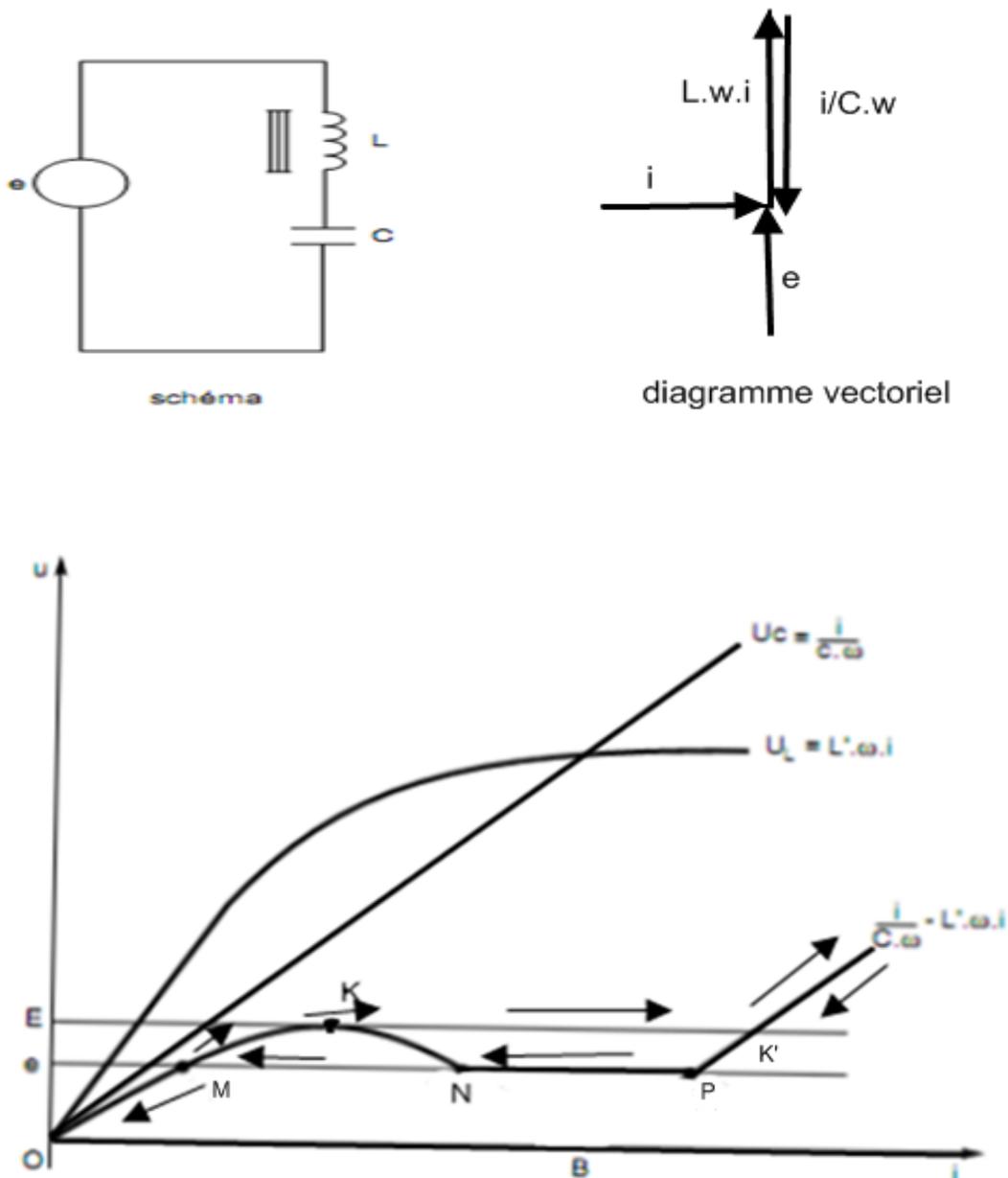


Figure (III.11) Principe de la Ferro-résonance

**III.2 .2.3) Surtension provoquée par un défaut d'isolement : [5]**

Une surtension due à un défaut d'isolement apparaît sur un réseau triphasé, lorsque le neutre est isolé ou impédant.

En effet, lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la masse ou la terre (blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement...), la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport à la terre, à la tension composée

$$U = V \cdot \sqrt{3}$$

De façon plus précise, lors d'un défaut d'isolement sur la phase A, un facteur  $S_d$  de défaut à la terre est défini par le rapport de la tension des phases B et C par rapport à la terre, à la tension simple du réseau.

$$S_d = \frac{\sqrt{3(K^2 + K + 1)}}{K + 2}$$

Avec  $K = \frac{X_0}{X_d}$

$X_d$  : La réactance directe du réseau vu du point de défaut.

$X_0$  : La réactance homopolaire

- si le neutre est parfaitement isolé.
- $X_0 = \infty \Rightarrow S_d = 3^{0.5} = \sqrt{3}$
- si la mise à la terre du neutre est parfaite soit  $X_0 = X_d \Rightarrow S_d = 1$ .
- si, comme dans le cas général,  $X_0 \leq 3X_d : S_d \leq 1,25$ .

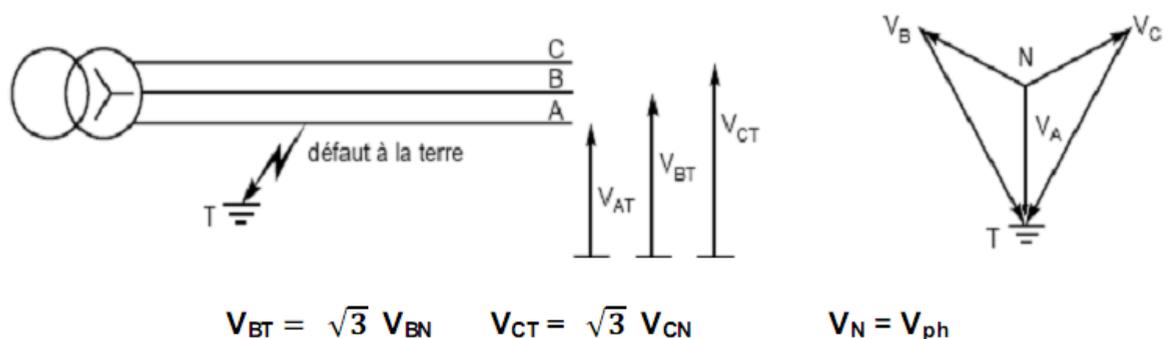


Figure (III.12): Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.

**III.3.1.4) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti): [5]**

Une surtension peut se produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. En effet, avec  $L$  et  $C$  désignant respectivement l'inductance et la capacité totale de la ligne ;  $U_s$  et  $U_e$  étant les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne, le facteur de surtension est égal à:

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot L \cdot C \cdot \omega^2}{2}}$$

Ce facteur de surtension est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300 km et de 1,16 pour une ligne de 500 km. Ces valeurs sont sensiblement les mêmes pour les lignes HT et THT. Ce phénomène se produit en particulier lorsqu'une ligne longue est brusquement déchargée.

**III. 3) Théorie de l'arc électrique dans les réseaux à moyenne tension :**

**III.3.1) Définition d'un arc électrique :**

Un arc électrique est un courant électrique visible dans un milieu isolant (gaz, air,...). L'arc se crée par ionisation de la matière isolante, cette ionisation due à l'écoulement d'un courant électrique dans l'isolant qui engendre un bruit due à l'expansion brutale du gaz.

**III.3.2) Naissance d'un arc électrique : [13]**

Elles résultent d'un affaiblissement de la rigidité diélectrique de l'isolation entre différentes phases ou entre les phases et la terre. Cette affaiblissement peut être conséquence de divers facteurs comme : la pollution, l'humidité, la température et la pression atmosphérique (aussi la pressions des liquides isolantes dans les transformateurs par exemples). Ces facteurs peuvent entraîner la création de pont de résistances superficielle qui engendre un cheminement à la surface de l'isolation, aussi si un système isolé par un isolant liquide, des impuretés (par exemple : la dissociation de papier imprégné dans le huile dans un transformateur) peuvent créer des ponts conducteurs ce qui provoque un claquage dans ce dernier.

Les sur intensité de courant jouent un grand rôle dans la détérioration de l'isolation des systèmes électriques (câbles, disjoncteurs,...) ce qui provoque

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

l'échauffement de l'isolation, donc l'affaiblissement de sa rigidité diélectrique, ce qui augmente la probabilité d'apparition d'un arc électrique.

Les surtensions est la cause principale qui provoque les amorçages d'arcs dans les systèmes, dont on site : les surtensions de la foudre, celles due aux défauts et les manœuvres.



Figure(III.13) : amorçage d'arc électrique à l'ouverture d'un sectionneur.

#### III.3.3) Modélisation de l'arc électrique : [10]

##### A) Les équations d'arc :

Le modèle utilisé dans ce travail est basé sur l'équilibre d'énergie de la colonne d'arc, ce model décrit l'arc dans l'air par une équation différentielle de la conductance d'arc  $g$  :

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G - g) \dots \dots \dots (1)$$

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

$g$  : conductance instantanée de l'arc

$G$  : conductance stationnaire de l'arc.

$$G = \frac{i_{arc}}{U_{st}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Avec } U_{st} = U_0 + r_{0*}i_{arc} \dots \dots \dots (3)$$

Ou'

$i_{arc}$  : courant instantanee de l'arc .

$U_{st}$  : Tension stationnaire de l'arc.

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

$U_0$  : tension caractéristique de l'arc.

$r_0$  : résistance caractéristique de l'arc.

Les paramètres  $U_0$  et  $r_0$  dépendent de la longueur de l'arc  $l_{arc}$  et son calcul est donné par les équations suivantes :

$$U_0 = 0.9 * \frac{[kv]}{[m]} * l_{arc} + 0.4[kV] \dots \dots \dots (4)$$

$$r_0 = 40 \frac{[m]}{[m]} * l_{arc} + 8[m] \dots \dots \dots (5)$$

L'équation (1) est l'équation généralisée de l'arc qui est approprié pour représenter un arc entre deux bornes dans un circuit électrique. Dans le cas d'un petit courant d'arcs dans un système, les paramètres varient dépendamment de la longueur d'arc  $l_{arc}$ .

La longueur d'arc est définie a priori comme une fonction de temps. La dépendance de la constante de temps de l'arc et sa longueur peut être définie par la relation :

$$\tau = \tau_0 * \left(\frac{l_{arc}}{l_0}\right)^\alpha \dots \dots \dots (6)$$

D'où

$\tau_0$  : Constante de temps initiale

$l_0$  : longueur initiale de l'arc.

$\alpha$  : Coefficient a valeur négative.

Si la variation de la longueur de l'arc électrique est fortement dépendante des facteurs extérieurs comme le vent et la flottabilité thermique il est difficile de considérer exactement ces effets aléatoires dans les modèles d'arc électriques existants.

#### **B) Les essais D'Arc [10] :**

Il a été rendu compte des essais d'arc qui ont été réalisés dans un Laboratoire d'essai à haute puissance utilisant un circuit d'essais triphasé. Le circuit d'essai représenté sur la figure (III.14) était construit en utilisant un assemblage d'éléments pour représenter un système de 20kV mis à la terre via une réactance de Peterson d'une manière simplifiée. L'impédance de la source  $Z = R + jX$  correspond à une puissance de court-circuit triphasé  $S_k = 250$  MVA. La réactance  $X_L$  montré

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

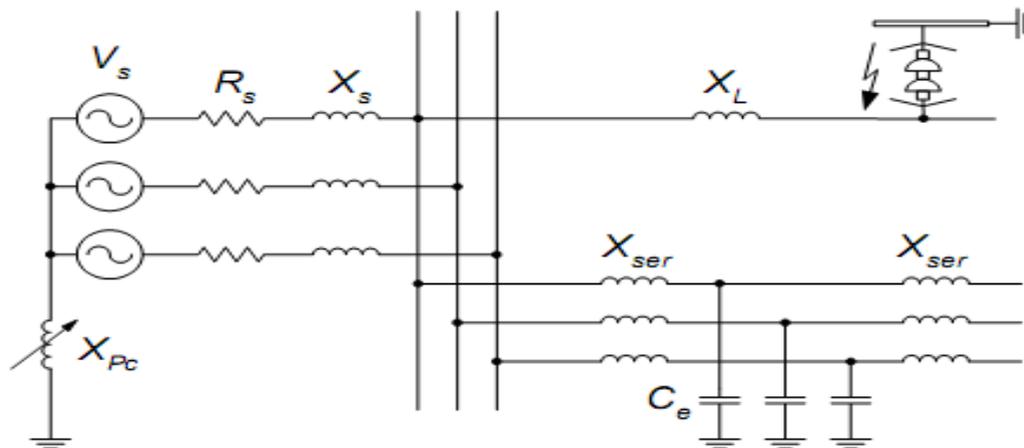
représente la phase endommagée d'une ligne aérienne de 25km de longueur. La partie saine du système de 20kV est modélisé par un schéma de ligne en "T" en série avec les réactances  $X_{ser}$  et les capacités phase-terre. Les courants des capacités phase-terre augmente à la valeur :

$$I_{c_e} = 3 * w * c_e * v_s = 263 [A]$$

Où  $V_s$  est la tension de source.

La réactance de la bobine de Peterson a été choisie afin de réaliser le degré de compensation de défaut de la terre de  $v = - 20 \%$ . Ainsi, le courant de défaut à la terre éventuel augmente à la valeur  $I_e=52.5 A$ . L'arc a été lancé au moyen d'un fil de fusible à travers une ligne de 20 kV dont l'isolateur est indiqué sur le schéma (III.14).

Les variations de défaut à la terre enregistrée en deux essais ont été montrées dans [10]. La figure (III.15) montre des formes d'onde de tension d'arc, le courant d'arc et le courant dans la bobine de Peterson, quand l'arc de défaut à la terre a été enclenché lorsque la tension d'arc est maximale. L'arc s'éteint après 96ms pour un début de défaut maximum de la tension (valeur crête). Les formes d'onde de mêmes quantités mesurées sont indiquées sur la figure (III.19) pour le cas où le déclenchement de l'arc se fait lorsque la tension passe par sa valeur 0. Le début de défaut lors de passage de la tension sa valeur zéro dues à la bobine de Peterson, la composant DC avec une grande constante de temps dans le courant de défaut à la terre. En conséquence, l'arc se maintient pendant une longue période..[10]



$$V_s = 21 \text{ kV} / \sqrt{3}; \quad R_s = 0.096 \, \Omega; \quad X_s = 1.76 \, \Omega$$

$$X_{ser} = 5 \text{ m}\Omega; \quad C_e = 23 \, \mu\text{F}; \quad X_L = 17.5 \, \Omega \quad (f = 50 \text{ Hz})$$

Figure III.14) : circuit d'essai représente un système résonant avec un arc de défaut à la terre (la tension nominale de système =20 kV).

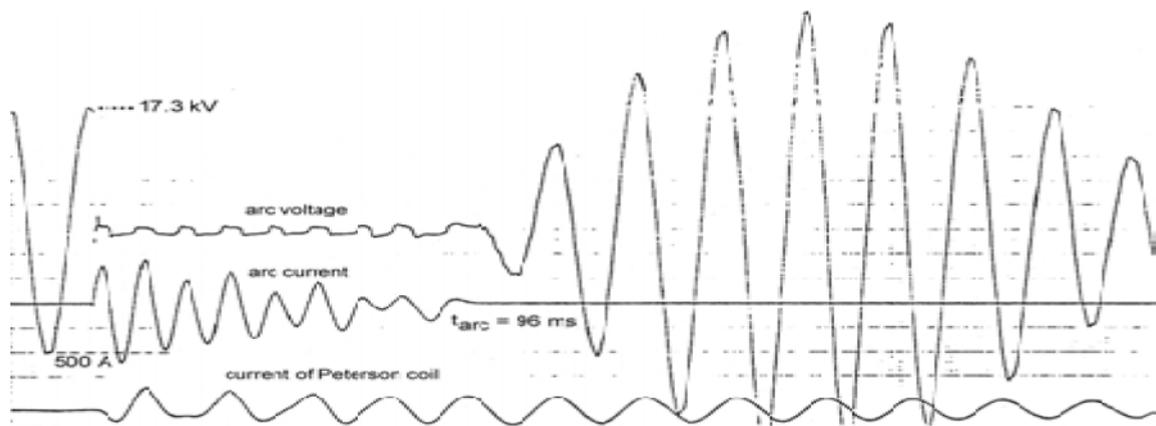


Figure (III.15) :forme d'ondes enregistré de la tension d'arc , le courant d'arc et le courant dans la bobine de Peterson , quand l'arc de défaut à la terre a été enclenché lorsque la tension est maximale [10].

Les figures suivantes ont été rapportées dans [10] :l'auteur a utilisé le logiciel ATP-EMTP pour la simulation du schéma de la figure (III.14).

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

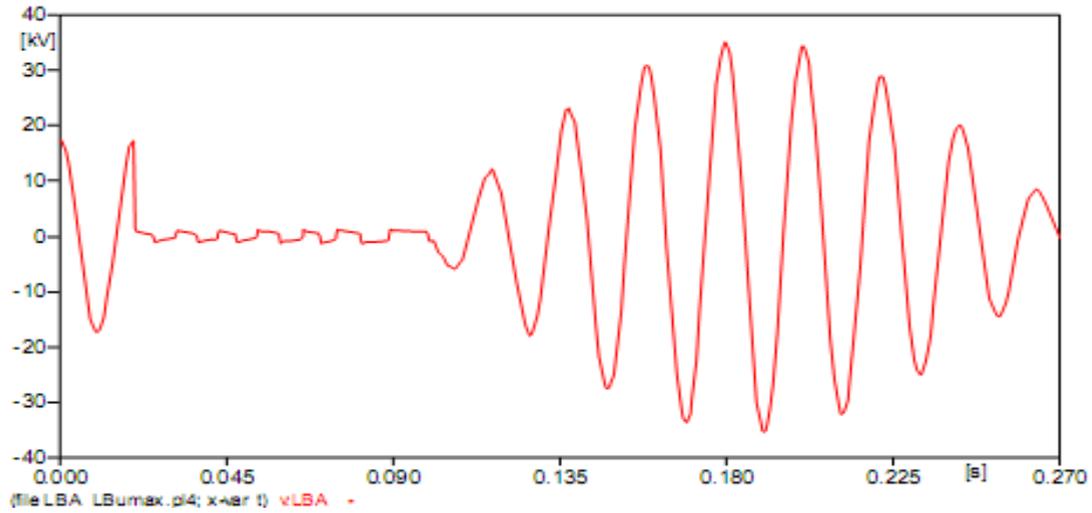


Figure (III.16) : forme d'ondes de la tension à l'endroit de défaut comparé à la forme d'onde de la figure (III.15)

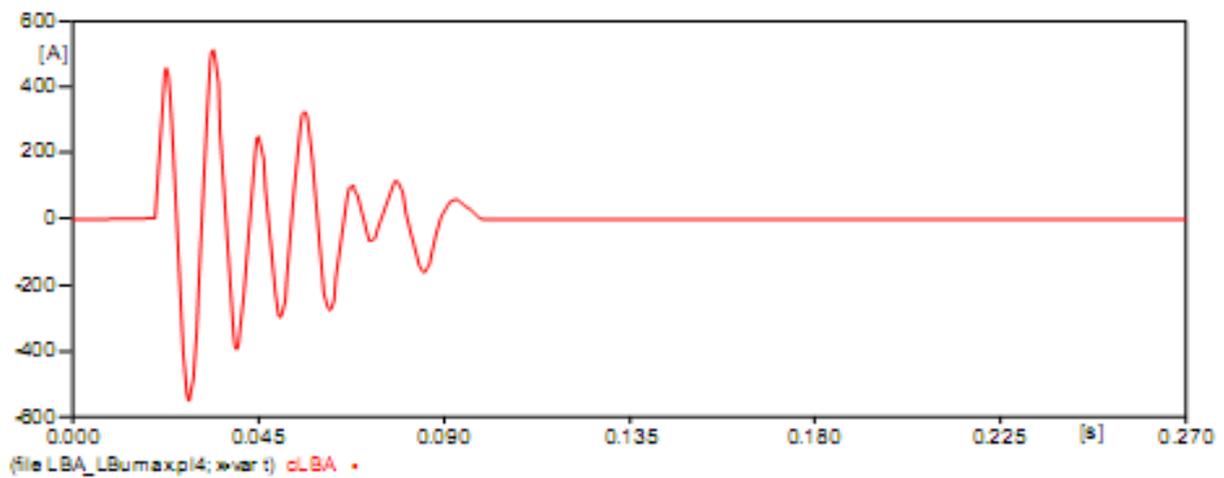


Figure (III.17): la forme d'onde du courant de défaut à la terre calculé comparé a la forme d'onde de l figure (III.16).

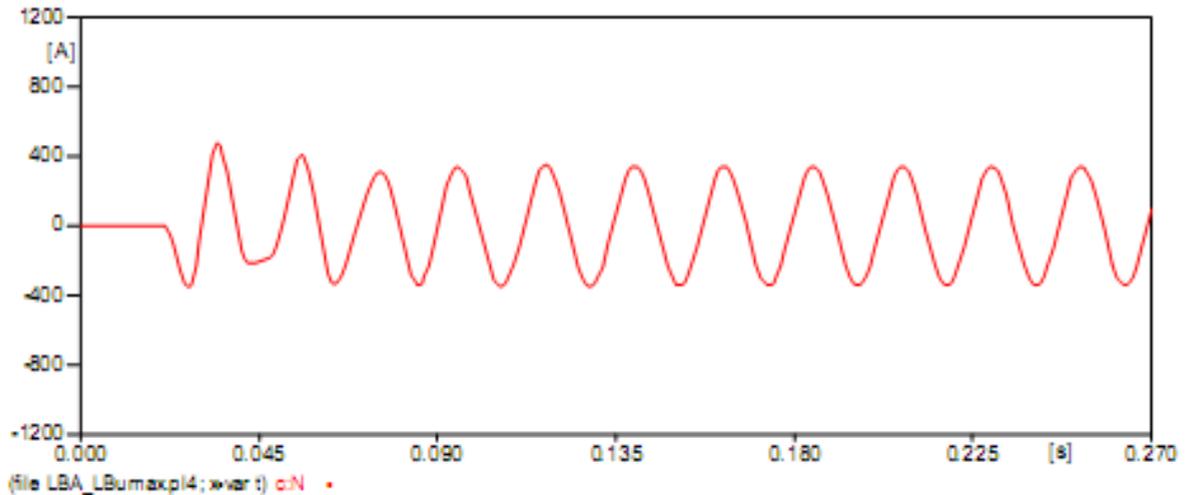


Figure (III.18): la forme d'onde du courant de la bobine de Peterson calculé comparé à la forme d'onde de la figure (III.15).

### C) Les résultats de Simulation D'Arc [10]

Selon les paramètres de l'arc de défaut a la terre à travers l'isolateur de la ligne de 20-kV utilisé :

$$\tau_0 = 0.25\text{ms} , \alpha = -0.4, l_0 = 0.20\text{m}$$

La vitesse d'élongation de l'arc est déterminée par les relations suivantes pour les deux cas d'essai pour lesquelles les mesures ont été faites :

-début de défaut au moment où la tension est maximale (crête) :

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{8l_0 - l_0}{200 \text{ ms}}$$

-début de défaut au moment où la tension passe par zéro :

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{8l_0 - l_0}{400 \text{ ms}}$$

Selon la fonction de temps définie pour la longueur de l'arc, les  $u_0$ , le  $R_0$  et  $\tau_0$  sont calculé utilisant (4), (5) et (6), respectivement. Les schémas 5, 8, 9 montrent les résultats de simulation correspondant aux enregistrements de l'essai d'arc sur le schéma 4, considérant que les figures : (III.20), (III.21),

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

(III.22) montrent les formes d'onde calculées correspond aux enregistrements de l'essai d'arc dans La figure (III.19)). Dans le cas du début de défaut au maximum de la tension, l'arc se maintient seulement pour une durée de 80 ms comparée à 96 ms dans l'essai d'arc [10]. Dans la deuxième simulation cas où le début de défaut à la valeur zéro de tension, aucune extinction d'arc n'a observé au cours de la période de simulation de 0.4 s.

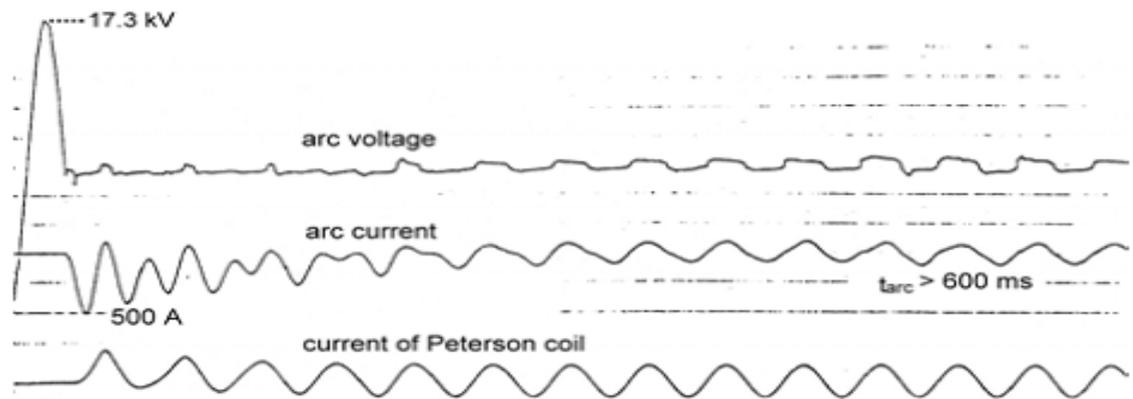
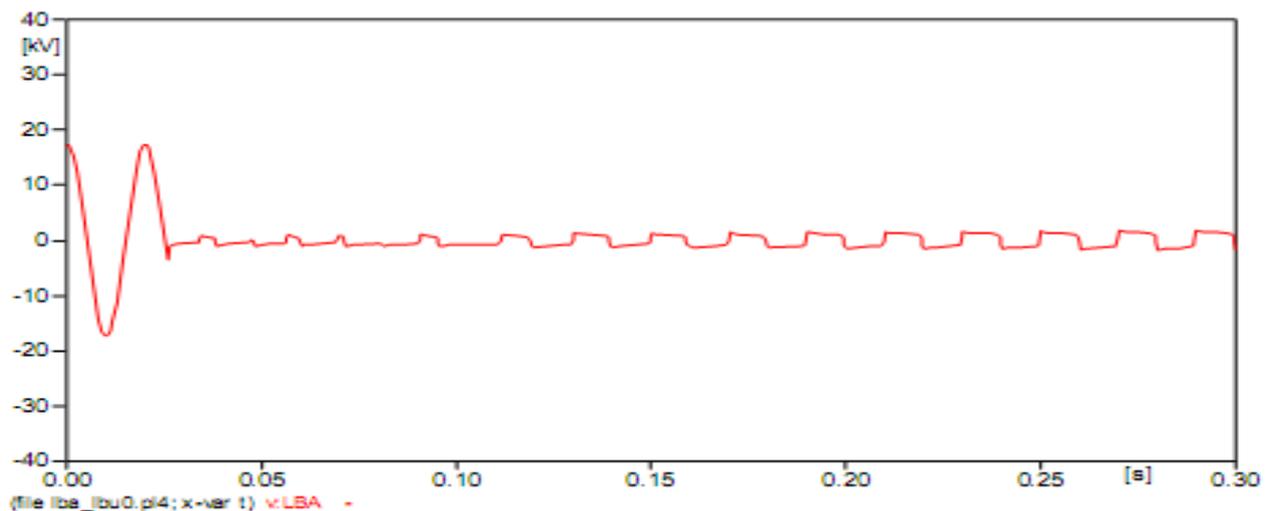
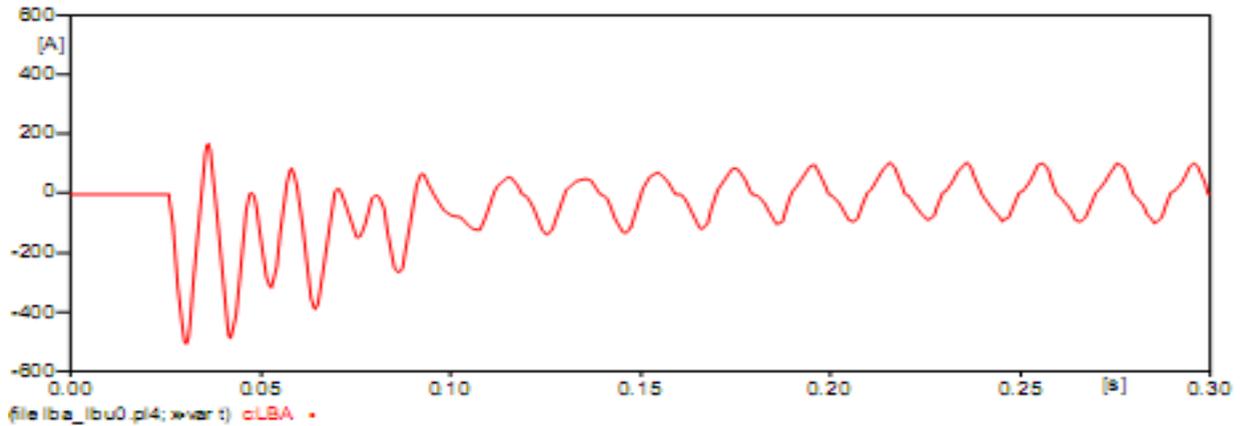


Figure (III.19): forme d'ondes enregistré pour : la tension d'arc, le courant d'arc et le courant de la bobine de Peterson pour un enclenchement de défaut au moment où la tension passé par sa valeur zéro.



Figure(III.20): la forme d'onde de la tension calculée à l'endroit de défaut comparé à la forme d'onde de l figure (III.19).



Figure(III.21): la forme d'onde du courant calculée comparé à la forme d'onde de la figure (III.19)

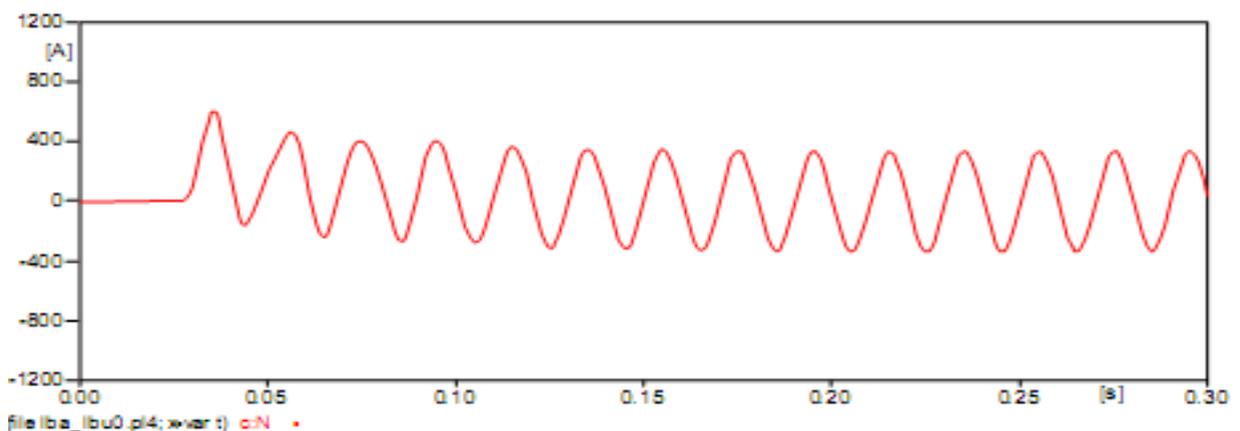


Figure (III.22): la forme d'onde du courant de la bobine de Peterson calculé comparé à la forme d'onde de la figure(III.19).

#### 4.3 Extinction des arcs de défaut [10]:

Des essais sur l'extinction de l'arc de défaut ont été faits en Allemagne (Laboratoire des essais haute puissance) sur les systèmes 20kV relativement ça fait longtemps. Les enregistrements de défaut à la terre (arc) ont été montrés pour certains cas dans [10], où le but principal de ces essais était la détermination de l'influence de contenu harmonique dans le courant de défaut phase-terre sur la durée de l'arc. Pour les systèmes de 10kV avec la bobine de Peterson, cette limite est à 60 A (valeur efficace).

Les divers facteurs influencent l'extinction de l'arc.

L'élévation lente de la tension de rétablissement après l'extinction d'arc dans les systèmes est favorable pour la plus courte durée de l'arc. La longueur

### CHAPITRE III : Théories de la création des surtensions et de l'arc électrique.

d'arc et selon elle, la constante de temps d'arc sont des facteurs importants pour l'auto-extinction de l'arc. Physiquement, la constante de temps de l'arc définit la vitesse de changement de la conductibilité d'arc dépendamment de la quantité d'énergie de l'arc et de la puissance thermique dissipée.

En utilisant le modèle d'arc décrit précédemment le courant limite de l'auto-extinction est déterminée par le moyen de plusieurs série de simulations, pour ce but l'inductance de la bobine de Peterson a été changé dans les deux directions [10], c.-à-d l'opération au dessus - et au dessous de la région de la compensation est réalisé. Pour être sûr après ces hypothèses qui ont faites pour la modélisation :

1- la longueur d'arc minimum est choisie comme (0.15 m)

2- aucune élongation d'arc pendant la durée de défaut.

3- pas de variation de la constante de temps de l'arc avec  $\tau = 0.25\text{ms}$  (la valeur moyenne) et  $\tau = 0.5 \text{ ms}$ . (Valeur élevée, le cas les plus pires concernant l'extinction d'arc).

Pour surtout un système d'essai de 10kV les courants limites d'auto-extinction sont récapitulés dans le tableau (2) selon la constante de temps d'arc [10]. Les courants limites sont des valeurs efficaces de courants de défaut phase-terre déterminés par un calcul additionnel fixe à 50 hertz sans la modélisation de l'arc de défaut.

Certainement, l'arc peut s'éteindre dans le cas de plus grand courants de défaut phase-terre, si l'arc est prolongé par le vent et la flottabilité thermique.

arc time constant $\tau$ (ms)	detuning degree $\nu$	earth fault current (A)
0.25	+60 %	46.2
0.25	-60 %	47.6
0.5	+35 %	25.9
0.5	-20 %	16.4

Tableau (1) : le courant limite de l'auto extinction pour un arc de défaut entre une ligne et la terre dans un système d'essai de 10kv. [10]

Les figures (III.23) et (III.24) montrent respectivement les formes d'ondes de la tension et du courant d'arc pour le cas, où l'arc atteint cinq fois sa longueur initiale,  $l_0 = 0.15 \text{ m}$ , au moins de 0.2 s. le coefficient  $\alpha$  de la constante de temps est

choisi comme étant zéro.

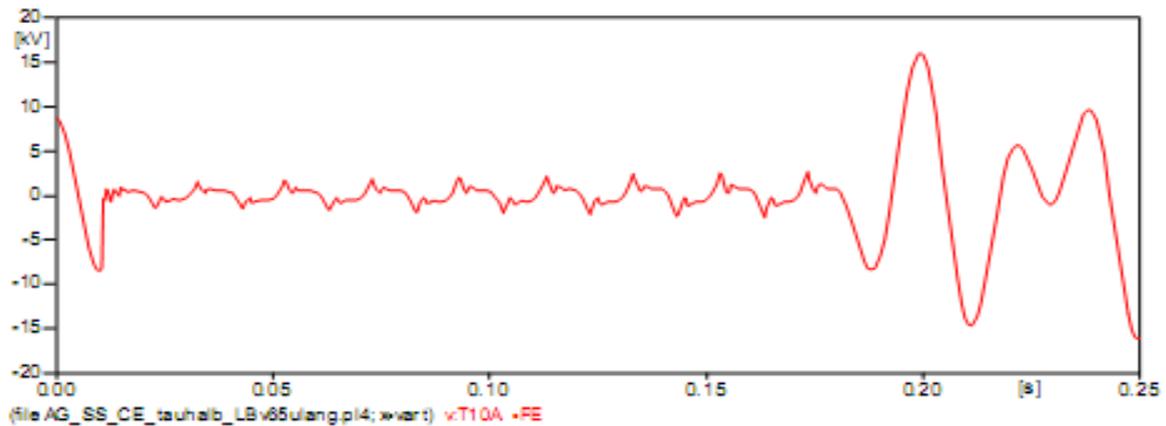


Figure (III.23) : la tension à l'endroit de défaut (phase A) dans le cas de l'allongement de l'arc.

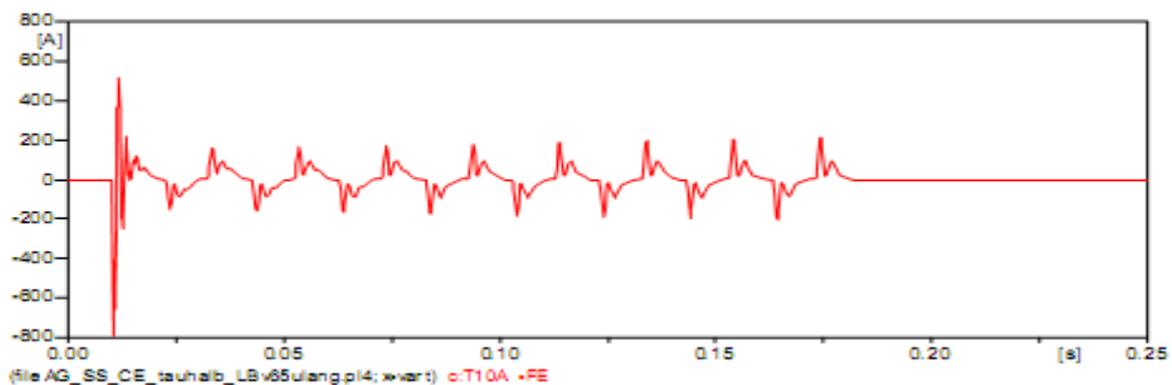


Figure (III.24) : courant d'arc de défaut avec référence à La figure (III.23)

## Conclusion

Un modèle d'arc a été dans systèmes résonnant de moyenne tension mis à la terre à travers une bobine d'extinction de Peterson. Le modèle d'arc prend en considération l'interaction dynamique de l'arc avec le circuit électrique restant. En raison du comportement fortement aléatoire de l'arc il est difficile de reproduire le vrai phénomène d'extinction d'arc par des simulations numériques. Malgré cette difficulté le modèle d'arc peut être utilisé avec succès pour trouver les facteurs principaux de l'interaction de l'arc avec un système de puissance et pour définir les conditions de l'extinction d'arc dans un système électrique. Il est possible de conclure que l'arc de manière significative atténue des coupures provoquées par la propagation d'ondes sur les lignes, en tant que ce phénomène a été observé dans les mesures sur le terrain [10].

**Etude Des Surtensions  
D'amorçage D'arc Dans Un  
Réseau De Tension  
Nominale 110kV**

## Introduction :

Ce chapitre est consacré pour l'étude des surtensions d'amorçage d'arc pour le réseau représenté sur la figure (IV-1).

Dans l'étude nous avons considéré les questions des influences des différents régimes du neutre, de la phase du commencement de c.c et la création de l'arc sur les surtensions d'amorçage d'arc.

### IV-1) Définition du réseau :

Le réseau considéré est de tension nominale de 110kV. Pour les réseaux de cette tension nominale on applique les différents régimes du neutre, mis directement à la terre, isolé de la terre, mis à la terre à travers soit une résistance, soit une réactance (bobine de peterson) en dépendance de la valeur du courant de capacité de réseau.

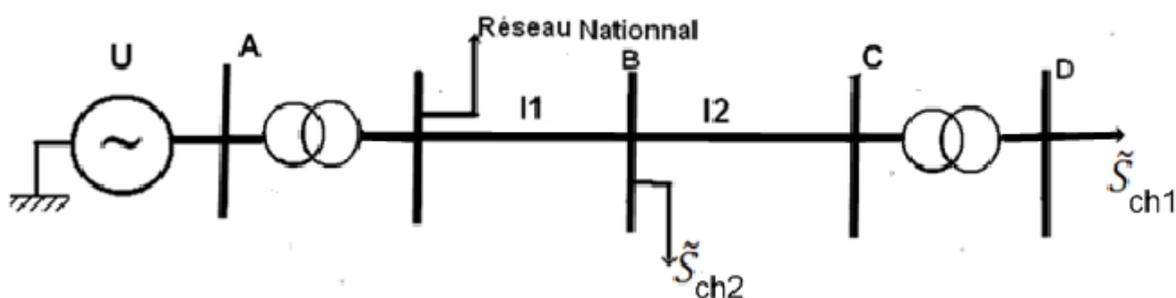


Figure (IV-1): schéma de principe du réseau

On considère un court circuit monophasé sur la phase A au niveau de jeu de barre B. Ce réseau est constitué de trois alternateurs dont la puissance et la tension nominale sont respectivement  $3 \times 25\text{MVA}$  et  $10.5\text{kV}$ , la tension de l'énergie électrique produite est augmenté par deux transformateurs élévateurs de puissance  $S_{\text{tr}} = 2 \times 40\text{MVA}$  et de tension nominale de  $10.5/115\text{kV}$ . Une grande partie de l'énergie produite est donnée au grand réseau. L'énergie restante est transportée vers les charges  $S_{\text{ch1}}$  et  $S_{\text{ch2}}$  se trouvant dans les postes B et C. Les postes A, B et C sont liés par les lignes  $l_1$  et  $l_2$ .

L'étude est réalisée par la méthode de modélisation mathématique. En utilisant le logiciel Orcad 10.5. Sur le schéma équivalent, la charge  $S_{\text{ch2}}$  est réduite à côté de HT, les lignes sont représentés par le schéma équivalent de la forme "T". On tient compte aussi des capacités du jeu de barre B par rapport à la terre.

Le C.C monophasé est modélisé par quatre interrupteurs réalisant deux allumages et deux extinctions de c.c.

### IV-2) Schéma équivalent de réseau :

Le schéma équivalent est représenté sur la figure (IV-2).

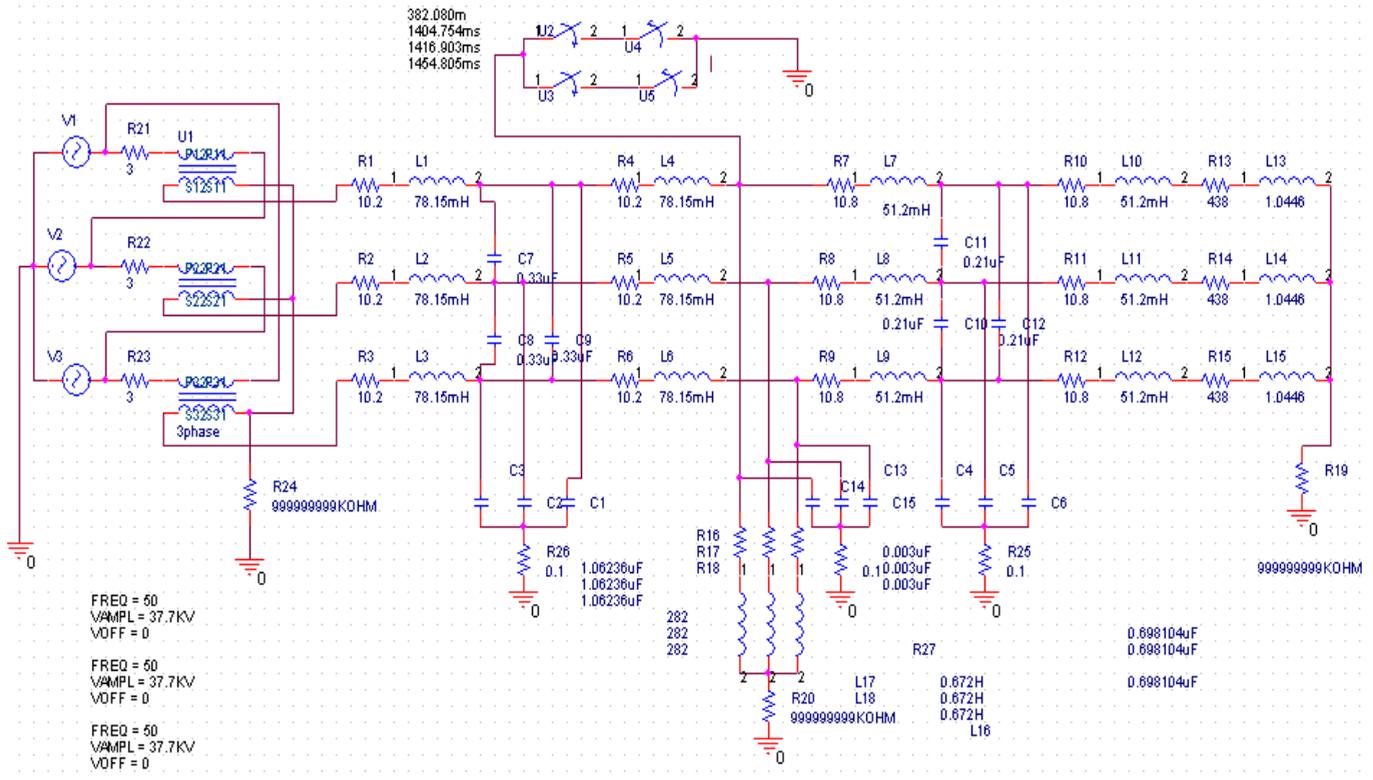


Figure (IV-2) : le schéma équivalent du réseau.

### IV-3): Calcul des paramètres du réseau

#### IV-3-1): Calcul des paramètres des lignes $l_1$ et $l_2$

Calculons les paramètres de schéma équivalent représenté sur la figure (IV-2).

- Calcul de la résistance (R)

$$R_l = r_0 \cdot l \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= \rho \frac{1}{S} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Tel que :

$R_l$  = La résistance de la ligne ( ).

Où :

$r_0$  : la résistance kilométrique de la ligne ( /km).

$l$  : La longueur de la ligne (km).

$\rho$  : la résistivité électrique du matériau ( $\text{mm}^2/\text{km}$ ).

$S$  : section du conducteur ( $\text{mm}^2$ ).

• **Calcul de l'inductance (L) :**

$$X_L = x_0 * l. \quad (3)$$

$$x_0 = 0.144 \log \frac{D_m}{r_c} + 0.016 \quad (\text{/km}). \quad (4)$$

Où :

$X_0$  : réactance kilométrique de la ligne ( $\text{/km}$ ).

$X_L$ : réactance de la ligne( ).

$$D_m = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3} \quad (\text{m}). \quad (5)$$

$D_m$  : distance moyenne des conducteurs des trois phases.

$D_1, D_2$  et  $D_3$  : sont les distances entres conducteurs.

$r_c$  : rayon d'un seul conducteur (m).

Dans le cas où les conducteurs sont placés aux sommets d'un triangle alors:  $D_1 = D_2 = D_3$  .

$$\text{Donc : } D_m = \sqrt[3]{D^3} = D.$$

Et si, sont placés horizontalement alors :

$$D_m = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} = \sqrt[3]{2D^3} = \sqrt[3]{2} \cdot D = 1.26D.$$

D'où:

$$L_l = L_0 * l \quad (\text{H}). \quad (6)$$

$$L_0 = \frac{x_0}{w} \quad (\text{H/km}). \quad (7)$$

Tel que :

$L_l$  : L'inductance de la ligne (H).

$L_0$  : l'inductance kilométrique de la ligne (H/km).

• **Calculs des capacités :**

$$B = B_0 * l. \quad (8)$$

$$B_0 = 7.5 * 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_c}. \quad (9)$$

$$C_0 = \frac{B_0}{w}. \quad (10)$$

$$C = C_0 * l \text{ (F)}. \quad (11)$$

Avec :

$B_0$  : susceptance kilométrique (1/km ).

$C_0$  : capacité kilométrique de la ligne (F/km).

$C_l$  : Capacité de la ligne (F).

➤ **Ligne1 :**

Les conducteurs de la ligne 1 est de type AA-185 et de longueur  $l_1=120$  km.

**1) Résistance :**

Pour le conducteur AA-185 on a:

$$r_{01} = 0.17 \text{ ( /km)}.$$

Alors :

$$R_{l1} = r_{01} * L_{01} = 0.17 * 120 = 20.4 \text{ ( )}.$$

**2) Inductance :**

$$\text{On a: } x_{01} = 0.144 \log \frac{D_m}{r_{c1}} + 0.016 \left( \frac{\mu}{\text{km}} \right).$$

Pour une ligne AA-185  $d_{c1} = 19.1$ mm. Alors :  $r_{c1} = 9.55$ mm.

Et :  $D_m = 5$ m.

$$\text{Donc : } x_{01} = 0.409 \text{ ( /km)}.$$

$$\text{Et : } L_{01} = \frac{x_{01}}{w} = \frac{x_{01}}{2\pi \cdot 50} = 1.3025 \text{ (mH/km)}.$$

$$\text{Donc : } L_{l1} = L_{01} \cdot l_1 = 1.3025 * 120 = 156.3 \text{ (mH)}.$$

**3) capacités :**

$$\text{On a: } B_{01} = 7.5 * 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_{c1}}.$$

$$C_{01} = \frac{B_{01}}{w} .$$

Toujours pour  $d_{c1} = 19.1\text{mm}$  et  $D_m = 5\text{m}$ .

$$c_{01} = 0.00853 (\mu\text{F}/\text{km}).$$

$$\text{Et : } C_{l1} = c_{01} \quad l_1 = 0.00853 * 120 = 1.0236 (\mu\text{F}).$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{31} = (0.25 \div 0.4) C_{10} = 0.33 (\mu\text{F}).$$

### ➤ La ligne 2 :

La ligne 2 est de type AA -120 et de longueur  $l_2 = 80 \text{ km}$ .

#### 1) La résistance :

$$r_{02} = 0.27 (\text{ } /\text{km}).$$

$$R_{l2} = r_{02} * l_2 = 0.27 * 80 = 21.6 (\text{ } ).$$

#### 2) L'inductance :

$$\text{On a : } x_{02} = 0.144 \log \frac{D_m}{r_{c2}} + 0.016 \left( \frac{\text{ } }{\text{km}} \right).$$

Pour une ligne AA-185  $d_{c2} = 19.1\text{mm}$ . Alors :  $r_{c2} = 9.55\text{mm}$ .

$$\text{Et : } D_m = 4.6\text{m}.$$

$$x_{02} = 0.402 (\text{ } /\text{km}).$$

$$L_{02} = \frac{x_{02}}{w} = \frac{x_{02}}{2\pi 50} = 1.28 (\text{mH}/\text{km}).$$

$$\text{Donc : } L_{l2} = L_{02} \quad l_2 = 1.28 * 80 = 102.4 (\text{mH}).$$

#### 3) Les capacités :

$$\text{On a : } B_{02} = 7.5 * 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_c} .$$

$$C_{02} = \frac{B_{02}}{w} .$$

Toujours pour  $d_{c2} = 19.1\text{mm}$  et  $D_m = 4.6\text{m}$ .

$$C_{02} = 0.0087263 (\mu\text{F}/\text{km}).$$

$$C_{l2} = C_{02} * l_2 = 0.0087263 * 80 = 0.698104 (\mu\text{F}).$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{31} = (0.25 \div 0.4) C_{20} = 0.21 (\mu\text{F}).$$

NB : dans les lignes de 110KV, la conductibilité  $j$  est négligeable car l'effet couronne n'apparaît qu'à partir de 220kv.

➤ **Le jeu de barre :**

$$C_{jb} = 0.003 \text{ (}\mu\text{F)}. \text{ (21)}$$

Avec :  $C_{jb}$  : capacité de jeu barre.

#### **IV-3-2): calcul des paramètres des charges ch<sub>1</sub> et ch<sub>2</sub>:**

##### **1) La charge 1 (ch<sub>1</sub>) :**

On a:  $S_{ch_1} = 34 \text{ MVA}$  et  $\cos \varphi = 0.8$ .

$$\tilde{S}_{ch_1} = 34 \cdot 0.8 + j34 \cdot 0.6 = 27.2 + j 20.4 \text{ MVA.}$$

$$U_n = 110 \text{ kV.}$$

Le courant de cette charge est de:  $I_{ch_1} = \frac{34000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 178.9 \text{ (A)}$ .

$$I_{ch_1n} = 180 \text{ (kA)}$$

$$\cos \varphi = 0.8.$$

Avec :  $U_n$  et  $I_{ch_1n}$  la tension et courant nominale de la charge.

$$\text{Or: } Z_{ch_1} = U_n / \sqrt{3} I_n = \frac{110000}{\sqrt{3} \cdot 180} = 353 \text{ (}\Omega\text{)}.$$

$$\text{Et: } \underline{Z}_{ch_1} = Z_{ch_1} \cos \varphi + j Z_{ch_1} \sin \varphi \text{ (}\Omega\text{)}.$$

$$\underline{Z}_{ch_1} = 353 \cdot 0.8 + j353 \cdot 0.6 = 282 + j210 \text{ (}\Omega\text{)}.$$

$$\text{D'où: } R_{ch_1} = 282 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$L_{ch_1} = \frac{210}{\omega} = \frac{210}{314} = 0.672 \text{ (H)}$$

##### **2) La charge 2 (ch<sub>2</sub>) :**

On a:  $S_{ch_2} = 22 \text{ MVA}$  et  $\cos \varphi = 0.8$ .

$$\tilde{S}_{ch_2} = 22 \cdot 0.8 + j22 \cdot 0.6 = 17.6 + j13.2 \text{ MVA.}$$

$$U_n = 110 \text{ kV.}$$

$$I_{ch_2} = \frac{22000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 115.47 \text{ (A)}$$

$$I_{ch_2n} = 116 \text{ A.}$$

Avec:  $I_{ch_2n}$  le courant nominale de la charge.

$$\text{Or: } Z_{ch_2} = U_n / \sqrt{3} I_n = \frac{110000}{\sqrt{3} \cdot 160} = 548 \text{ ( } \Omega \text{ )}.$$

$$\text{Et : } \underline{Z}_{ch_2} = Z_{ch_2} \cos \varphi + j Z_{ch_2} \sin \varphi \text{ ( } \Omega \text{ )}.$$

$$\underline{Z}_{ch_2} = 548 * 0.8 + j548 * 0.6 \text{ ( } \Omega \text{ )} = 438.4 + j 328.8 \text{ ( } \Omega \text{ )}.$$

$$\text{D'où : } R_{ch_2} = 438.4 \text{ ( } \Omega \text{ )}.$$

$$L_{ch_1} = \frac{328.8}{\omega} = \frac{328.8}{314} = 1.0471 \text{ (H)}.$$

**NB:** puisque le schéma équivalent de la ligne est en forme "T" alors sur le schéma de calcul nous avons les résistances et les inductances divisées par deux et les capacités restent les mêmes.

**Alors :**

$$R_{l_1} = \frac{20.4}{2} = 10.2 \text{ ( } \Omega \text{ )}.$$

$$L_{l_1} = \frac{156.3}{2} = 78.15 \text{ (mH)}.$$

$$C_{l_1} = 1.06236 \text{ (}\mu\text{F)}.$$

Et :

$$R_{l_2} = \frac{21.6}{2} = 10.8 \text{ ( } \Omega \text{ )}.$$

$$L_{l_2} = \frac{102.4}{2} = 51.2 \text{ (mH)}.$$

$$C_{l_2} = 0.698104 \text{ (}\mu\text{F)}.$$

#### **IV-4) Simulation et interprétation des résultats:**

Notre étude est faite par la méthode mathématique en utilisant le logiciel Orcad 10.5 (P Spice).

On a fait les calculs (simulations) pour les différents régimes de neutre et différentes valeurs de phase de court circuit ( $\varphi_{c.c}$ ). Pour cela on a considéré le neutre isolé de la terre, mis directement à la terre, mis à la terre à travers une résistance (pour limiter les courants de court circuit) et mis à terre via une bobine (bobine de Peterson) pour limiter les courants de c.c et compenser les courants capacitifs. Le court circuit est modélisé par les commutateurs U1, U2, U3, U4. Sur le schéma de calcul, U1 est le commutateur à l'aide duquel on mit à la terre le conducteur de la phase A. A l'instant où le courant transitoire ou le courant de la fréquence 50 Hz (le courant forcé) passe à sa valeur zéro, l'arc crée sur le point de C.C s'éteint à l'aide de commutateur U2. Dans une demi-période, lorsque la

tension sur la phase endommagée atteint sa valeur maximale négative, une deuxième fois l'arc s'allume et ceci est réalisé sur le schéma par la fermeture du commutateur U3 et son extinction se fait à laide de commutateur U4.

Les résultats de calculs sont représentés dans les tableaux (IV-1) ÷ (IV-3), de (1) ÷ (6) dans annexes, sur les figures (IV-3) ÷ (IV-9) et les figures (1) ÷ (20) dans annexes.

- **Simulation avec neutre isolé de la terre :**

On suppose que les courants capacitifs soient assez petits.

Les résultats des calculs sont représentés dans le tableau (IV-1) et les figures (IV-3) ÷ (IV-5).

Le tableau (IV-1) et les figures (IV-3) et (IV-5), montrent l'évolution des surtensions des phases A, B et C en fonction de la phase d'enclenchement et de déclenchement de l'arc électrique.

tarc on/tarc off	$\phi$ [DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1= $\infty$	$U_{MAX}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1= $\infty$	$U_{B_{MAX}}$	-100.518	-119.171	-139.445	110.779	-100.518	115.343	137.502	-113.351	-100.518
tc1/top1= $\infty$	$U_{C_{MAX}}$	-104.364	-113.556	107.666	116.027	-104.364	114.983	-108.233	-115.633	-104.364
tc1/top1 ( $I_{tr}=0$ )	$U_{MAX}$	-117.156	-136.086	-142.253	-102.478	-117.156	72.616	142.392	102.776	-117.156
tc1/top1 ( $I_{tr}=0$ )	$U_{B_{MAX}}$	-119.281	-140.997	-143.388	-102.850	-119.281	115.343	141.896	99.877	-119.281
tc1/top1 ( $I_{tr}=0$ )	$U_{C_{MAX}}$	-114.985	133.456	136.338	-91.105	114.985	114.983	137.797	91.553	114.985
tc1/top1 ( $I_{e0}=0$ )	$U_{MAX}$	109.777	-111.756	125.040	-117.023	109.777	111.790	109.677	115.134	109.777
tc1/top1 ( $I_{e0}=0$ )	$U_{B_{MAX}}$	109.624	-114.158	128.489	-119.110	109.624	112.198	108.922	116.544	109.624
tc1/top1 ( $I_{e0}=0$ )	$U_{C_{MAX}}$	110.159	-112.274	123.308	-115.447	110.159	112.465	108.686	116.192	110.159
tc2/top2= $\infty$	$U_{MAX}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2= $\infty$	$U_{B_{MAX}}$	177.368	180.096	-183.318	180.548	177.368	-181.192	-177.208	184.505	177.368
tc2/top2= $\infty$	$U_{C_{MAX}}$	126.183	126.750	-147.79	122.675	126.183	-135.26	129.211	-129.62	126.183
tc2/top2 ( $I_{tr}=0$ )	$U_{MAX}$	-172.324	180.727	-131.707	-125.185	-172.324	-132.880	109.172	118.474	-172.324
tc2/top2 ( $I_{tr}=0$ )	$U_{B_{MAX}}$	-177.368	183.473	-142.833	-126.142	-177.368	-144.535	137.502	117.800	-177.368
tc2/top2 ( $I_{tr}=0$ )	$U_{C_{MAX}}$	-167.292	175.625	113.696	130.824	167.292	106.678	112.426	125.065	-167.292
tc2/top2 ( $I_{e0}=0$ )	$U_{MAX}$	138.609	114.085	-108.02	116.390	138.609	83.614	-105.89	-103.49	138.609
tc2/top2 ( $I_{e0}=0$ )	$U_{B_{MAX}}$	143.005	111.864	-110.88	117.273	143.005	82.226	-104.62	-106.71	143.005
tc2/top2 ( $I_{e0}=0$ )	$U_{C_{MAX}}$	133.389	112.409	-108.80	116.601	133.389	81.516	-107.98	-111.91	133.389

**Tableau (IV-1) :** l'évolution des surtensions des phases A, B et C en fonction de la phase d'enclenchement et de déclenchement de l'arc électrique .

A l'instant d'apparition de court circuit lors de ( $\varphi_{CC} = 90^\circ$ ), la tension de la phase endommagée (phase A) devienne nulle et les tensions des phases saines (phases B et C) augmentent respectivement jusqu'à 139.445kV et 107.666kV.

A l'instant où l'arc s'éteint, toutes les surtensions des trois phases augmentent respectivement jusqu'à 142.392kV, 143.388kV et 136.338kV. (Comme le montre la figure (IV-3)).

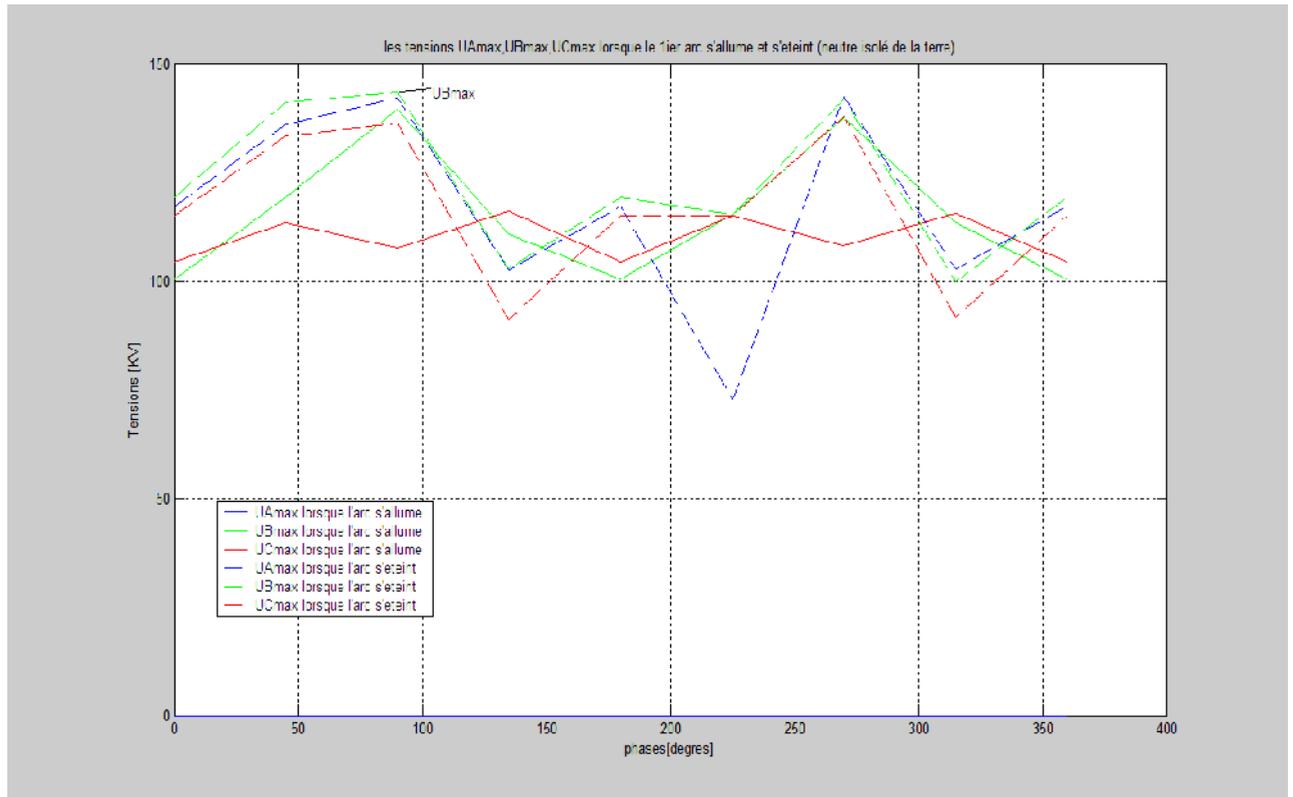


Figure (IV-3) : les tensions  $U_{A \text{ MAX}}$ ,  $U_{B \text{ MAX}}$  et  $U_{C \text{ MAX}}$ , lorsque le 1<sup>er</sup> arc s'allume et s'éteint (neutre isolé de la terre).

L'extinction de l'arc a été considérée aux moments où le courant transitoire ou le courant forcé passe respectivement par sa valeur zéro pour la 1<sup>ère</sup> fois. Le tableau précédent montre que l'extinction de l'arc lors de passage du courant transitoire par sa valeur zéro crée les plus grandes valeurs des surtensions (la différence est environ 17kV).

Puis on allume et on éteint l'arc pour la deuxième fois, les surtensions dans les phases augmentent encore respectivement jusqu'à 183.318kV, 147.79kV et 131.707kV. Ces augmentations sont considérables Comme le montre la figure (IV-4).

Ces calculs ont été faits aussi pour les valeurs de la phase de C différent de  $\varphi = 90^\circ$ .

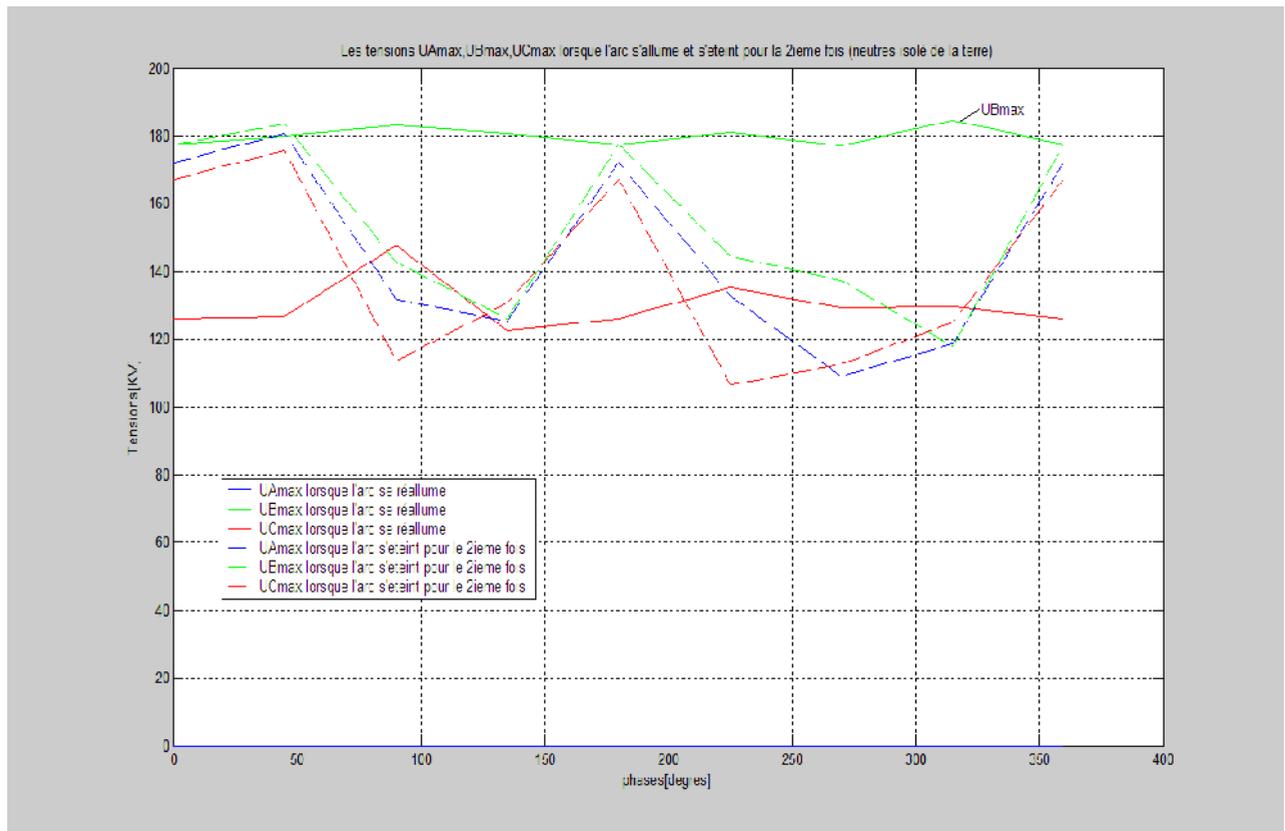


Figure (VI-4): les tensions  $U_{A \text{ MAX}}$ ,  $U_{B \text{ MAX}}$  et  $U_{C \text{ MAX}}$ , lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume et s'éteint (neutre isolé de la terre).

- Evidement que les plus grandes valeurs de ces trois surtensions correspondent au cas où  $(\varphi_{CC} = 90^\circ$  ou  $\varphi_{CC} = 270^\circ)$  et les plus petites au cas où
- $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$  et  $\varphi_{CC} = 360^\circ$ ).

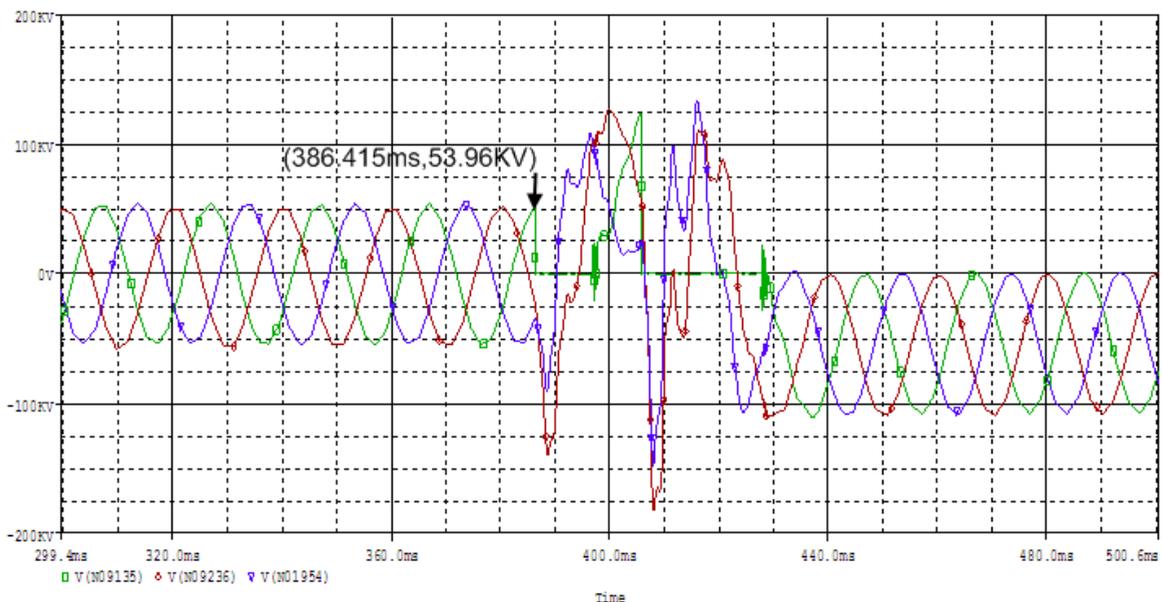


Figure (IV-5): les tensions  $U_A$ ,  $U_B$  et  $U_C$  en fonction du temps pour l'allumage et l'extinction de deux arcs consécutives pour le neutre isolé de la terre.

Les courbes des trois tensions  $U_A$ ,  $U_B$  et  $U_C$  lors de la commutation des 4 commutateurs sont représentées sur la figure (IV-5). A l'instant  $t= 386.417\text{ms}$ , le c.c sur la phase A arrive, la tension de cette phase passe de sa valeur maximale à la valeur zéro,  $U_B$  et  $U_C$  augmentent. A l'instant  $t=388.905\text{ms}$  où le courant transitoire passe à sa valeur zéro, l'arc s'éteint et la tension  $U_A$  s'établit. Puis, au moment  $t=405.900\text{ms}$  la tension de la phase endommagée passe à sa valeur maximale négative, l'arc s'allume pour la deuxième fois et  $U_A$  s'annule encore une fois. Et après avoir éteindre une deuxième fois l'arc, cette tension  $U_A$  s'établit en atteignant la valeur 131.707kV. Lors de ces changements du régime, surtout après le deuxième allumage de l'arc, les tensions des phases B et C augmentent respectivement jusqu'à 183.3 et 147.8kV. Comme on voit l'augmentation des tensions sont, sur la phase endommagée  $\frac{131.707}{63.58} = 2.072$  et sur la phase saine  $\frac{183.3}{63.58} = 2.88$ .

Comme on voit du tableau IV-1 les valeurs maximales des tensions de la phase endommagée et des phases saines lors de deuxième allumage de l'arc ont lieu quand  $\varphi_{CC} = 45^\circ$ . Ceci est traduit par l'accumulation des tensions par l'allumage et l'extinction de l'arc.

- **simulation avec le cas de neutre mis directement à la terre :**

Pour le cas où le neutre est mis à la terre, nous avons suivi la même procédure que le cas où le neutre isolé de la terre, afin de montrer que dans tous les cas les surtensions ne dépassent pas les valeurs de cas précédent. Mais en réalité le contact à la terre d'une phase dans les réseaux fonctionnant avec le neutre mis directement à la terre est un court circuit. Le courant augmente à des valeurs très élevées et la protection débranche cette partie endommagée du réseau. La mise à la terre du neutre ne permette de changer les tensions des autres phases B et C.

L'évolution des surtensions des phases A, B et C est mentionné dans le tableau (1) et les figures (5), (6) et (1) correspondant au cas de neutre mis à la terre (voir annexes). Les valeurs de ces surtensions sont en fonction de la phase d'enclenchement et de déclenchement de l'arc électrique. A l'instant d'apparition de court circuit, la tension de la phase endommagée (phase A) s'annule et les tensions des phases saines (phases B et C) presque ne changent pas, elles sont respectivement jusqu'à 61.692kV et 66.700kV. (Figure (6) dans l'annexe). Ces surtensions sont presque égales à celles du régime normal. A l'instant où l'arc s'éteint, la surtension de la phase A augmente jusqu'à 88.951kV. (Voir la figure (6) dans annexe).

L'extinction de l'arc se passe lorsque le courant transitoire ou le courant forcé passe par sa valeur zéro pour la 1ère fois.

On remarque que l'extinction de l'arc lorsque  $I_{tr}=0$  crée des surtensions plus importantes que lors de son extinction a  $I_{50HZ}=0$ , la différence peut atteindre 8kV.

Puis on allume et on éteint l'arc encore une fois, cette fois-ci la surtension de la phase A atteint la valeur 79.223kV. (Voir annexes, figure (1)).

Les résultats des calculs correspondants aux différentes valeurs de  $\varphi_{CC}$  montrent que la plus grande valeur de la tension de la phase A aura lieu si ( $\varphi_{CC} = 90^\circ$ ) et aussi ( $\varphi_{CC} = 270^\circ$ ) et la plus petite est dans le cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ) et  $\varphi_{CC} = 360^\circ$ .

Les courbes des trois tensions des phases A, B et C lors de la commutation de 4 commutateurs sont représentées sur la figure (5). A l'instant  $t = 385.926\text{ms}$ , il arrive un c.c sur la phase A, la tension  $U_A$  s'annule,  $U_B$  et  $U_C$  augmentent. A l'instant  $t = 395.733\text{ms}$  l'arc s'éteint et la tension  $U_A$  s'établit. Puis, au moment  $t = 426.878\text{ms}$  on allume l'arc une deuxième fois,  $U_A$  diminue jusqu'à 0kV et après avoir éteindre une deuxième fois l'arc, cette tension  $U_A$  atteint la valeur 79.233kV.

- **Simulation avec le neutre mis à terre à travers les différentes valeurs de  $R = (10, 20, 50 \text{ et } 100)$  .**

Dans les deux cas précédents on a étudié les surtensions sur notre réseau pour le neutre isolé de la terre ( $R = \infty$ ) et mis directement à la terre ( $R = 0$ ). Dans ce cas on a pris des valeurs variantes pour l'élément de neutre ( $R = 10, 20, 50 \text{ et } 100$ ) , pour but de montrer aussi, que les surtensions dans tous les cas ne dépassent pas les valeurs correspondantes au cas de neutre isolé de la terre. Même si dans ce cas le courant de court circuit reste très important.

Le développement des surtensions des phases A, B et C en fonction de la phase d'allumage et de l'extinction de l'arc électrique est représenté dans les tableaux (2) ÷ (5), les figures (7) ÷ (18), les figures (2) et (3) correspondants au cas de neutre mis à la terre via différentes valeurs de la résistance, ces tensions sont trouvées en suivant les mêmes étapes que précédemment.

Au moment de la création de C.C ( $\varphi_{CC} = 90^\circ$ ) la tension de la phase Endommagée (phase A) s'annule et les tensions des phases saines (phases B et C) augmentent par l'augmentation de la résistance du neutre  $R_N$ . (voir les figures (2) et (3)). Ces surtensions sont beaucoup plus petites par rapport à celles du cas où le neutre est isolé de la terre.

Régime de la phase A	$R_N(\Omega)$	$U_A(kV)$	$U_B(kV)$	$U_C(kV)$
L'arc s'allume première fois	10	0	69.992	61.348
	20	0	74.438	57.634
	50	0	86.732	66.239
	100	0	98.101	76.705
L'arc s'éteint première fois	10	77.703	62.482	58.026
	20	72.713	59.254	56.606
	50	59.690	56.227	58.157
	100	56.236	55.556	57.902
L'arc s'allume deuxième fois	10	0	67.932	62.208
	20	0	73.301	59.819
	50	0	89.201	68.015
	100	0	102.665	76.314
L'arc s'allume deuxième fois	10	76.722	64.039	57.810
	20	75.587	60.795	56.616
	50	59.979	56.098	58.157
	100	55.756	54.686	57.511

**Tableau (IV-2) :** les différentes valeurs des surtensions sur les phases B et C lors des différentes commutations des quatre des interrupteurs pour les différentes valeurs de la résistance de la mise à la terre de neutre.

Au moment où l'arc s'éteint, la surtension sur la phase A se rétablit et par l'augmentation  $R_N$  diminuée sa valeur. Les tensions des phases saines diminuent, parce que dès que l'arc s'éteint, la somme des tensions  $U_B + U_C$  se divise entre 3 phases.

L'extinction de l'arc est faite aussi lorsque le courant transitoire ou le courant de 50Hz (courant forcé) passe par sa valeur zéro pour la. L'extinction de l'arc lors de  $I_{tr}=0$  crée des surtensions plus grandes. La différence peut atteindre respectivement 5kV, 1kV, 0.4kV et 2kV.

Dans le cas où l'arc s'allume et s'éteint une deuxième fois, on trouve les mêmes allures de trois tensions  $U_A$ ,  $U_B$  et  $U_C$ .

Les courbes des trois tensions des phases A, B et C lors de la commutation des quatre commutateurs sont représentées sur les figures (IV-21) et (IV-24). Pour les différentes valeurs des résistances de neutre, aux instants  $t= 386.065ms$ ,  $385.259ms$ ,  $385.934ms$  et  $385.921ms$  respectivement arrive le court circuit sur la phase A. Sa tension devienne nulle, et celle des autres phases B et C augmente. Aux instants  $t=394.626ms$ ,  $394.129ms$ ,  $393.156ms$  et  $392.670ms$  respectivement, l'arc s'éteint et la tension  $U_A$  s'établit,  $U_B$  et  $U_C$  diminuent. Puis, aux moments  $t=434.833ms$ ,  $434.331ms$ ,  $433.062ms$  et  $432.333ms$  respectivement, l'arc s'allume pour une deuxième fois,  $U_A = 0$ ,  $U_B$  et  $U_C$  augmentent. Après avoir éteindre une deuxième fois l'arc, le comportement des tensions  $U_A$ ,  $U_B$  et  $U_C$  se répète comme dans les cas du premier allumage et l'extinction.

Les figures (11) et (12) de l'extinction de premier et de deuxième arc montrent que la tension ne change pas en augmentant la valeur de la résistance de neutre pour la phase A. Les tensions des phases B et C augmentent en augmentant la résistance de neutre, pour le 1<sup>er</sup> arc et le 2<sup>ième</sup> arc.

#### **IV-4-2 : simulation avec grands courants capacitifs (compensation des courants capacitifs) :**

- **simulation avec le neutre mis à la terre via une réactance (bobine de Peterson) :**

Différemment aux cas précédents (avec petits courants capacitifs), on mit le neutre à la terre via une bobine pour limiter les courants capacitifs et on procède à la création de surtension de la même façon que précédemment.

On détermine la valeur de l'inductance de la bobine de neutre de la façon suivante : le courant de neutre doit être proche de la somme des courants des capacités phases-terre ( $3I_C \approx I_{LN}$ ), mais elles ne doit pas être égales à cette somme ( $3I_C = I_{LN}$ ) car un phénomène de résonance peut se crée dans le réseau [3].

$I_{LN}$  : Le courant de la bobine de la mise à la terre.

$I_C$  : La somme des courants des capacités de trois phases-terre.

Nous avons mesuré la somme de trois courants capacitifs et d'après cette approche nous avons trouvé que  $L_N=0.25H$ .

Le tableau (6) et les figures (19), (20) et (4) illustrent l'évolution des surtensions des trois phases A, B et C en fonction de la phase de l'allumage et l'extinction de l'arc électrique.

A l'instant d'apparition de court circuit  $\varphi_{CC} = 90^\circ$ , la tension de la phase endommagée (phase A) devienne nulle et les tensions des phases saines (phases B et C) augmente respectivement jusqu'à 112.460kV et 93.914kV. Ces surtensions sont beaucoup plus petites par rapport au cas de neutre isolé de la terre et sont un peu plus grand par rapport au cas mis à terre.

Et au moment où l'arc s'éteint, la tension de la phase A augmente jusqu'à la valeur 93.910kV et celles des phases B et C diminuent respectivement jusqu'à 91.964kV et 93.496kV (comme le montre la figure (19)).

L'extinction de l'arc a été considérée lorsque le courant transitoire ou le courant forcé passe par sa valeur zéro pour la 1<sup>ère</sup> fois. Du tableau (6), on constate que l'extinction de l'arc lorsque le courant transitoire passe par sa valeur zéro crée des surtensions un peu plus grandes (la différence est environ de 7kV).

Le processus se répète lorsqu'on allume et on éteint l'arc une deuxième fois.

On remarque aussi dans ce cas que les plus grandes valeurs de ces trois surtensions correspondent au cas où  $\varphi_{CC} = 90^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 270^\circ$ ) et les plus petites correspondent au cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$  et  $\varphi_{CC} = 360^\circ$ ) et ça est vrai seulement lorsque l'arc s'allume et s'éteint pour la 1<sup>ère</sup> fois. Dans le cas d'allumage et d'extinction de 2<sup>ième</sup> arc, les grandes valeurs des tensions de trois phases correspondent au cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ) et les plus petites correspondent au cas où  $\varphi_{CC} = 90^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 270^\circ$ ) parce que, lorsque  $U_A = 0$ ,  $I_{CA} = I_{C_{MAX}}$ .

Les courbes des trois tensions de phases  $U_A$ ,  $U_B$  et  $U_C$  lors de la commutation de 4 commutateurs sont représentées sur la figure (4).

A l'instant  $t = 387.138\text{ms}$  où le c.c est arrivé, la tension  $U_A$  passe à sa valeur 0,  $U_B$  et  $U_C$  augmentent. Au moment  $t = 436.497\text{ms}$  l'arc s'éteint et la tension  $U_A$  s'établie, en prenant une valeur de 93.914KV et les tensions  $U_B$  et  $U_C$  diminuent un peu. Puis au moment  $t = 505.000\text{ms}$  l'arc s'allume deuxième fois et  $U_A$  diminue jusqu'à 0 et concernant les tensions  $U_B$  et  $U_C$ , pour la première fois on trouve une petite diminution et pour la deuxième fois une petite augmentation. après avoir éteindre une deuxième fois l'arc, cette tension  $U_A$  s'établie en atteignant la valeur 70.500kV et les tensions  $U_B$ ,  $U_C$  diminuent encore.

#### **IV-4-6) L'influence de l'extinction de l'arc lors de passage du courant transitoire ou de courant forcé de sa valeur 0.**

La coupure de l'arc c'est possible lors du passage de courant transitoire ou du courant forcé de sa valeur 0. Les résultats de plusieurs essais faits sur les différents schémas des réseaux montrent que l'arc peut être s'éteint lors du passage du courant transitoire et du courant forcé de sa valeur zéro. Même on a enregistré la coupure de l'arc lors de deuxième passage du courant transitoire et du courant forcé de sa valeur zéro. Evidemment que dans ces cas les surtensions sont plus petites. C'est-à-dire par l'augmentation du temps d'existence de l'arc diminuent les surtensions.

Nous avons considéré les cas où l'arc ne s'éteint que lors de premier passage de sa valeur zéro soit le courant transitoire, soit le courant forcé.

De la fig (IV-6) on voit que lorsque le 1<sup>er</sup> arc s'éteint lors du passage du courant transitoire de sa valeur 0, la valeur de la tension de la phase endommagée (phase A) augmente jusqu'à 142.253kV et lors du passage du courant forcé de sa valeur 0, la même tension augmente jusqu'à 125.040kV. Ces valeurs de tension de deuxième extinction de l'arc à l'instant où le courant transitoire et le courant forcé passent de sa valeur 0 sont respectivement 180.727kV et 138.609kV. On remarque la différence est d'ordre de 40kV, ce qu'est assez considérable). Alors c'est vrai que la surtension soit à l'extinction de 1<sup>er</sup> arc, soit à l'extinction de 2<sup>ème</sup> arc est plus grande lors du passage du courant transitoire de sa valeur 0 et elle est aussi plus grande à l'extinction du 2<sup>ème</sup> arc. (Comme le montre la figure (IV-6)).

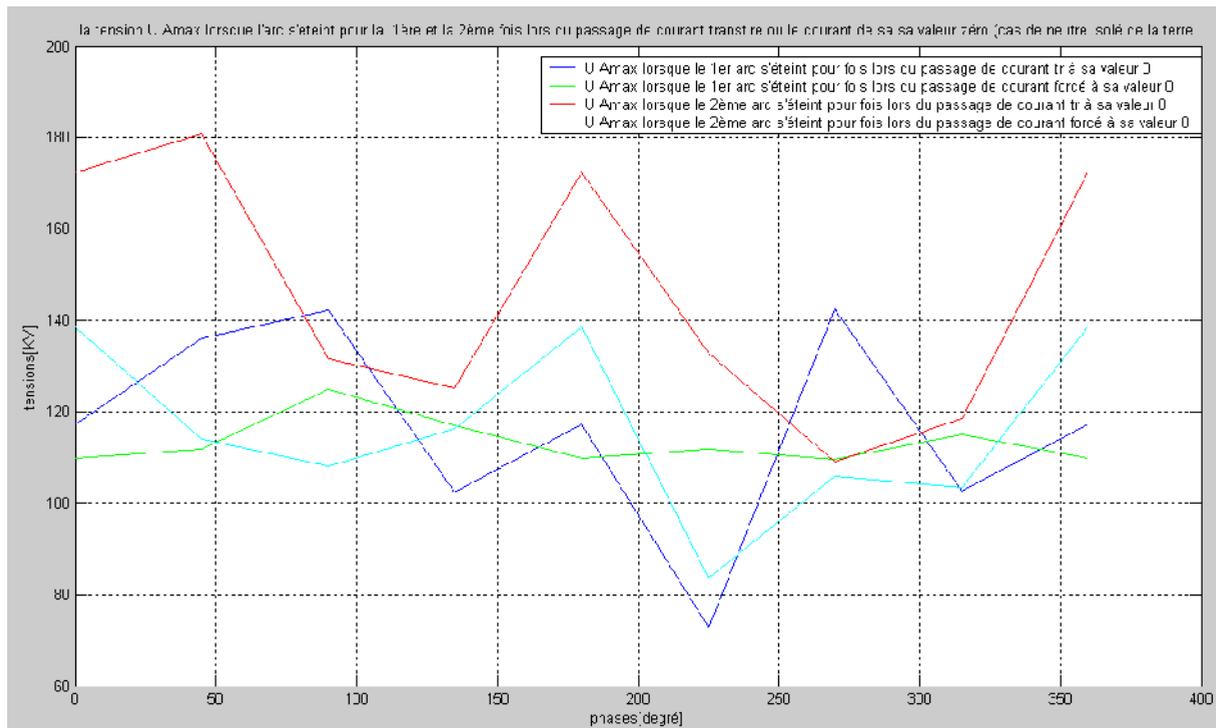


Figure (IV-6) : la tension  $U_{A \text{ MAX}}$  lorsque l'arc s'éteint pour la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> fois lors du passage du courant transitoire ou du courant forcé de sa valeur zéro (le cas de neutre isolé de la terre).

Evidemment que les plus grandes valeurs des surtensions correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 90^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 270^\circ$ ) pour le 1<sup>er</sup> arc et les plus petites correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ). Pour l'extinction, les plus grandes valeurs des surtensions correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 45^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ) lors du passage du courant transitoire de sa valeur 0 et les plus petites correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 135^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ).

Lors du passage du courant forcé de sa valeur 0, les plus grandes valeurs des surtensions correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ) et les plus petites correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 90^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 235^\circ$  et  $\varphi_{CC} = 335^\circ$ ). (Comme le montre la figure (IV-6)).

De la fig (IV-7) on voit que lorsque le 1<sup>er</sup> arc s'éteint au moment du passage de courant transitoire de sa valeur 0, la valeur de tension de la phase saine (phase B) augmente jusqu'à 143.388kV et lors du passage du courant forcé de sa valeur 0, la même tension augmente jusqu'à 128.489kV. Ces valeurs de tension l'extinction de l'arc à lors du passage de sa valeur 0 du courant transitoire et du courant forcé sont respectivement 183.373kV et 143.005kV. Alors c'est vrai que la surtension soit à l'extinction de 1<sup>er</sup> arc, soit à l'extinction de 2<sup>ème</sup> arc est plus grande lors du passage du courant transitoire de sa valeur 0 et elle est aussi plus grande à l'extinction du 2<sup>ème</sup> arc. (Comme le montre la figure (IV-7)).

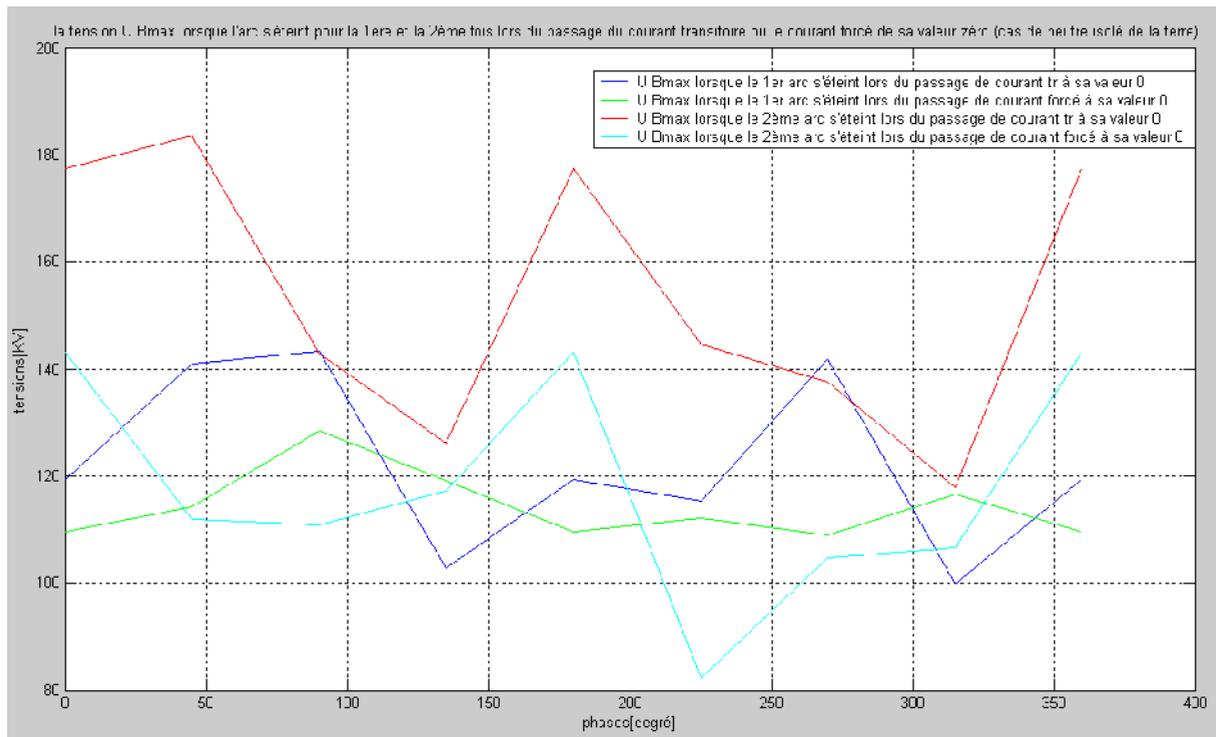


Figure (IV-7) : la tension  $U_{B \text{ MAX}}$  lorsque l'arc s'éteint pour la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> fois lors du passage du courant transitoire ou du courant forcé de sa valeur zéro (le cas de neutre isolé de la terre).

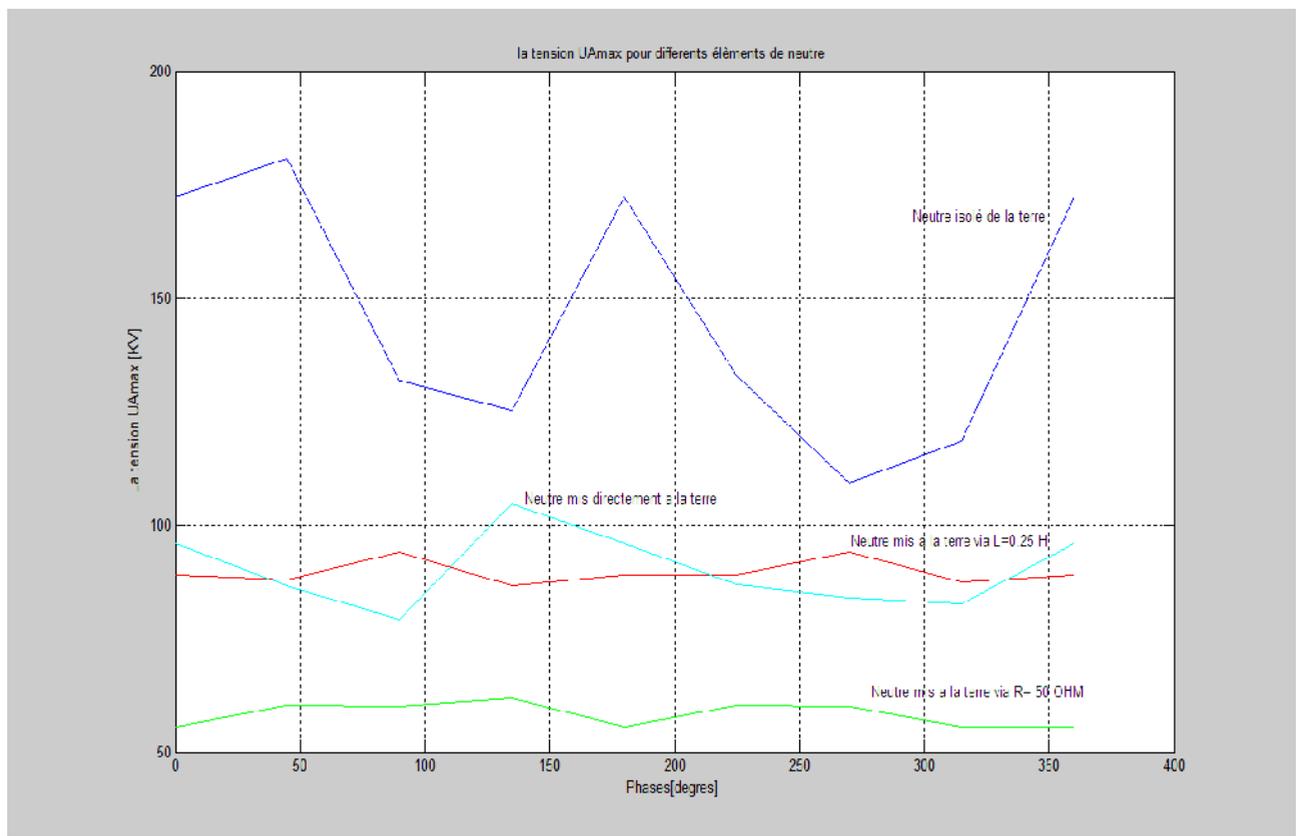
Evidemment que les plus grandes valeurs des surtensions lors du passage du courant transitoire de sa valeur 0 correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 90^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 270^\circ$ ) pour le 1<sup>er</sup> arc et les plus petites correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ). Pour l'extinction, les plus grandes valeurs des surtensions correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 45^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ) et les plus petites valeurs correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 135^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 270^\circ$ ). Lors du passage du courant forcé de sa valeur 0, les plus grandes valeurs des surtensions correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 0^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 180^\circ$ ) et les plus petites correspondent aux cas où  $\varphi_{CC} = 45^\circ$  ( $\varphi_{CC} = 235^\circ$ ). (comme le montre la figure (IV-7)).

**IV-4-7) L'influence de l'élément de neutre (isolé, mis directement à la terre, mis à la terre via R=50 et L=0.25H) :**

Différentes Régimes de neutre	La tension $U_{A \text{ MAX}}$	La tension $U_{B \text{ MAX}}$
Neutre isolé complètement de la terre	180.727kV	184.505kV
Neutre mis à terre via L=0.25 H	112.46kV	112.465kV
Neutre mis à terre via R=50	89.2017kV	86.877kV
Neutre mis directement à la terre	77.705kV	69.992kV

**Tableau (IV-3) :** les différentes valeurs des surtensions sur la phase endommagée A et la phase saine B selon la nature de neutre.

Du tableau on voit aussi que les surtensions sur la phase A et B sont plus importantes lorsque le neutre est isolé de la terre, puis le cas de neutre mis à la terre via une inductance, suivi par le cas de neutre mis à la terre a travers une résistance R=50 et en fin le cas de neutre mis directement à la terre.



**Figure (IV-8) :** la tension  $U_{A \text{ MAX}}$  lorsque l'arc s'allume et s'éteint pour la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> fois pour différents régimes de neutre.

La figure (IV-8) montre que lors de l’allumage et l’extinction de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> arc que les surtensions de la phase endommagée (phase A) de différents régimes de neutre augmentent jusqu’aux valeurs indiquées dans le tableau (IV-2), la plus grande valeur corresponde au cas de neutre isolé de la terre. Cette valeur est égale à 180.727kV, puis on la compare à la tension au régime normal qu’égale à 55.455KV ( $\frac{180.727}{55.455} = 3.25$ ). L’augmentation est 3.25 fois est assez considérable.

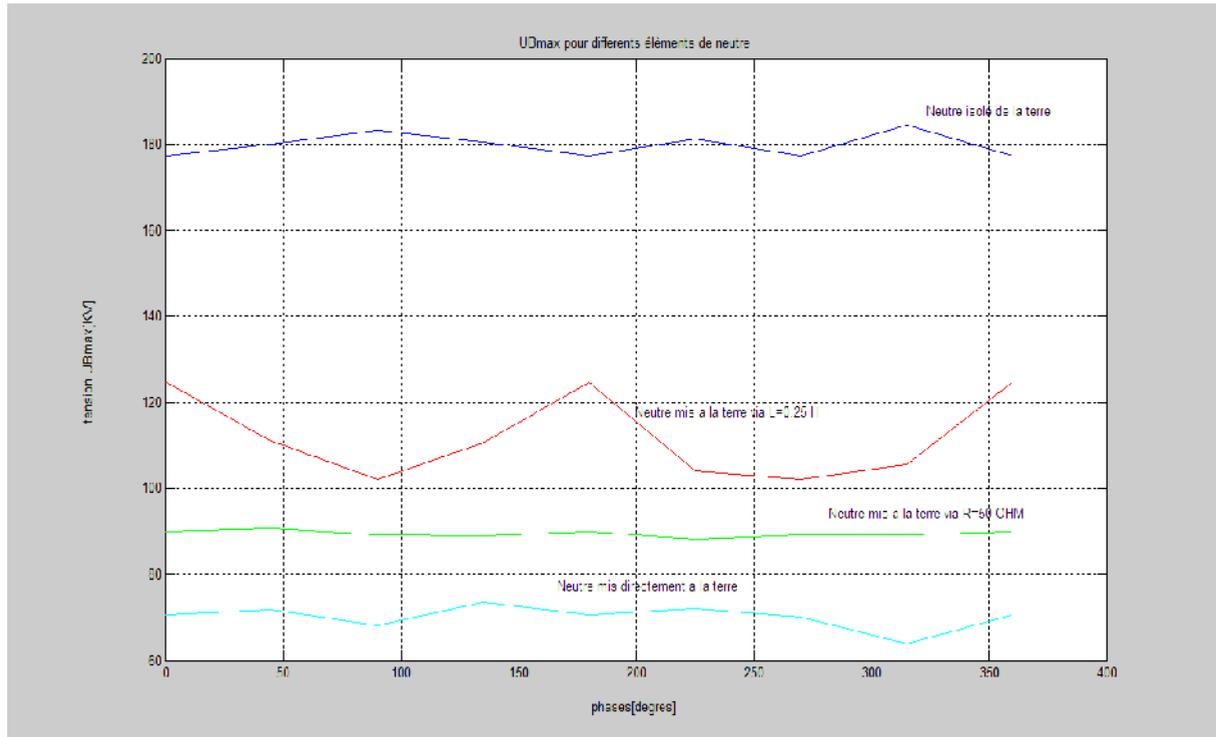


Figure (IV-9): la tension  $U_{B MAX}$  lorsque l’arc s’allume et s’éteint pour la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> fois pour différents régimes de neutre.

De tableau et la figure (IV-9) on voit que en ce qui concerne les tensions des phases saines, exemple sur la phase B et pour différents régimes de neutre, on voit que la tension augmente jusqu’aux valeurs indiquées dans le tableau (IV-2). La plus grande de ces valeurs est de 184.505kV dans le cas de neutre isolé de la terre. Cette augmentation est de 3.3 fois par rapport à la tension du régime normal ( $\frac{183.505}{55.455} = 3.3$ ) et aussi assez considérable. La plus petite valeur de tension corresponde au cas de neutre mis directement à la terre qui égale 69.99kV. Il est important de remarquer que ces grandes valeurs des surtensions correspondent au cas où le c.c arrive à l’instant où la tension de la phase endommagée passe de sa valeur maximale.

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale**

Dans notre travail, nous avons étudié les surtensions d'amorçage d'arc dus à un court circuit monophasé dans un réseau de tension nominale 110kV.

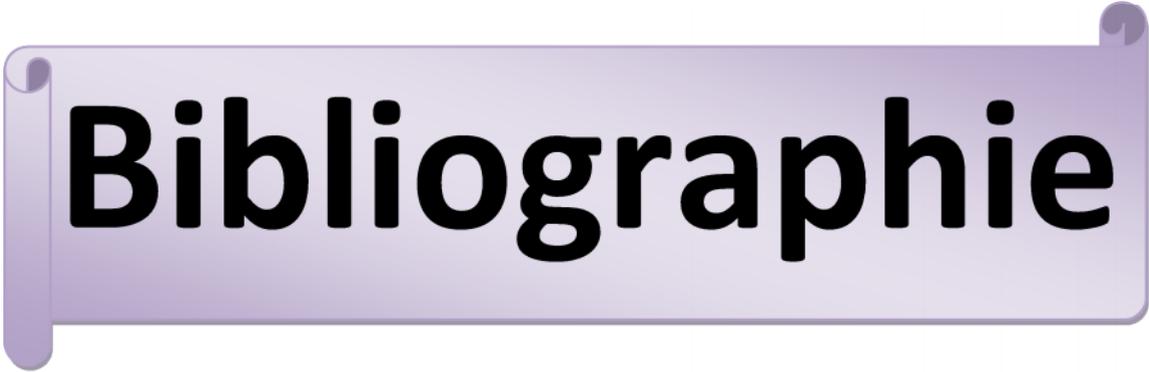
Après les différentes simulations, que nous avons faites dans le chapitre IV, nous avons déduits les résultats suivants :

- 1) Les surtensions sont plus élevées lorsque le neutre est isolé de la terre, faisant la comparaison avec les autres différents régimes de neutre considéré.
- 2) Lors de l'allumage et l'extinction de l'arc de défaut où  $\varphi_{cc} = 90^\circ$ , les surtensions son plus grande, selon les caractéristiques  $U_{Max}=f(\varphi_{cc})$ .  
Lorsque  $Z_N = X_L$ , les valeurs des surtensions sont plus importante pour  $\varphi_{cc} = 0^\circ$ , se traduit par la valeur maximale des courants de capacités.
- 3) Le facteur des surtensions pour les différents régimes de neutre ne dépasse pas la valeur 3.4, correspondante au cas de neutre isolé de la terre.

### **Perspectives :**

Notre espoir c'est que ce modeste travail servira les prochains travaux complémentaires dans ce sujet (les surtensions d'amorçage d'arc) soit ce qui concerne

- La modélisation de l'arc électrique ;
- l'influence des charges sur les surtensions et les surintensités ;
- considération de l'augmentation des tensions dans les phases saines peuvent créer des c.c. sur ces phases. Création successive des c.c. sur les deux différentes phases conduit à engendrer des surtensions plus dangereuses



# **Bibliographie**

## **Bibliographie :**

---

- [1] THEODOR .WILDI, électrotechnique 4<sup>ème</sup> édition ISBN : DBU2-8041-4892-0, P :
- [2] VALENTIN .CRASTAN « Les réseaux d'énergie électrique ». Tome 1
- [3] MUFIDZADA .N.A « les cours de réseaux électrique» 4<sup>ème</sup> Années ETH. UMMTO
- [4] HANDALLAH .M.A « les cours de technique de la haute tension et théorie de champs électromagnétique» 4<sup>ème</sup> années ETH.UMMTO.
- [5]FULCHIRON. « Les surtensions et coordination de l'isolement », CT151, Schneider Electric, edition 1992.
- [6]FRANCOIS GERARD. « Généralités sur la foudre et les surtensions » .ADEE ELECTRIC .Octobre 2008.
- [7]ROLAND CHOQUET « La sécurité électrique et technique de prévention ».BORDAS, PARIS ,1988 ;
- [8]FREDERICH MACIELA « Parafoudres » Technique de l'ingénieur, génie électrique, doc D4522.
- [9]HENRY NEY « équipement de puissance » Paris 1988.
- [11] Mustafa Kizilcay , Piergiovanni La Seta « DIGITAL SIMULATION OF FAULT ARCS IN MEDIUM-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS» University of Siegen and Dresden University of Technology, Germany 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005 Session 36, Paper 3.

## **Bibliographie :**

---

- [10] RAHMANI.S, OUMZAOUECHE .B, « INFLUENCE DU CABLE SUR LES SURTENSIONS DANS UN SYSTEME LIGNE –CABLE-TRASFORMATEUR » .Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, université mouloud Mammeri de tizi ouzou .
- [11] : Michel GRACIET & Joseph PINEL « Protection contre les perturbations ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique Doc. D 5 170
- [12] SCHNEIDER ELECTRIQUE. « LES REGIMES DE NEUTRE »
- [13]G.BOUVAIN, A.DUCLUZAUZ « arc de défauts sur les jeux de barres et les tableaux » cahier technique CHNIDER électrique.
- [14] Mustafa Kizilcay et Piergiovanni La Seta « DIGITAL SIMULATION OF FAULT ARCS IN MEDIUM-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS» University of Siegen and Dresden University of Technology, Germany 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005 Session 36, Paper 3.
- [15] K. H. Koch, "Field Tests in Resonant-Earthed Medium-Voltage Networks to Determine the Arcing Duration of Line-To-Earth Faults at Different Harmonic Content in the Residual Current", Technical Report 1-249, Electric Power Research Institute (FGH), Mannheim Rheinau, Germany, 1981 (in German).
- [16] M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems", ETEP Journal, vol., 1, no. 1, pp. 55-60, 1991.
- [17] M. Kizilcay, K.-H. Koch, "Numerical fault arc simulation based on power arc tests", ETEP Journal, vol. 4, no. 3, pp. 177-186, May/June 1994.
- [18] Cahier technique « distribution de l'énergie électrique », SCHNEIDER électrique.
- [19] DEDIER.FULCHIRON, « choix de base des réseaux électriques moyenne tension de distribution publique»,D.P ARTICLE SCHNEIDER ELECTRIQUE.

## **Bibliographie :**

---

[20] TOMASSET.G, « la conception des réseaux électriques industrielles a haute tension » article 160 PDF, MERLIN .GERIN.

[21] NEKLEPAYEV

[22]MAYKOPAR .A.C ? « Décharge en arc dans les lignes de transport », Moscou « Energiga »,1965.

[23]DYMOKHOVSKAYA .L.F « Les surtensions internes dans les lignes de transport », Moscou, «energiga» ,1972 .

[24]LEVITOV.V.I « Couronne du courant alternatif », Moscou, « energiga »1975

[25]EMELIANOV.N.P, KOZLOV.V.S, « Décharge de couronne sur les lignes » ? Minsk,Naukai tehnika,1971

[26]BOUVIER. G, DUCLUZAUX.A « arcs de défauts sur les jeux de barres des tableaux », CT N°038 Schneider électrique.



# **Annexes**

## Annexes :

**Tableau (1): Les tensions des trois phases pour le cas de neutre mis directement à la terre :**

tarcon/tarcoff	U [KV] \ $\phi$ [DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1=INF	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1=INF	U <sub>BMAX</sub>	-66.349	-67.845	-69.992	-67.997	-66.349	66.047	69.056	-66.468	-66.349
tc1/top1=INF	U <sub>CMAX</sub>	-57.709	-63.508	61.348	63.990	-57.709	60.361	-57.138	-61.777	-57.709
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-78.304	-78.997	-69.02	-65.032	-78.304	75.171	77.328	57.056	-78.304
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	59.284	59.147	56.626	-55.915	59.284	-58.180	-62.063	-56.410	59.284
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>CMAX</sub>	-58.130	-57.810	-55.580	55.458	-58.130	57.357	55.879	53.538	-58.130
tc1/top1 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	76.552	77.840	77.703	77.310	76.552	-78.513	-76.802	-78.653	76.552
tc1/top1 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	-56.614	-62.093	-62.482	-60.556	-56.614	59.262	58.788	58.854	-56.614
tc1/top1 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	57.341	57.949	58.026	58.645	57.341	-56.953	-56.963	-61.777	57.341
tc2/top2(inf)	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2 (inf)	U <sub>BMAX</sub>	67.867	67.638	67.932	69.458	67.867	-69.986	-70.556	-72.375	67.867
tc2/top2 (inf)	U <sub>CMAX</sub>	-61.773	-62.482	-62.208	-61.605	-61.773	62.598	62.964	63.016	-61.773
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	69.830	67.153	76.101	82.522	69.830	-70.264	76.101	-79.150	69.830
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	-61.703	-60.346	-64.039	-64.006	-61.703	60.877	-64.039	63.863	-61.703
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	-54.590	55.475	54.423	-61.811	-54.590	54.697	54.423	-55.254	-54.590
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-77.301	-75.693	-76.722	-79.107	-77.301	78.923	78.943	78.923	-77.301
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	59.367	59.367	61.314	61.195	59.367	-61.514	-60.239	-61.514	59.367
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	-57.810	-56.489	-57.810	-58.457	-57.81	58.148	58.124	58.148	-57.810

**Tableau (2): les tensions des trois phases pour le cas de neutre mis à la terre a travers une résistance (R=10 $\Omega$ ) :**

tarcon/tarcoff	U [KV] \ $\phi$ [DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1=INF	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1=INF	U <sub>BMAX</sub>	-55.041	56.879	-61.692	-67.795	-55.041	56.153	63.042	61.840	-55.041
tc1/top1=INF	U <sub>CMAX</sub>	60.255	-63.747	66.700	66.221	60.255	-61.828	-63.187	-60.969	60.255
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-82.905	-78.844	-88.951	86.505	-82.905	83.492	-81.921	-81.206	-82.905
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	62.268	61.690	67.222	-66.402	62.268	-63.865	63.153	59.892	62.268
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>CMAX</sub>	-65.106	-63.515	-67.299	66.988	-65.106	64.901	-65.232	-62.828	-65.106
tc1/top1 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-82.094	-81.382	-80.154	82.791	-82.094	82.682	-81.953	-82.596	-82.094
tc1/top1 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	62675	64.524	61.920	-65.412	62675	-66.453	65.060	60.665	62675
tc1/top1 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	-64.843	-65.739	-64.609	65.806	-64.843	65.413	-65.553	-63.155	-64.843
tc2/top2(inf)	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2 (inf)	U <sub>BMAX</sub>	69.556	-69.869	-69.086	68.621	69.556	67.766	-69.871	-68.952	69.556
tc2/top2 (inf)	U <sub>CMAX</sub>	-63.984	62.677	64.537	-61.518	-63.984	-61.935	63.282	65.958	-63.984
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-95.853	-86.628	-79.233	104.588	-95.853	86.872	-83.960	82.622	-95.853
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	70.621	71.818	68.112	-73.585	70.621	-71.965	70.056	-63.955	70.621
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	-63.532	-65.642	-62.701	66.055	-63.532	-65.342	-63.765	64.625	-63.532
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-82.156	-82.909	-83.071	81.685	-82.156	-83.025	-83.006	130.115	-82.156
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	63.476	61.030	63.103	-64.476	63.476	63.954	62.399	-65.616	63.476
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	64.800	-63.405	-63734	64.991	64.800	-63.913	-63.587	63.881	64.800

## Annexes :

**Tableau (3) : les tensions des trois phases pour le cas le neutre mis a la terre a travers une résistance (R=20Ω) :**

tarc on/tarc off	U [KV]\∅ [DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1=INF	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1=INF	U <sub>BMAX</sub>	-74.299	-74.373	-74.438	-74.373	-74.299	73.100	74.358	-74.102	-74.299
tc1/top1=INF	U <sub>CMAX</sub>	-60.240	-64.028	57.634	-64.028	-60.240	60.839	-59.911	-63.330	-60.240
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-73.192	75.249	-72.713	64.639	-73.192	75.249	74.812	64.639	-73.192
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	56.789	-59.609	-56.582	-56.603	56.789	-59.609	-59.424	-56.603	56.789
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>CMAX</sub>	56.091	-56.496	56.878	-60.151	56.091	-56.496	-58.769	-60.151	56.091
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	71.858	71.182	71.379	71.182	71.858	-70.838	-73.648	-72.580	71.858
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	-58.533	-58.135	-59.254	-58.135	-58.533	58.082	58.041	57.642	-58.533
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	-56.276	-55.675	-55.606	-55.675	-56.276	56.180	56.271	56.021	-56.276
tc2/top2(inf)	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2 (inf)	U <sub>BMAX</sub>	76.201	-73.640	73.301	-73.640	76.201	-70.838	-75.145	-76.380	76.201
tc2/top2 (inf)	U <sub>CMAX</sub>	-60.492	-59.578	-59.819	-59.578	-60.492	61.405	60.636	61.899	-60.492
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	62.920	69.419	75.587	69.419	62.920	-76.836	-75.542	-72.215	62.920
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	-57.359	-58.570	-60.795	-58.570	-57.359	59.161	59.589	-56.553	-57.359
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	54.464	54.660	54.524	54.660	54.464	62.612	60.636	63.447	54.464
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-71.539	-72.477	-73.121	-72.477	-71.539	73.305	-72.536	73.135	-71.539
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	58.285	57.763	57.153	57.763	58.285	-57.959	58.038	-59.076	58.285
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	55.841	56.665	56.616	56.665	55.841	55.195	56.171	-56.046	55.841

**Tableau (4): les tensions des trois phases pour le cas le neutre mis a la terre a travers une résistance (R=50Ω) :**

tarc on/tarc off	U [KV]\∅ [DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1=INF	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1=INF	U <sub>BMAX</sub>	-86.877	-88.115	-86.732	-86.066	-86.877	-86.200	-86.732	-86.877	-86.877
tc1/top1=INF	U <sub>CMAX</sub>	-67.561	-66.845	66.239	67.296	-67.561	65.096	66.239	-67.780	-67.561
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-58.698	60.332	-59.979	58.960	-58.698	57.669	-58.698	-59.609	-58.698
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	-55.014	55.083	-56.098	-55.752	-55.014	-56.592	-56.098	55.416	-55.014
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>CMAX</sub>	56.662	57.264	58.157	-56.200	56.662	55.718	58.157	57.056	56.662
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-59.581	-58.735	-59.690	59.689	-59.581	60.582	-59.690	-59.299	-59.581
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	55.021	-55.240	55.227	-56.917	55.021	-56.640	55.227	55.226	55.021
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	56.529	56.390	56.512	-59.825	56.529	-56.164	56.512	57.065	56.529
tc2/top2(inf)	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2 (inf)	U <sub>BMAX</sub>	-89.833	-90.634	-89.201	88.839	-89.833	88.231	-89.201	-89.194	-89.833
tc2/top2 (inf)	U <sub>CMAX</sub>	65.361	-67.287	68.015	-67.443	65.361	-67.814	68.015	65.582	65.361
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	55.382	-60.264	-59.979	61.905	55.382	60.291	-59.979	55.485	55.382
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	-55.014	-55.083	-56.098	-54.046	-55.014	-55.329	-56.098	55.099	-55.014
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	57.121	57.064	58.157	-57.662	57.121	-57.221	58.157	57.148	57.121
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-58.970	-59.089	-59.690	59.359	-58.970	-59.348	-59.690	-58.774	-58.970
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	-55.556	55.503	55.227	-56.153	-55.556	-55.977	55.227	-55.251	-55.556
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	56.381	56.250	56.512	-57.736	56.381	-56.820	56.512	56.413	56.381

## Annexes :

**Tableau (5): les tensions des trois phases pour le cas le neutre mis a la terre a travers une résistance (R=100Ω) :**

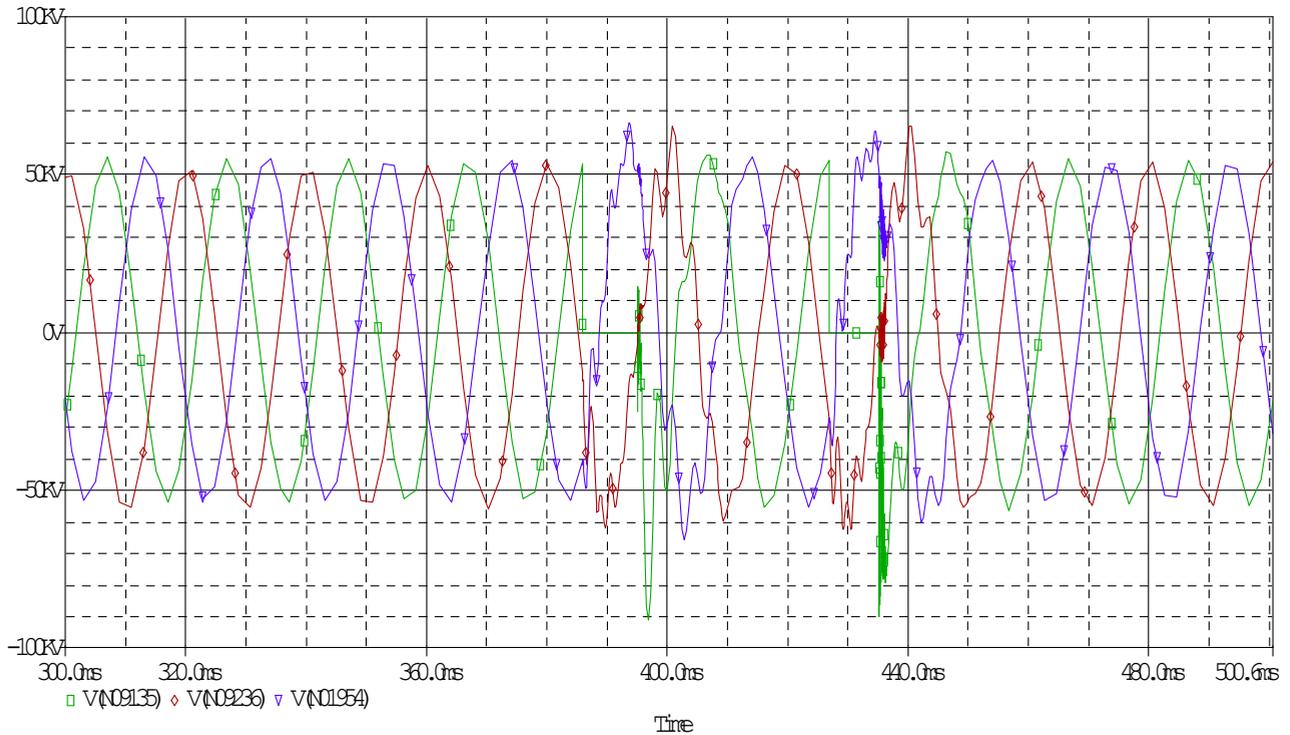
tarc on/tarc off	U[KV]\Ø[DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1=INF	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1=INF	U <sub>BMAX</sub>	-94.301	-94.972	-98.101	-93.804	-94.301	-94.121	-98.101	-94.301	-94.301
tc1/top1=INF	U <sub>CMAX</sub>	-76.196	-78.717	76.705	76.800	-76.196	-76.349	76.705	-76.196	-76.196
tc1/top1(Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-55.844	55.320	-56.236	-56.808	-55.844	57.635	-56.236	-55.844	-55.844
tc1/top1(Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	-53.930	-55.014	-55.556	-55.556	-53.930	55.081	-55.556	-53.930	-53.930
tc1/top1(Itr=0)	U <sub>CMAX</sub>	57.892	57.489	57.902	58.103	57.892	-57.616	57.902	57.892	57.892
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-55.260	-55.867	-56.193	-55.135	-55.260	56.403	-56.193	-55.260	-55.260
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	-55.014	55.556	54.596	54.939	-55.014	-54.691	54.596	-55.014	-55.014
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	57.672	57.550	57.727	57.584	57.672	-56.821	57.727	57.672	57.672
tc2/top2(inf)	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2 (inf)	U <sub>BMAX</sub>	-99.705	-102.41	-102.66	-103.34	-99.705	100.631	-102.66	-99.705	-99.705
tc2/top2 (inf)	U <sub>CMAX</sub>	77.041	76.802	76.314	77.942	77.041	-77.170	76.314	77.041	77.041
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-57.080	-55.627	-55.246	-56.149	-57.080	56.573	-55.246	-57.080	-57.080
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	55.093	55.107	54.686	-55.556	55.093	55.014	54.686	55.093	55.093
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	58.300	55.958	57.394	57.796	58.300	-57.712	57.394	58.300	58.300
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	55.667	-55.099	-55.756	-55.235	55.667	55.069	-55.756	55.667	55.667
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	54.899	54.553	-54.623	54.223	54.899	54.664	-54.623	54.899	54.899
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	57.496	57.484	57.511	57.513	57.496	57.617	57.511	57.496	57.496

**Tableau (6): les tensions des trois phases pour le cas le neutre mis a la terre a travers une résistance (L=0.25H) :**

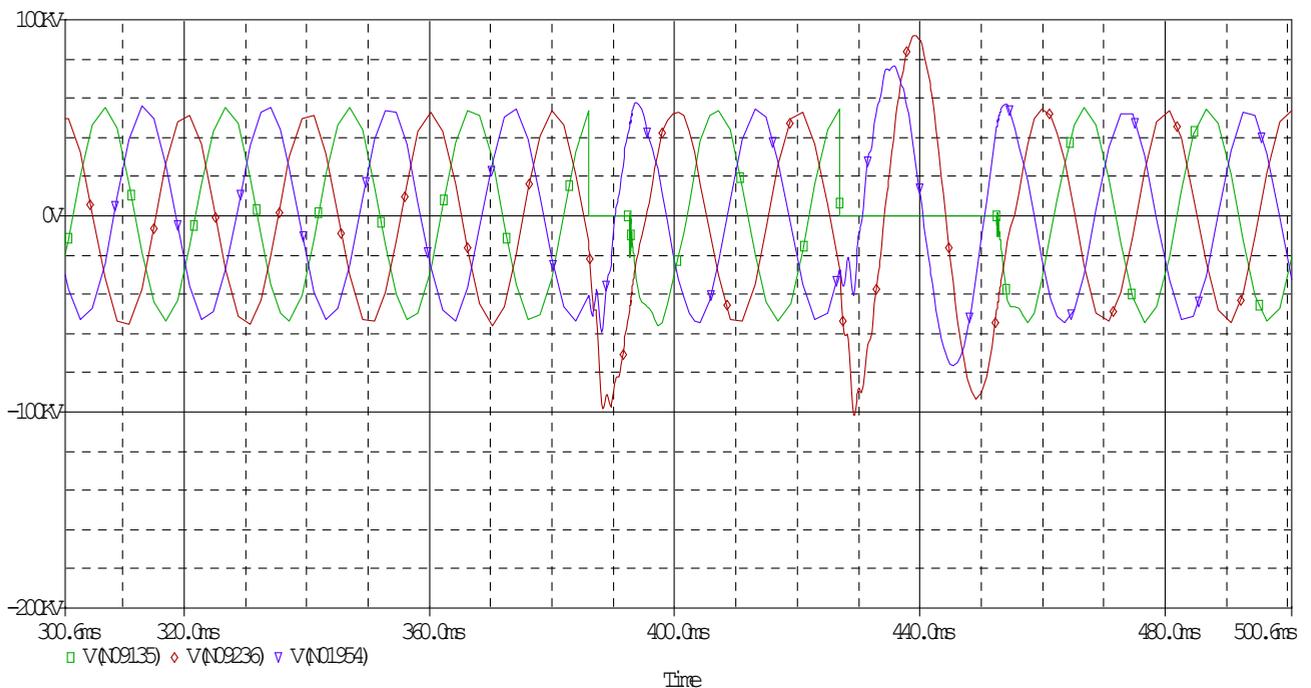
tarc on/tarc off	U[KV]\Ø[DEG]	0	45	90	135	180	225	270	315	360
tc1/top1=INF	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc1/top1=INF	U <sub>BMAX</sub>	-79.078	-85.957	-112.46	84.065	-79.078	-86.136	-112.46	-86.900	-79.078
tc1/top1=INF	U <sub>CMAX</sub>	87.313	95.251	93.914	98.145	87.313	-92.749	93.914	-96.960	87.313
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	89.036	87.940	-93.910	-86.600	89.036	88.926	-93.910	87.357	89.036
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	-91.626	-90.954	91.964	84.121	-91.626	90.926	91.964	-86.398	-91.626
tc1/top1 (Itr=0)	U <sub>CMAX</sub>	-88.335	95.251	93.496	-92.513	-88.335	-92.749	93.496	92.838	-88.335
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-85.561	87.943	-86.100	-82.277	-85.561	-84.675	-86.100	-86.775	-85.561
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	-83.903	-86.965	-86.744	-84.651	-83.903	-84.722	-86.744	-86.329	-83.903
tc1/top1(I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	85.366	-85.981	84.728	84.805	85.366	87.060	84.728	87.424	85.366
tc2/top2(inf)	U <sub>MAX</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tc2/top2 (inf)	U <sub>BMAX</sub>	-124.75	-111.01	-102.11	-110.47	-124.75	-104.04	-102.11	-105.50	-124.75
tc2/top2 (inf)	U <sub>CMAX</sub>	103.242	98.716	100.867	104.129	103.242	101.194	100.867	102.819	103.242
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>MAX</sub>	-93.035	-76.967	70.500	-79.357	-93.035	-80.701	70.500	-79.160	-93.035
tc2/top2 (Itr=0)	U <sub>BMAX</sub>	91.588	-111.03	-68.359	76.407	91.588	-104.04	-68.359	-77.779	91.588
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	-90.561	-77.373	-72.238	79.675	-90.561	101.194	-72.238	102.8100	-90.561
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>MAX</sub>	-83.673	-84.742	87.432	87.966	-83.673	85.471	87.432	86.306	-83.673
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>BMAX</sub>	-86.077	-84.567	-87.076	-85.594	-86.077	-84.292	-87.076	-84.704	-86.077
tc2/top2 (I <sub>50</sub> =0)	U <sub>CMAX</sub>	85.436	85.090	-87.830	-87.108	85.436	-85.937	-87.830	-85.687	85.436

## Annexes :

**Figure N° (1): les tensions des trois phases en fonction du temps lorsque deux arcs consécutifs s'allume et s'éteint (cas de neutre mis directement a la terre) :**

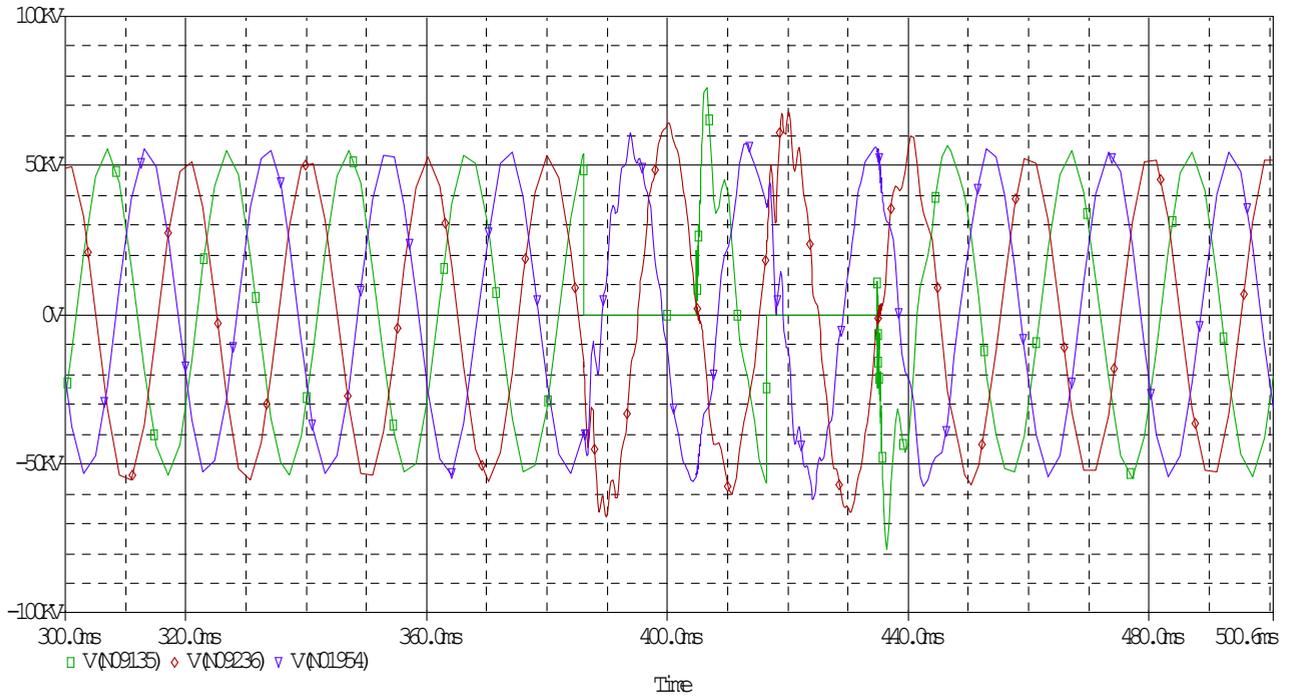


**Figure N° (2): les tensions des trois phases en fonction du temps lorsque deux arcs consécutifs s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers une résistance  $R=10\Omega$ ) :**

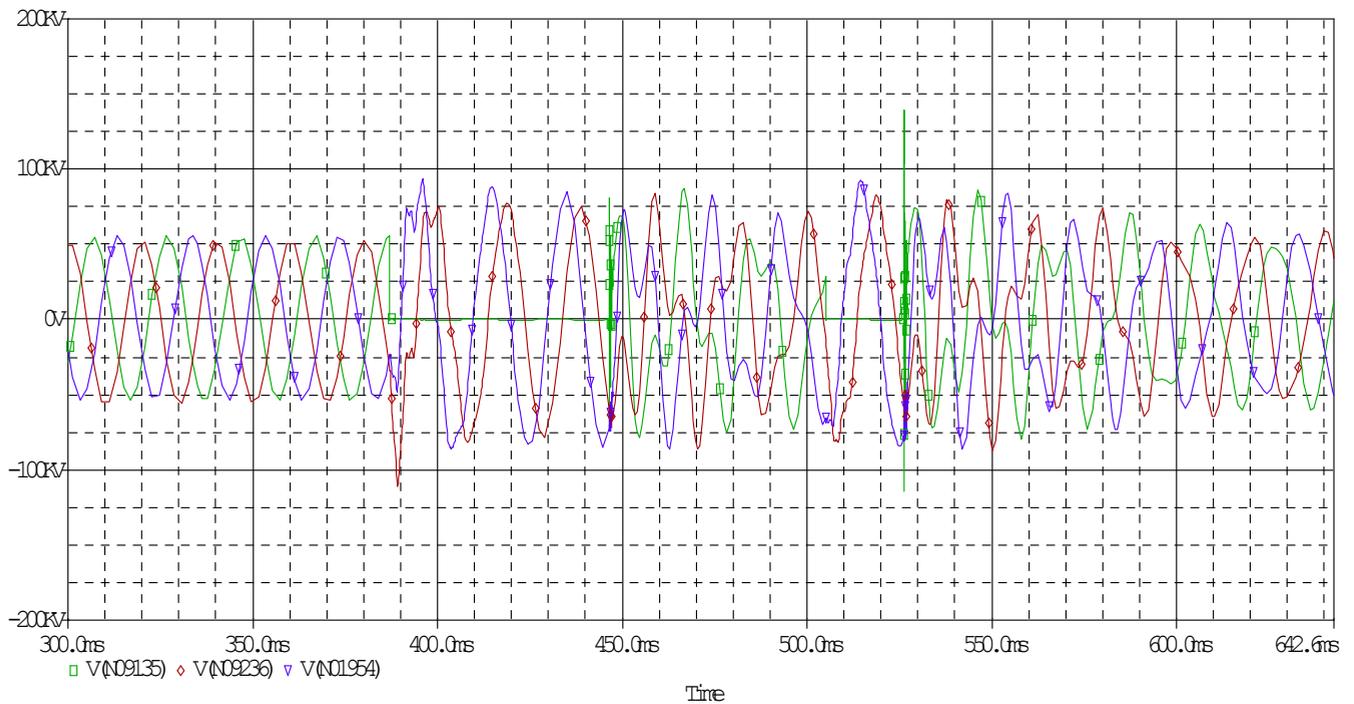


## Annexes :

**Figure N° (3) : les tensions des trois phases en fonction du temps lorsque deux arcs consécutifs s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers une résistance  $R=100\Omega$ ) :**

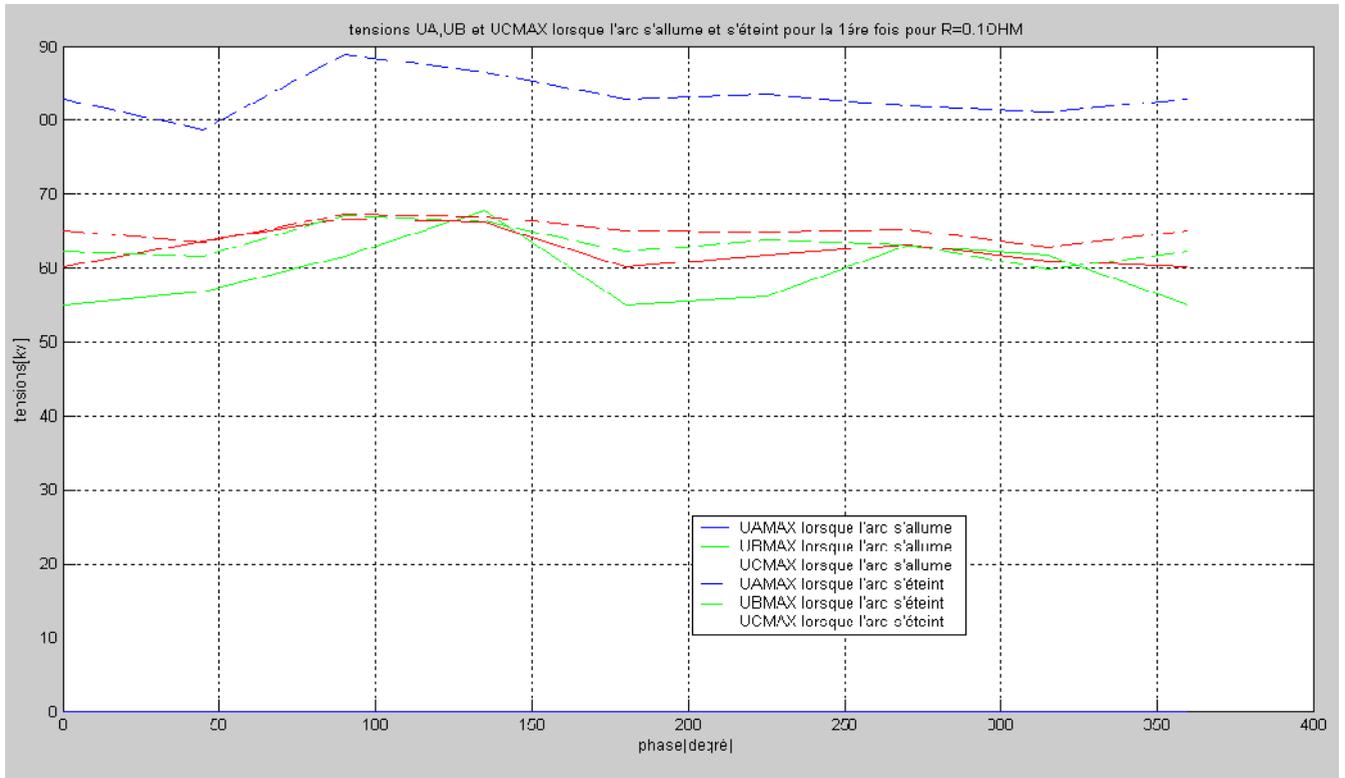


**Figure N° (4) : les tensions des trois phases en fonction du temps lorsque deux arcs consécutifs s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers une inductance  $L=0.25H$ ) :**

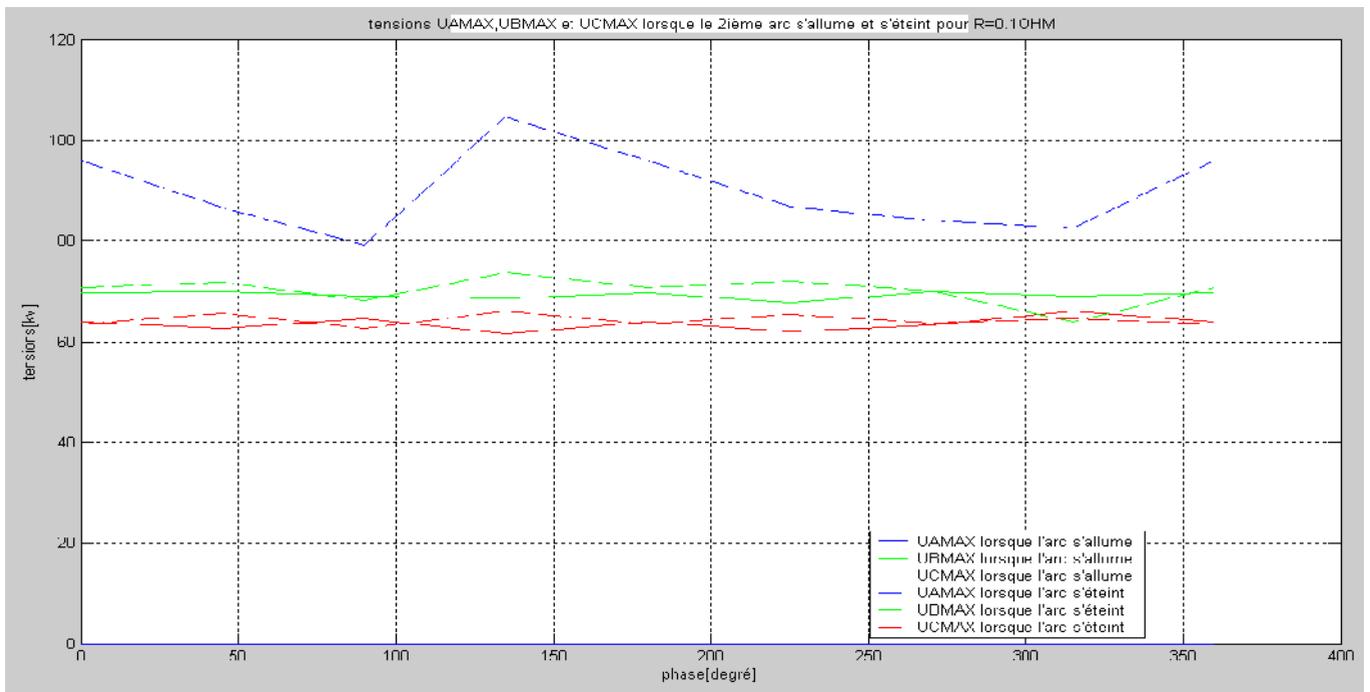


## Annexes :

**Figure N° (5) : les tensions des trois phases en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 1<sup>er</sup> arc s'allume et s'éteint (cas de neutre mis directement a la terre) :**

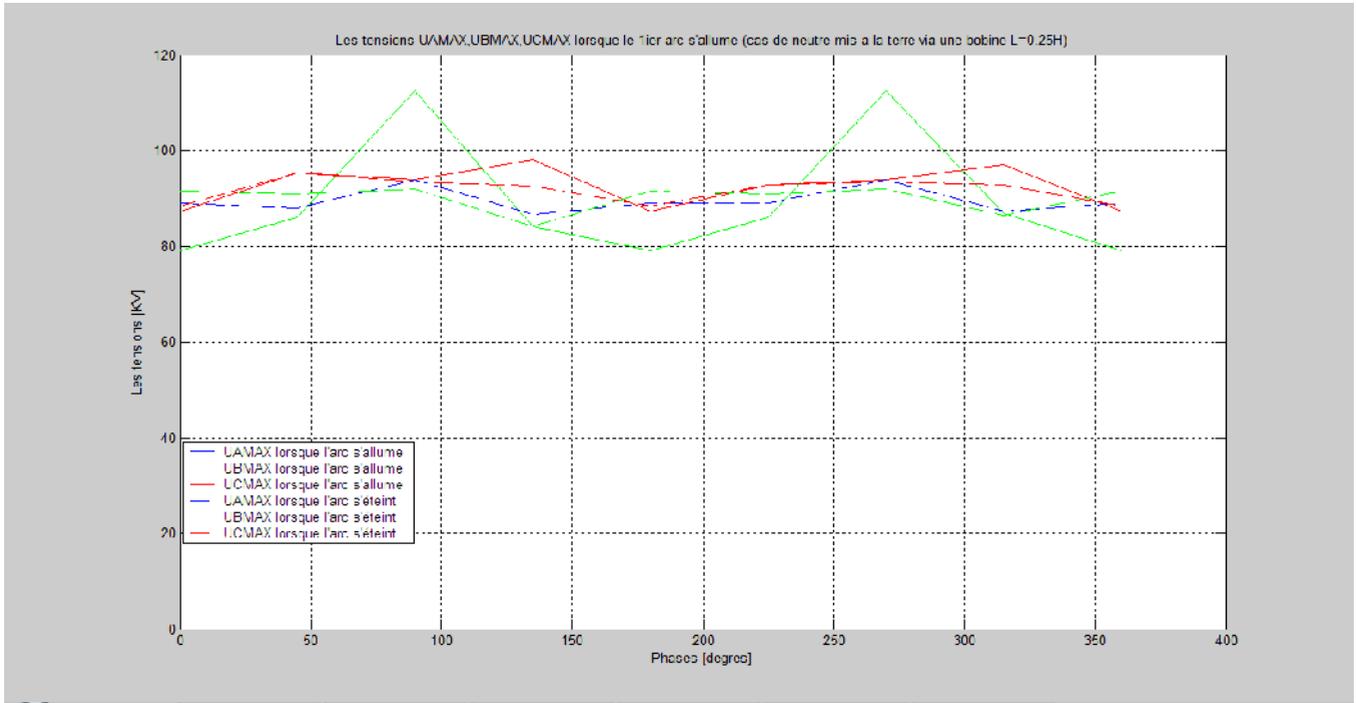


**Figure N° (6) : les tensions des trois phases en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume et s'éteint (cas de neutre mis directement a la terre) :**

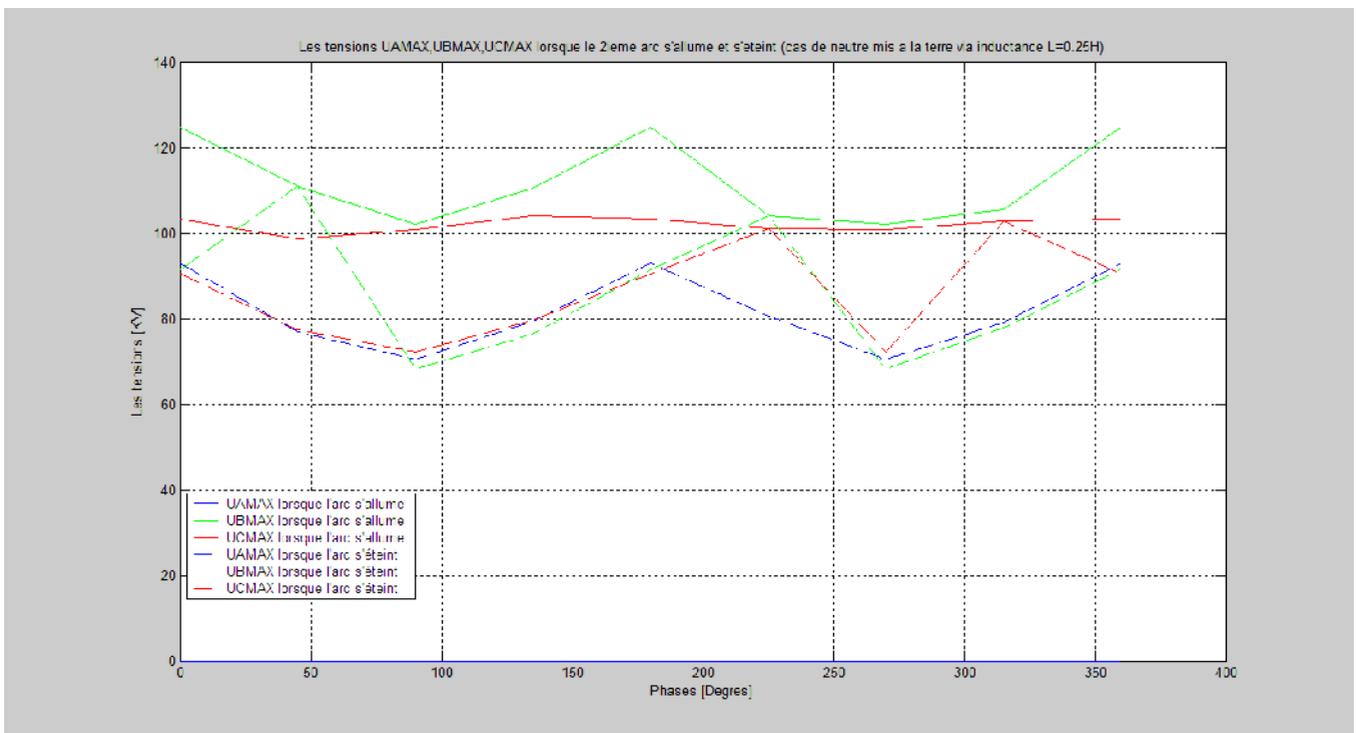


**Annexes :**

**Figure N° (7) : les tensions des trois phases en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 1<sup>er</sup> arc s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers une bobine  $L=0.25H$ ) :**

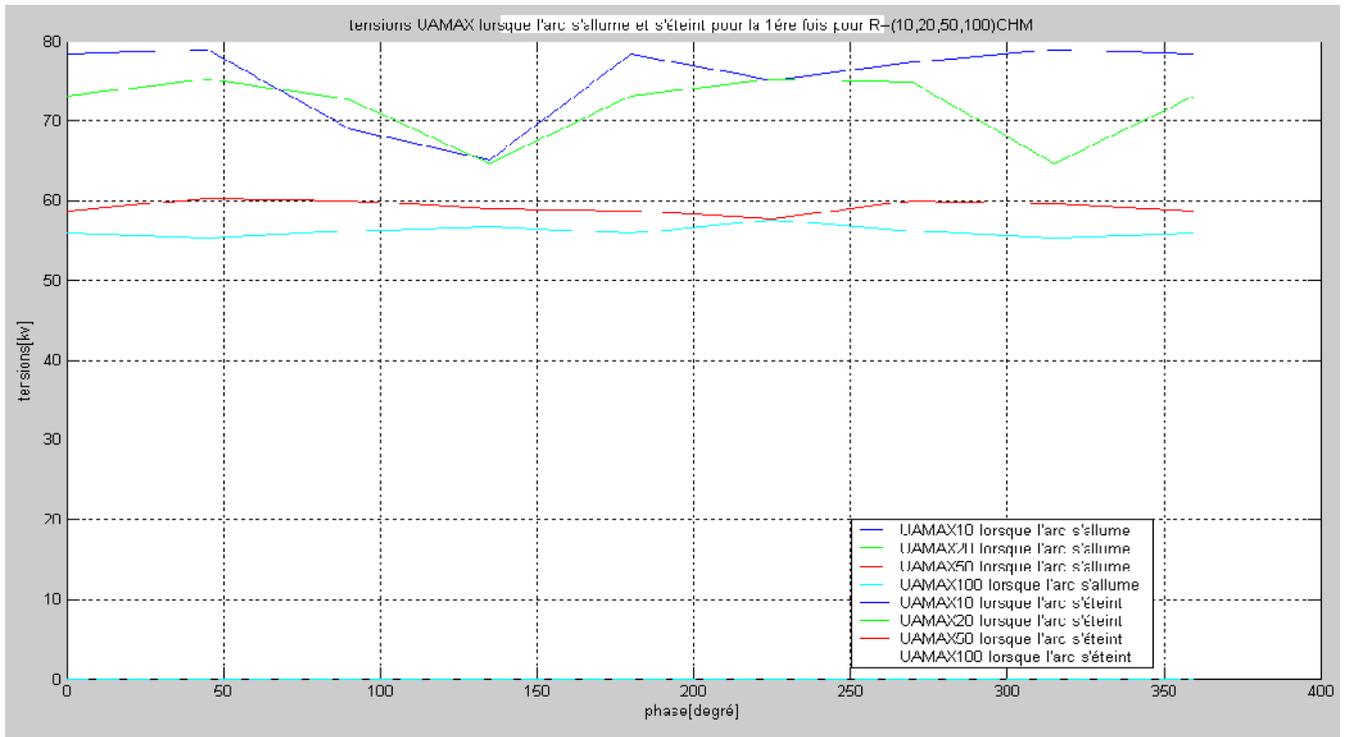


**Figure N° (8) : les tensions des trois phases en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers une bobine  $L=0.25H$ ) :**

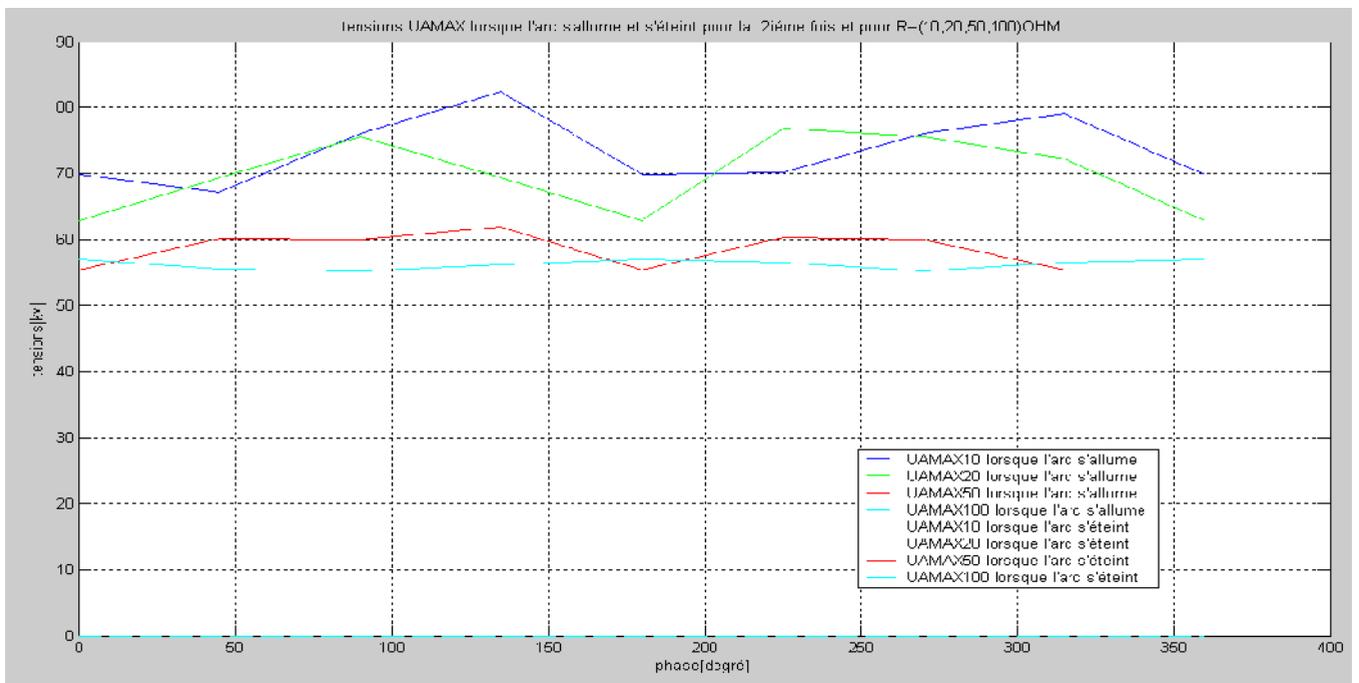


## Annexes :

**Figure N° (9) : la tension de la phase A en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 1<sup>er</sup> arc s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance ( $R=10, 20, 50, 100\Omega$ )) :**

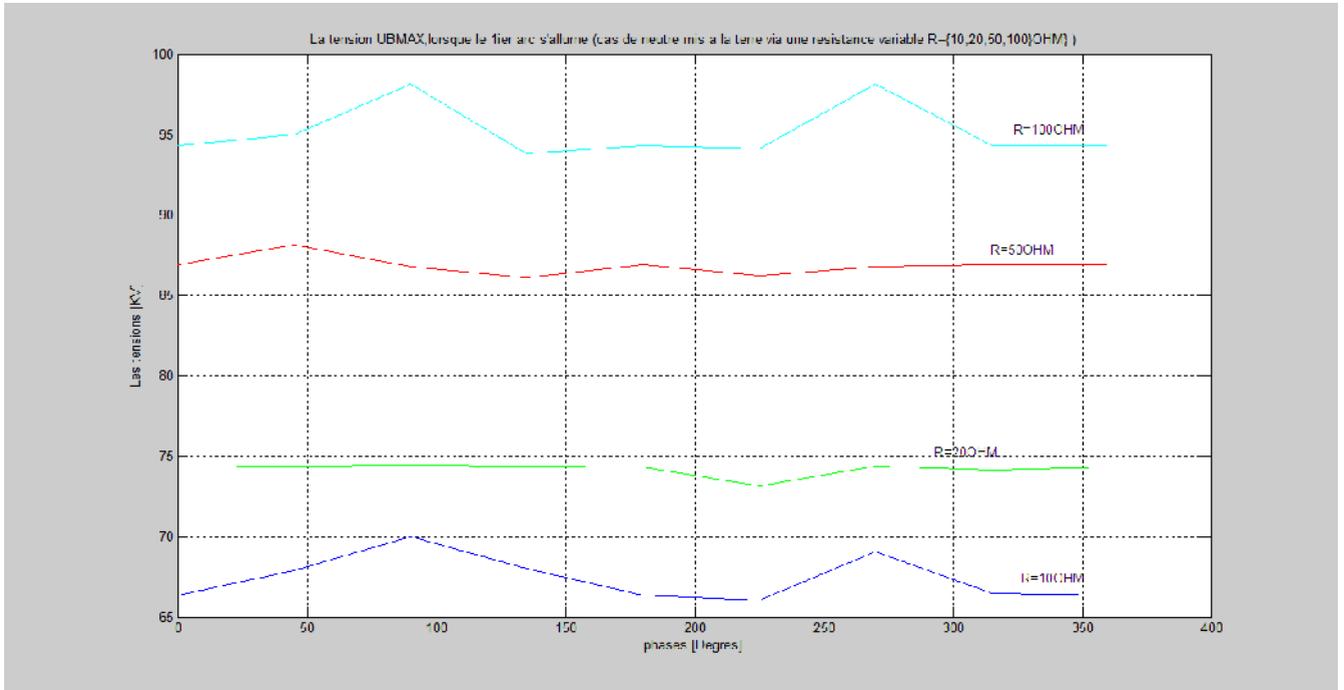


**Figure N° (10) : la tension de la phase A en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume et s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50, 100 \Omega$ ) :**

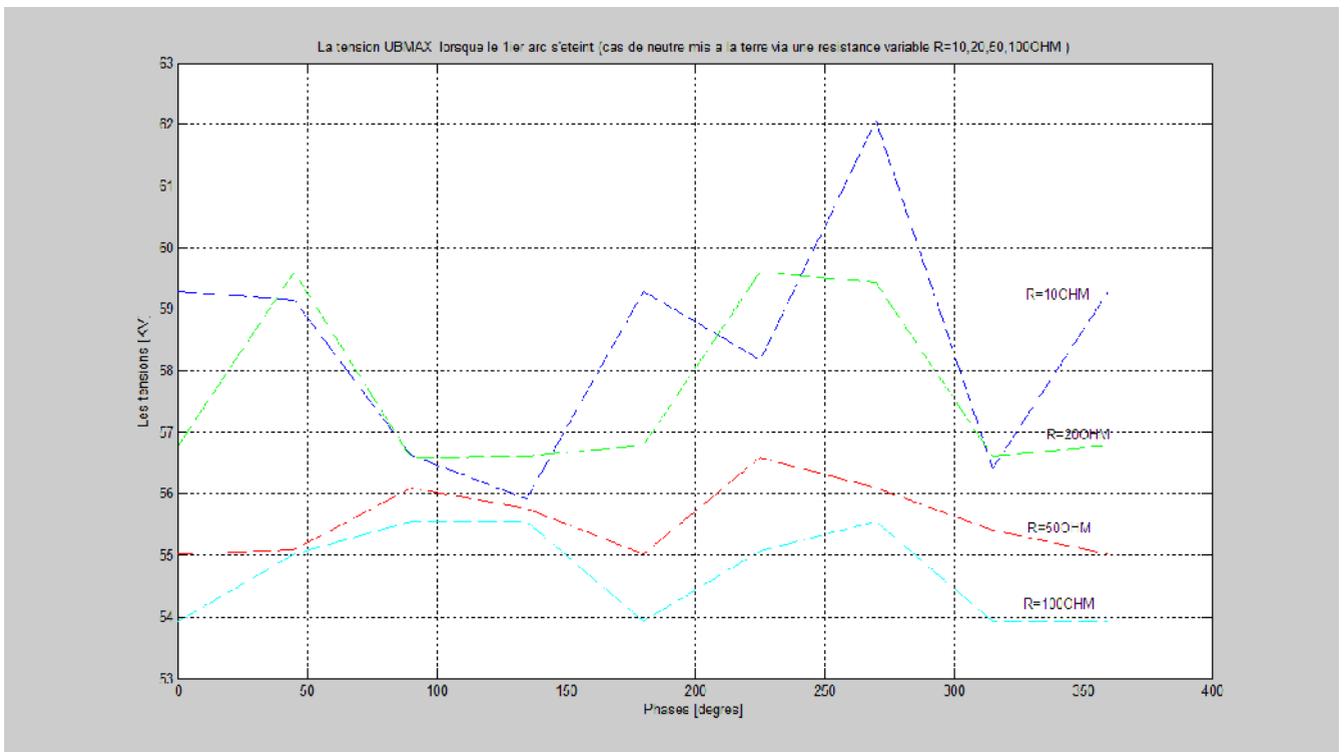


**Annexes :**

**Figure N° (11) : la tension de la phase B en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 1<sup>ier</sup> arc s'allume (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50,100 \Omega$ ) :**

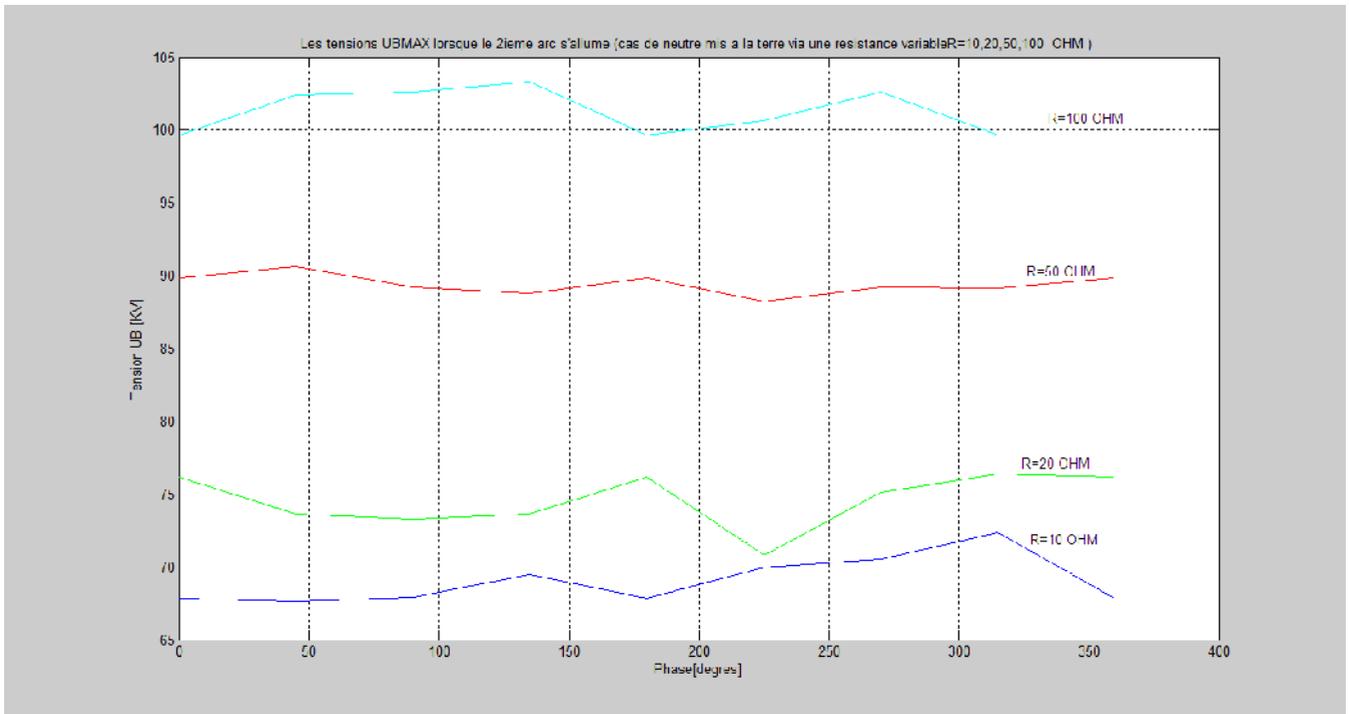


**Figure N° (12) : la tension de la phase B en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 1<sup>ier</sup> arc s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50,100 \Omega$ ) :**

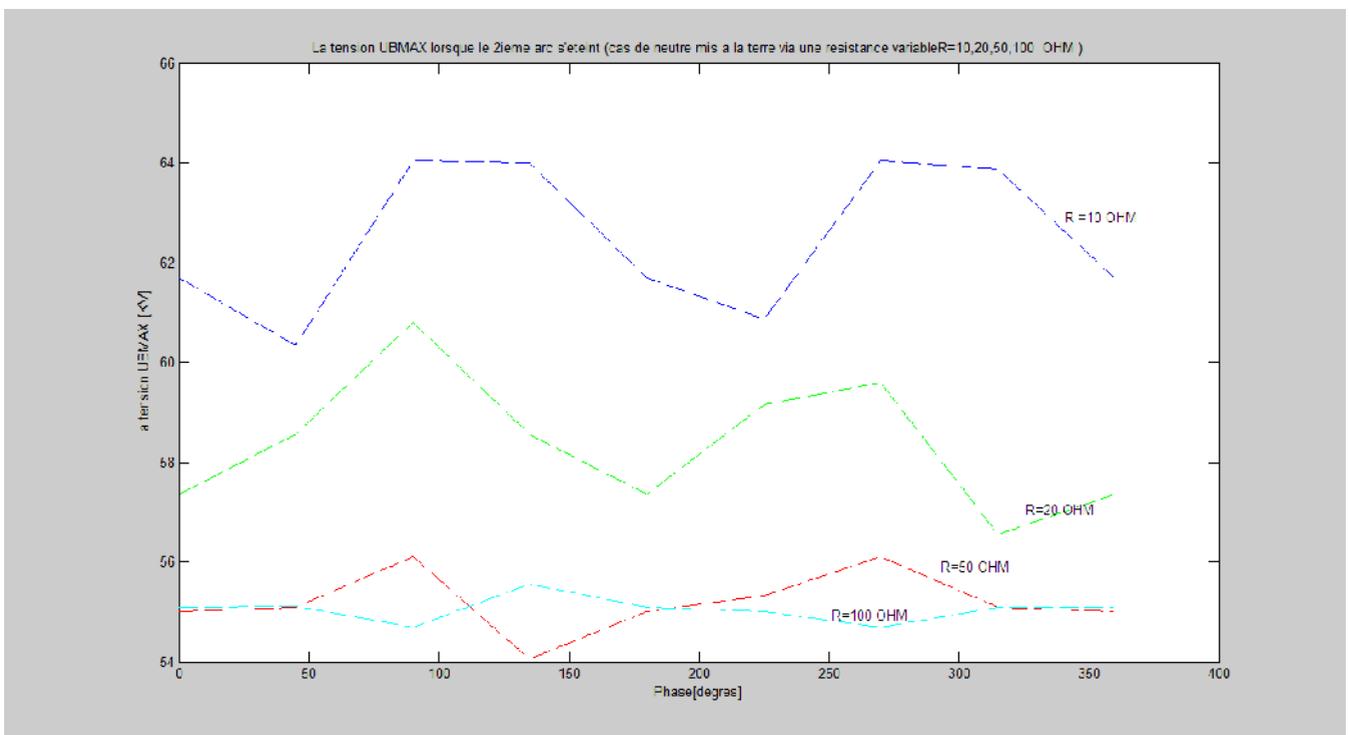


**Annexes :**

**Figure N° (13): la tension de la phase B en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50,100 \Omega$ ) :**

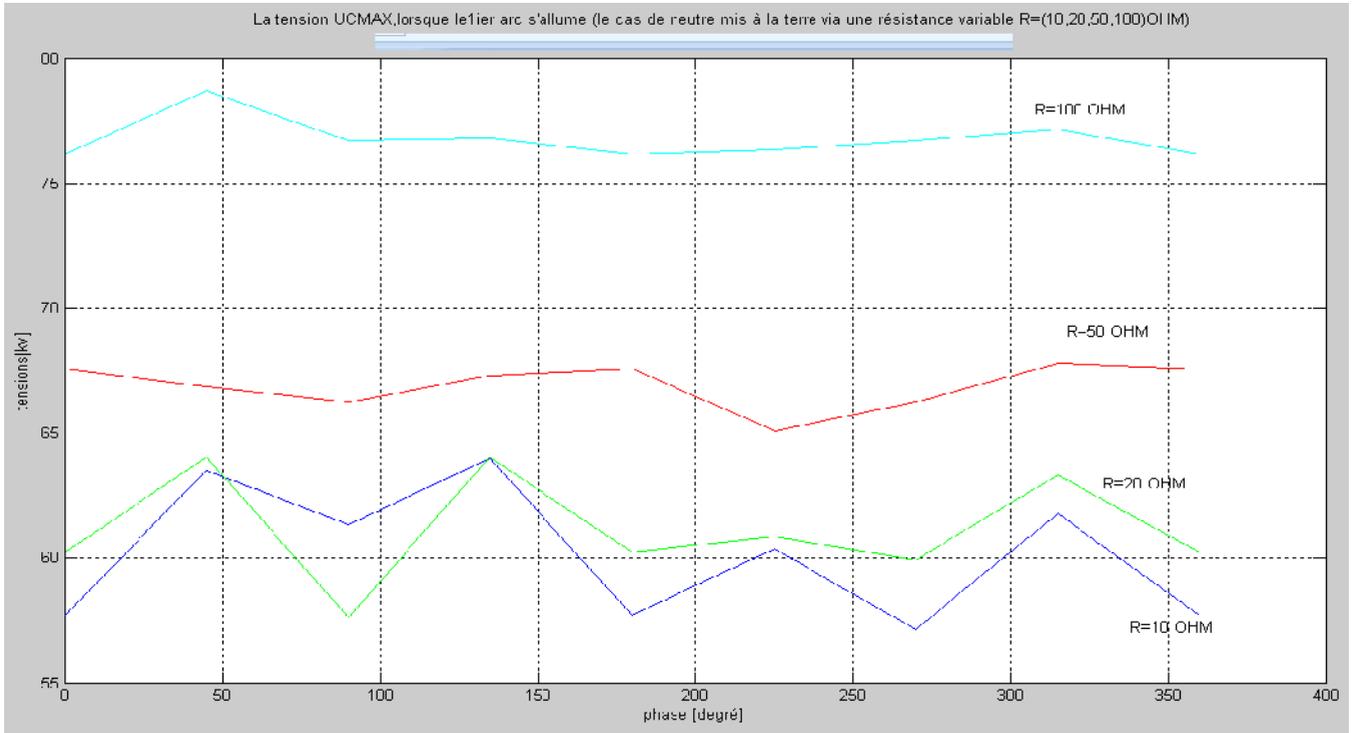


**Figure N° (14): la tension de la phase B en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50,100 \Omega$ ) :**

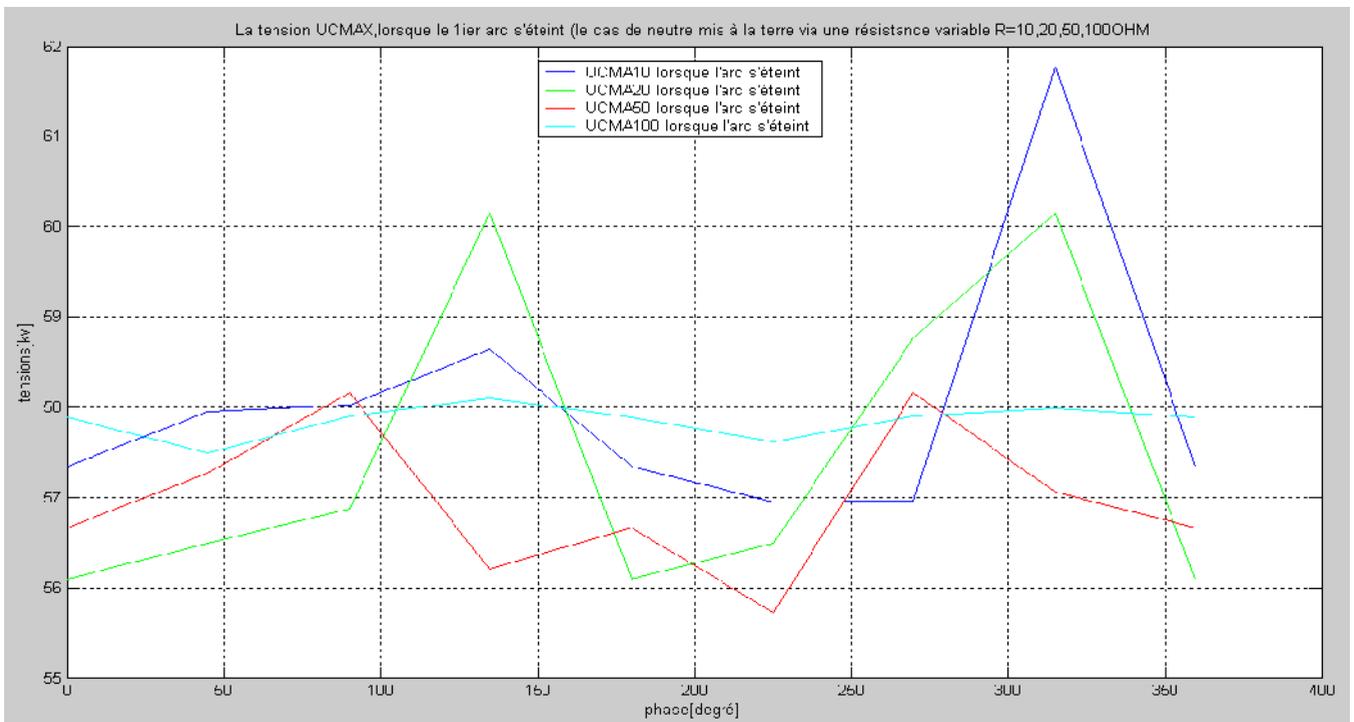


**Annexes :**

**Figure N° (15): la tension de la phase C en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 1<sup>ier</sup> arc s'allume (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance R=10, 20, 50,100  $\Omega$ ) :**

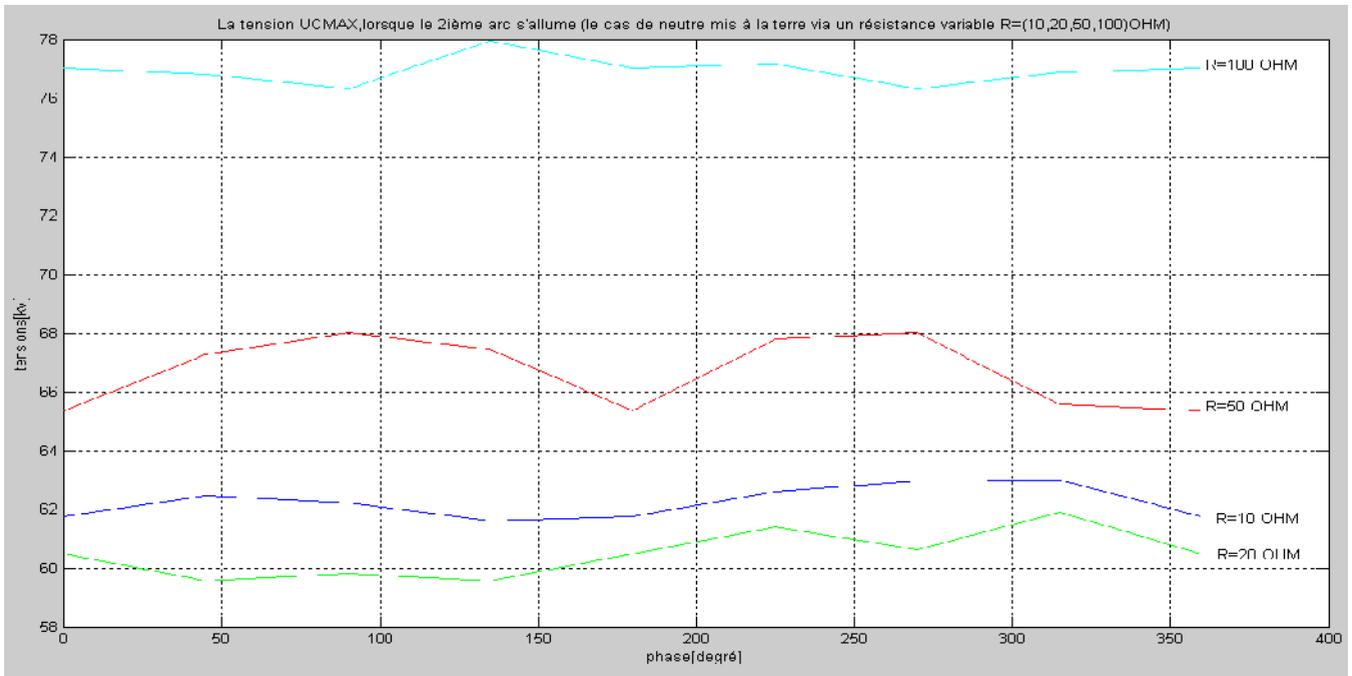


**Figure N° (16) : la tension de la phase C en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le1<sup>ier</sup> arc s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance R=10, 20, 50,100  $\Omega$ ) :**

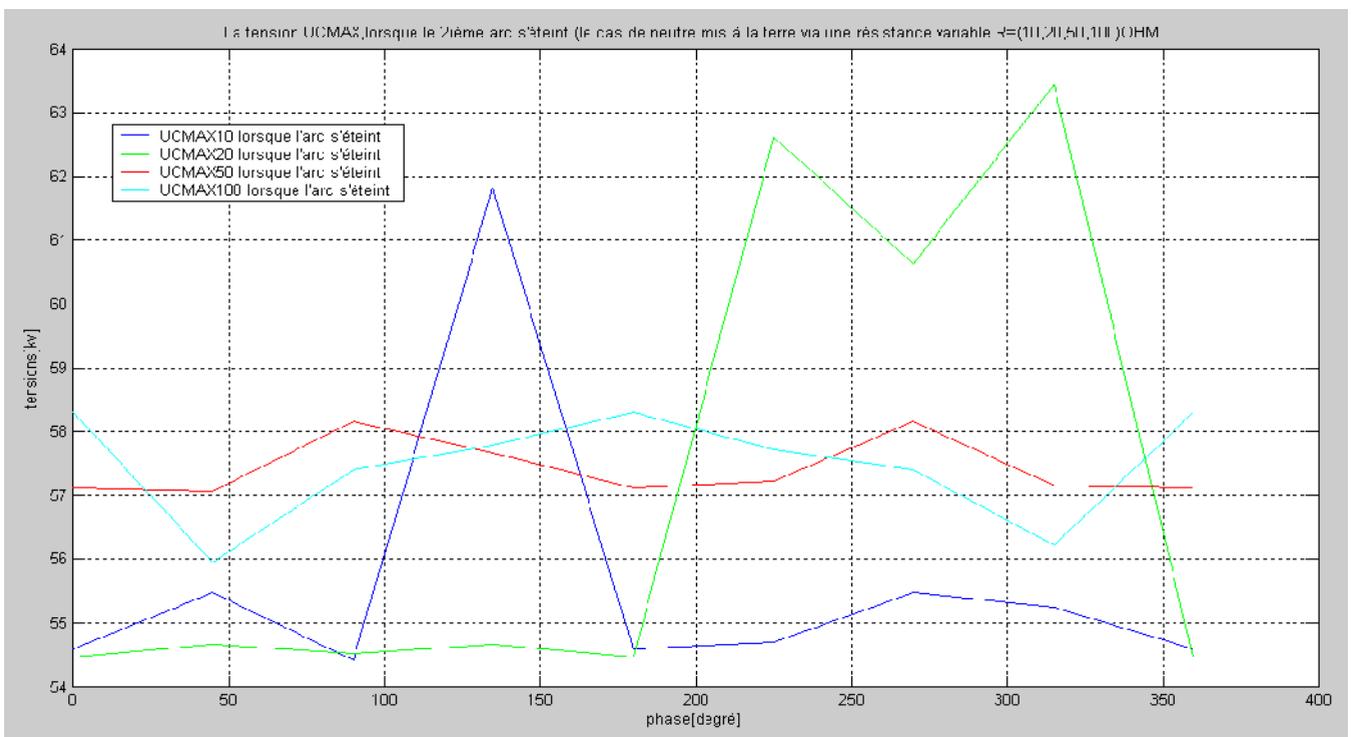


## Annexes :

**Figure N° (17) : la tension de la phase C en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50,100 \Omega$ ) :**

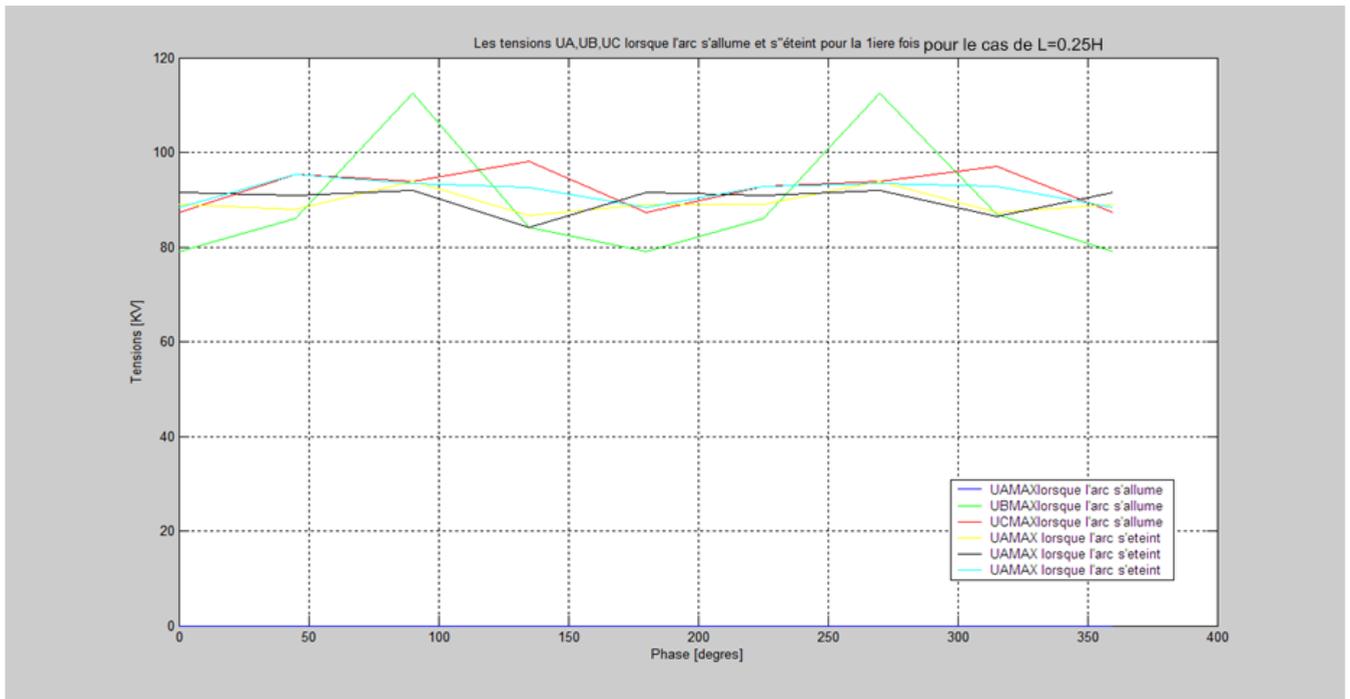


**Figure N° (18) : la tension de la phase C en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de résistance  $R=10, 20, 50,100 \Omega$ ) :**



## Annexes :

**Figure N° (19) : les tensions des trois phases en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'allume (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de inductance  $L=0.25H$ ) :**



**Figure N° (20) : les tensions des trois phases en fonction de la phase  $\varnothing$  lorsque le 2<sup>ème</sup> arc s'éteint (cas de neutre mis a la terre a travers différentes valeurs de inductance  $L=0.25H$ ) :**

