

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT
D'ELECTROMECHANIQUE



جامعة باجي مختار - عنابة

كلية علوم الهندسة

قسم الإلكتروميكانيك

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

Option : Electromécanique

Par : M^r. **DAAS Abdelhakim**

Thème

Contribution à l'amélioration de la protection
contre les surcharges atmosphériques

Directeur du mémoire : M^r. HADDOUCHE Ali MC Université BADJI MOKHTAR - Annaba

Soutenue devant le jury :

Président : M^r. HADJADJ Aouel Elias MC Université BADJI MOKHTAR – Annaba

Rapporteur : M^r. HADDOUCHE Ali MC Université BADJI MOKHTAR – Annaba

Examineur: M^r. SAAD Salah MC Université BADJI MOKHTAR – Annaba

M^r. CHEGHIB Hocine PHD Université BADJI MOKHTAR – Annaba

Membre invité : M^r. BOUKHNAF Messaoud CC Université BADJI MOKHTAR – Annaba

Juin 2004

Recommandations

Nous souhaitons de tenir compte les recommandations et les propositions suivantes :

- Chaque ligne de transport d'électricité doit être en faisceau pour le but d'atténuer les pertes de l'effet de couronne.
- Pour diminuer les pertes de puissances actives et réactives: on utilise des conducteurs de phase de faible résistivité, on diminue la longueur des lignes de transport (création des centrales de production d'énergie), on augmente la section des lignes en respectant les normes internationales, réaliser rapidement le projet de **400 KV** qui sera le premier projet de très haute tension en Algérie.
- Installer les parafoudres choisis.
- Installer les paratonnerres choisis.
- Placer (mise en place) les câbles de gardes choisis sur toute la longueur de la ligne en respectant les positionnements optimaux déterminés.

Enfin, avec l'application de ces recommandations ; la boucle étudiée deviendra bien protégée contre les risques de la foudre, ainsi que les pertes seront très faibles.

Table des matières

Dédicace	
Remerciements	
Table des matières	1
ملخص	5
Résumé	7
Summary.....	9
Liste des tableaux	11
Liste des figures	12
Liste des symboles	15
Préambule.....	21
<i>Chapitre 1 : Phénoménologie de la foudre</i>	23
1.1 introduction	23
1.2 Origine des surtensions atmosphériques	24
1.2.1 le Coup de foudre direct	25
1.2.2 le Coup de foudre indirect	26
1.3 Phénomène de foudre	28
1.3.1 Les manifestations de la foudre	28
1.3.2 Formation d'un orage orageux	30
1.3.3 Classification des coups de foudre	32
1.3.4 Description de coup de foudre négatif	33

1.3.5 Principales caractéristiques de coup de foudre.....	34
1.3.6 Prédiction de la foudre	37
1.3.7 Mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique	38
1.4 Distribution des amplitudes des courants de foudre.....	39
1.5 Fréquence de foudroiement d'une ligne.....	40
1.6 Contraintes appliquées à une ligne touchée par un coup de foudre	42
1.6.1 Coup de foudre sur les conducteurs de phases	42
1.6.2 Coup de foudre sur un pylône ou sur un câble de garde	42
1.6.3 Onde de surtension par coup de foudre arrivant d'un poste de transformation	44
1.7 Effets de la foudre sur les installations électriques	45
1.8 Conclusion	49
Chapitre 2 : Protection contre la foudre	50
2.1 Introduction	50
2.2 Coefficient (niveau) céramique (N_k).....	51
2.3 Courbes isokéramiques	51
2.4 Nombre de coups de foudre par unité de surface et par année (N_s).....	52
2.5 Nombre de coups de foudre touchant le câble de garde ou la ligne par K_m de Langueur et par année (N_L).....	53
2.6 Compteur de coups de foudre.....	53
2.7 Principes de protection contre la foudre	53
2.7.1 Protection 1 ^{er} niveau	54
2.7.1.1 Paratonnerres	54
2.7.1.2 Cages maillées ou de faraday	61
2.7.1.3 Fils de garde (tendus).....	62
2.7.2 Protection 2 ^{em} niveau	66
2.7.2.1 Eclateurs	67
2.7.2.2 Parafoudres	71
2.7.3 Protection 3 ^{em} niveau	87
2.8 Conclusion.....	87

Chapitre 3 : Modélisation de la ligne électrique	89
3.1 Introduction	89
3.2 Paramètres d'une ligne électrique	89
3.3 Caractéristiques longitudinales	95
3.4 Caractéristiques transversales	102
3.5 Conclusion	108
Chapitre 4 : Pertes dans la ligne électrique aérienne.....	109
4.1 Pertes par effet de couronne	109
4.1.1 Introduction	109
4.1.2 Nature du phénomène d'effet couronne dans les ligne H.T	110
4.1.3 Calcul du champ critique (formule de peek)	110
4.1.4 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs	111
4.1.5 Mécanisme de formation des pertes couronne.....	111
4.1.6 Différents facteurs influant sur les pertes couronne.....	112
4.1.7 Calcul des pertes par effet couronne	116
4.1.8 Résultats de calcul	121
4.2 Pertes de puissance dans la ligne électrique.....	122
4.2.1 Calcul des pertes actives	122
4.2.2 Calcul des pertes réactives	122
4.2.3 Résultats de calcul	122
4.3 Estimation des pertes dans les lignes électriques	123
4.4 Conclusion	124
Chapitre 5 : Choix des moyens de protection contre la foudre	125
5.1 Introduction	125
5.2 Niveau kéraunique (N_k)	126
5.3 Densité de coups de foudre au sol (N_s).....	126
5.4 Nombre de coups de foudre (N_l) touchant la ligne	126

5.5 Choix des parafoudres	127
5.6 Choix des éclateurs	130
5.7 Choix des paratonnerres.....	130
5.8 Choix des fils de garde	132
5.9 Conclusion	133
Conclusion générale	134
Recommandations.....	136
Bibliographie.....	137
Annexe	139

ملخص

تناولنا في عملنا المقدم الدراسة الظاهرية للصاعقة، و التي سمحت لنا بمعرفة شدة خطورتها بخاصة على مستوى الأجهزة و الشبكات الكهربائية، ثم إن خطورة الظاهرة تفرض علينا وجوب حماية عالية للأجهزة و الشبكات الكهربائية، لذلك قمنا بدراسة مفصلة لمختلف أجهزة الحماية ضد الصاعقة، و بيان معايير اختيارها، و مكان وضعها.

تسبب ظاهرة الصاعقة ظاهرة الأثر الكوروني الكهربائي، هذه الأخيرة لها آثار سلبية تتمثل في الضياع الكوروني الكهربائي. و قد حاولت دراستنا التخفيض من القيمة المرتفعة للضياع، و ذلك بإقامة خطوط النقل الكهربائي.

كان من الأرجح أن نقوم بتشكيل النموذج الرياضي الحقيقي لكل خط نقل كهربائي من الحلقة الكهربائية المدروسة (الحجار - الخروب - رمضان جمال، سكيكدة)، و ذلك حتى يتسنى لنا حساب ثوابت الشحنة الكهربائية (شدة التيار لكل خط نقل كهربائي) و منه إمكانية حساب الضياع، كل هذا بغية الوصول إلى حل فعلي للضياع، يضمن تخفيض ضياع الطاقة الكهربائية الفعالة و الارتكاسية الموجودة في خطوط النقل الكهربائي.

و قد لاحظنا ضياع مبالغ مالية كبيرة في السنة بعد أن قمنا بإعطاء قيمة نقدية للضياع الكهربائي لكلا النوعين بوحدة دج/السنة.

و لضمان الربح و الفائدة من تخفيض الضياع الكهربائي، ارتأينا أن نتبع الحلول التالية:

- ◀ بالنسبة للضياع الكوروني الكهربائي، يجب بناء خطوط نقل كهربائي على شكل حزم، و رفع شدة التوتر، و زيادة مساحة مقطع النواقل الكهربائية.
- ◀ بالنسبة لضياع الطاقة الكهربائية الفعالة و الارتكاسية، يجب تقليص مسافات النقل، و ذلك بإنشاء مراكز توليد الطاقة الكهربائية و اختيار نواقل كهربائية ذات مقاومة جد ضعيفة، و رفع شدة التوتر الكهربائي، مما يعيق النقل الحسن للطاقة الكهربائية، و ما دما بحاجة ملحة لذلك، و جب علينا إقامة حماية عالية و جد فعالة ضد هذه الظاهرة بالاستعانة بالسائل التالية :

- 220 ◀ نوعين من جهاز دافع الصاعقة، يخصص النوع الأول للشبكة الحالية ذات تواتر كيلو فولط ، و يخصص النوع الثاني للشبكة التي هي في طريق الإنجاز ذات تواتر جد عالي و هو 400 كيلو فولط ، و كلا النوعين من جهاز دافع الصاعقة من علامة (د.ج.أ.أندلك). (DGA indlec)
- ◀ الاستعانة بأربعة أجهزة من دافع الرعد، يخصص جهاز واحد لكل محطة من محطات الحلقة المدروسة، و هذه الأجهزة الأربعة من علامة (برفكترون © 60.6.2)
- (PREVECTRON® 2 6. 60)
- ◀ كوابل للمراقبة و الحماية ذات مقاطع مساحتها مكافئة لمساحة الأطوار (خطوط النقل الكهربائي)، توضع بشكل أفضل ، حسب حسابنا و ضبطنا له سابقا، إضافة إلى ذلك وجوب امتداد هذه الكوابل على طول خطوط النقل الكهربائي.

Résumé

L'ensemble des lignes de transport et de distribution électrique est formé un réseau qui est un certain nombre de fonction et de comportement qu'il faut définir, mettre en œuvre, maîtriser grâce à une conception et une exploitation convenable, ce sont ensuite des ouvrages et des matériels, pylônes, lignes aériennes et souterraines, postes, câbles, appareillages, transformateurs, parafoudres, paratonnerres, ... etc.

L'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques se fait par la protection de ceux-ci contre les différents phénomènes tels que les surtensions de foudre qui se propagent le long d'une ligne électrique subissent une déformation sous l'influence de l'effet couronne, l'atténuation de l'effet couronne qui superpose à une distorsion par effet de peau (effet pelliculaire) est due à la dissipation supplémentaire d'énergie par injection de charges d'espace autour des conducteurs dès que la tension d'effet couronne est dépassée.

Le présent travail est consacré à l'étude du phénomène de la foudre et l'analyse des différents moyens de protection contre ce phénomène ; qui reste toujours très mystérieux pour la plupart des personnes depuis des décennies, la foudre terrifie de nombreux humains par ses manifestations qui frappent l'imagination, sa lumière aveuglante, sa rapidité et le grondement du tonnerre qui l'accompagne, elle apporte avec elle ; la destruction, la mort et le malheur, elle a été longtemps assimilée au feu de ALLAH.

Dans le premier chapitre qui est consacré à l'étude de la phénoménologie de la foudre, on a étudié l'origine des surtensions atmosphériques, le phénomène de la foudre, la distribution des amplitudes des courants de foudre, la fréquence de foudroiement d'une ligne, les contraintes appliquées à une ligne touchée par un coup de foudre et les effets néfastes de la foudre sur les installations électriques.

Pour le deuxième chapitre qui est destiné à la protection contre la foudre, on a fait une analyse des différents moyens de protection contre la foudre (paratonnerres, cages maillées, fils de garde, éclateurs et parafoudres), et on a conclu que le parafoudre est le meilleur moyen de protection contre la foudre.

Dans le troisième chapitre nous avons établi le modèle mathématique de la ligne aérienne pour faire le choix et le dimensionnement des appareils de protection ainsi que le calcul des différentes pertes occasionnées dans la ligne (pertes d'effet couronne et pertes de puissance active et réactive).

Dans le quatrième chapitre qui est consacré aux pertes dans la ligne (pertes d'effet couronne et pertes de puissance active et réactive), on a parlé de la nature du phénomène d'effet couronne dans les lignes à haute tension. Nous avons fait un programme en langage MATLAB 5.3 afin de calculer les pertes d'effet couronne et les pertes actives et réactives dans la ligne. Nous avons fait aussi une estimation de ces pertes en DA/année qui a été dépassée des millions centimes par année.

Pour diminuer ces pertes, on a proposé les solutions suivantes :

- Pour les pertes d'effet couronne ; il faut construire des lignes en faisceaux.
- Pour les pertes actives et réactives ; il faut diminuer la distance de transport de l'énergie électrique en créant des centrales de production d'énergie, choisir des conducteurs avec une faible résistivité, augmentation de la section des conducteurs ainsi que l'augmentation de la tension.

Dans le dernier chapitre qui est destiné au choix des moyens de protection ; nous avons choisis des moyens de protection afin de protéger la boucle (ELHADJAR- ELKHROUB- SKIKDA- RAMDANE DJAMEL- ELHADJAR) contre les risques de la foudre, ces moyens sont :

- Deux types de parafoudre, le premier type est pour le réseau réel de **220 KV** et le deuxième type pour le réseau en voie de réalisation de **400KV**, ces deux types sont de la marque parafoudre **DGA indelec**.
- Pour les câbles de garde, on a proposé des câbles de garde avec des sections équivalentes à celles des phases (**288 mm², 411 mm²**) et avec leur allongement sur toute la longueur de la ligne et avec des positionnements optimaux déterminés.
- Pour les paratonnerres, on a choisis pour protéger les postes de la boucle contre les effets néfastes de la foudre; quatre paratonnerres dont le type est de : **PREVECTRON[®] 2 6 .60**, d'où un seul paratonnerre pour chaque poste.

Summary

The set of the lines of transport and electric distribution is formed a network which is certain number of function and behavior it needs to define, to implement, to master due to a conception and a suitable exploitation, they are then works and materials, masts, air and subterranean connections, posts, cables, equipments, transformers, lightning conductors, lightning conductors, etc.

The improvement of the efficiency of electricity networks this fact by the protection of these against various phenomena such as the surges of lightning which propagate along an electric line undergo a deformation under the influence of the effect corona, the enfeeblement of the effect corona which stacks in a distortion by effect of skin (effect pellicular) is due to the supplementary waste of energy by injection of loads of space drivers as soon as the tension of effect corona is exceeded.

The present work is dedicated to the study of the phenomenon of the lightning and the analysis of the various means of protection against this phenomenon ; which remains always very mysterious for the most part of the persons for decades, the lightning terrifies numerous human beings by its demonstrations which strike imagination, its blinding light, its speed and rumbling of the thunder which accompanies it, it brings with it ; destruction, death and misfortune, it was for a long time likened in ALLAH's fires.

In the first chapter which is dedicated to the study of the phenomenology of the lightning, one studied the origin of atmospheric surges, the phenomenon of the lightning, the distribution of the amplitudes of the currents of lightning, the frequency of striking by lightning of a line, the constraints applied to a line touched by a blow of lightning and fatal effects of the lightning in electric installations.

For the second chapter which is intended for the protection against the lightning, we made an analysis of the various means of protection against the lightning (lightning conductors, meshed cages, spark gaps and lightning conductors), and we concluded that the (parafoudre) is the best means of protection against the lightning.

In the third chapter we established the mathematical model of air connection to choose and the dimensioning of the devices of protection as well as the calculation of various losses caused in the line (losses of effect corona and losses of active and reactive power).

In the fourth chapter which is dedicated to losses in the line (losses of effect crowns and losses of active and reactive power), we spoke about the nature of the phenomenon of effect corona in high-tension lines. We made a program in language MATLAB 5.3 to calculate the losses of effect corona

and active and reactive losses in the line. We made also an estimation of these losses in DA / year which was exceeded with millions centimes a year.

To decrease these losses, we proposed the following solutions:

- For the losses of effect corona; it is necessary to build lines in bundles.
- For active and reactive losses; it is necessary to decrease the length of haul of electrical energy by creating power plants of production of energy, to choose drivers with a weak resistivity, an increase of the section of the drivers as well as the increase of the tension.

In the last chapter which is intended for the choice of the means of protection; we chose means of protection to protect the buckle (ELHADJAR-ELKHROUB-SKIKDA-RAMDANE DJAMEL-ELHADJAR) against the risks of the lightning, these means are:

- Two types of lightning conductor, first type is for the real network of **220 KV** and the second type for the network in process of realization of **400KV**, these two types are of the mark lightning conductor DGA indelec.
- For cables, we proposed cables with sections equivalent to those of phases (**288 mm²**, **411 mm²**) and with their elongation on all the lengths the line and with locations optimal determined.
- For lightning conductors, one chose to protect the posts of the buckle against the fatal effects of the lightning; four lightning conductors of which type is of :
- **PREVECTRON® 2 6 .60**, where from a single lightning conductor for every post.

Liste des tableaux

Tableau	Titre du tableau	page
1.01	Principales caractéristiques des coups de foudre.....	
1.02	Paramètres d'un coup de foudre.....	
1.03	Hauteur des conducteurs d'une ligne à prendre en compte pour le calcul de leur foudroiement.....	
2.01	Coefficients kéraunique (N_K).....	
2.02	Dimensions des organes capteurs de descente des paratonnerres (exemple de Suisse)	
2.03	Dimension des prises de terre artificielles pour paratonnerres	
2.04	Courants critiques de foudre.....	
2.05	Tensions nominales normales des parafoudres.....	
2.06	Classes des tensions efficaces normales recommandées par la C E I pour des fréquences de services de $(50 \div 60) Hz$	
2.07	Valeurs des paramètres caractéristiques des parafoudres au carbure de silicium et à éclateur du réseau français de transport d'électricité.....	
2.08	Exemples des paramètres caractéristiques des parafoudres à oxyde de zinc.....	
2.09	Distance d'installation des parafoudres à oxyde de zinc sur le réseau de transport d'électricité français.....	
4.01	Résultats de calcul des pertes par effet de couronne dans les lignes de transport.....	
4.02	Résultats de calcul des pertes actives et réactives dans chaque ligne de la boucle étudiée.....	
4.03	Estimation des pertes d'énergie dans les lignes de transport en DA.....	
5.01	Caractéristiques des parafoudres proposés	
5.02	Positionnements optimaux des câbles de garde.....	

Liste des figures

<i>Fig.</i>	<i>Titre de la figure</i>	<i>page</i>
1.01	Description schématique d'un coup de foudre.....	25
1.02	Forme du courant de foudre nuage-sol négatif.....	26
1.03	Diagramme expliquant les montées et les différences de potentiel de terre d'une installation électrique.....	26
1.04	Formes des ondes de foudre normalisées.....	27
1.05	Phénomène du coup de foudre.....	29
1.06	Début du mécanisme d'électrisation.....	30
1.07	Début de la phase active.....	31
1.08	Maturité de la phase active.....	31
1.09	Les différents coups de foudre.....	33
1.10	Description des différentes étapes de coup de foudre négatif descendant.	34
1.11	Oscillogramme d'un courant de foudre.....	35
1.12	Distribution statique expérimentale, en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs, selon IEEE.....	35
1.13	Distribution statique expérimentale, en raideur de front, des courant de foudre positifs et négatifs, selon IEEE.	36
1.14	Représentation des différentes zones de protection offertes par une tige verticale.....	39
1.15	Distribution statistique des courants de foudre, résultats obtenus à la station de Mon Son Salvatore (SUISSE).	40
1.16	Fréquence de foudroiement d'un conducteur horizontale au dessus du sol. Courbe donnée pour $L = 100 \text{ Km}$ et $N_K = 4 \text{ coup} / \text{Km}^2 / \text{an}$	41
1.17	Chute de coup de foudre sur un conducteur de phase.....	42
1.18	Chute de coup de foudre sur un câble de garde.....	43
1.19	Ondes de surtension arrivant dans un poste.....	44
1.20	Montée en potentiel de la prise de terre.....	46
2.01	Courbes isokérauniques mondiales.....	52
2.02	Détermination d'une zone protégée par la méthode de la sphère fictive.....	55
2.03	Augmentation de température Δt ($^{\circ}\text{C}$) de conducteur de cuivre de différents diamètres en fonction de l'intégral d'action.	56

2.04	Augmentation de température Δt (C°) de conducteurs de cuivre et de fer en fonction de l'intégrale d'action surfacique.....	56
2.05	L'installation de paratonnerre sur bâtiment exposé.....	58
2.06	Schéma équivalent.....	58
2.07	Zone d'attraction de la foudre.....	60
2.08	Relation déterminée entre la distance d'amorçage d et le courant de foudre i	60
2.09	Cas de foudroiement intermédiaire d'une tour élevée (tour de Ostankino à Moscou).....	61
2.10	Cage maillée ou cage de Faraday.	62
2.11	Les fils de garde.....	63
2.12	Les trois zones d'amorçage d'une ligne aérienne.....	64
2.13	L'installation de protection pour le 2 ^{ème} niveau de protection.....	66
2.14	Tension disruptive de manœuvre et de foudre pour éclateur pointe-pointe à pointe-plan...	68
2.15	Influence de la raideur du front sur le retard à l'amorçage : τ , retard à l'amorçage.....	68
2.16	Eclateur de matérialisation à cornes de soufflage sur une chaîne d'isolateurs d'ancrage....	69
2.17	Eclateur de protection sur une borne de traversée d'appareillage.....	69
2.18	Corne d'amorçage (éclateur) et anneaux de garde (diminution de l'effet de couronne).....	70
2.19	Eléments de parafoudre.....	71
2.20	Croquis expliquant le fonctionnement d'un élément de parafoudre avec éclateur à soufflage magnétique et résistance non linéaire.....	72
2.21	Schéma équivalent d'un parafoudre avec répartition imposée de la tension.....	73
2.22	Comparaison des tensions d'amorçage U d'un parafoudre et éclateur de coordination lors de l'application d'une tension croissante linéairement en fonction du temps (courbes tension - temps de retard à l'amorçage).....	74
2.23	Constitution du parafoudre MT au carbure de silicium et à éclateur.....	79
2.24	Fonctionnement du parafoudre MT au carbure de silicium et à éclateur.....	80
2.25	Constitution du parafoudre HT au carbure de silicium et à éclateur.....	81
2.26	Fonctionnement du parafoudre HT au carbure de silicium et à éclateur.....	82
2.27	Caractéristique typique courant-tension d'une varistance à oxyde de zinc.....	84
2.28	Parafoudre MT à oxyde de zinc et enveloppe synthétique protégeant un transformateur MT/BT	85
3.01	Schéma équivalent en π d'une ligne aérienne.....	90
3.02	Résistance linéaire en fonction de la fréquence.....	91
3.03	Composante tangentielle de B conducteur plein.....	96

3.04	Géométrie de n conducteurs.....	97
3.05	Flux élémentaire $\Delta\Phi_{3n}$ embrassé par les conducteurs 3 et n sur la longueur Δx	98
3.06	Surface cylindrique entourant un axe chargé.....	103
3.07	Coupe d'une ligne à n conducteurs.....	104
3.08	Champ électrique E , dû à deux axes parallèles avec charges opposées.....	106
4.01	Phénomène de l'effet de couronne.....	110
4.02	Abaque de prédétermination des pertes des conducteurs secs.....	114
4.03	Résultats des expériences des pertes de couronnes.....	115
5.01	Fonctionnement des paratonnerres PDA	131

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
U_m	La tension la plus élevée pour le matériel.....	KV
U	Le potentiel de la terre lorsque le courant de foudroiement écoulé par le sol...	KV
I	Courant de foudre.....	KA
ρ_s	Résistivité du sol.....	Ωm
D	Distance du point d'impact de la foudre.....	m
N	Nombre de secondes qui s'écoulent entre le tonnerre et l'éclair.....	l
D_{obs}	Distance qui sépare l'observateur de la charge orageuse.....	m
d	Distance de l'amorçage.....	m
$h_{t,v}$	Hauteur de la tige verticale.....	m
N_K	Niveau céramique.....	<i>Jour orageux/année</i>
h	Hauteur des conducteurs au dessus du sol.....	m
h_P	Hauteur des pylônes	m
Y_P	Hauteur des conducteurs de phase à leur point d'impact.....	m
S_g	Flèche du câble de garde.....	m
S_c	Flèche du conducteur de phase.....	m
N_f	Fréquence de foudroiement de la ligne.....	<i>coup/100Km/année</i>
l	Largeur de la ligne.....	m
α	Facteur d'influence des pylônes.....	l
L	Longueur de la ligne électrique de transport.....	Km
Z	Impédance d'onde du conducteur touché.....	
U_F	Tension d'amorçage du pylône.....	KV
L_s	Self inductance.....	
K	Fraction du courant s'écoulant par un pylône.....	l
$U(t)$	Tension apparaissant aux bornes de la chaîne d'isolateurs.....	KV

R	Résistance du prise de terre (en onde raide).....	Ω
$i(t)$	Courant de foudre.....	KA
U_c	Valeur de crête de l'onde incidente.....	KV
N_L	Nombre de lignes arrivant au poste.....	l
U_p	Surtension par coup de foudre arrivant d'un poste de transformation.....	KV
U_T	Valeur absolue de la tension de crête aux bornes de l'appareil.....	KV
N_s	Densité de coup de foudre au sol.....	l/Km².année
N_l	Nombre de coup de foudres touchant une ligne ou câble de garde.....	coup/an.Km
G	Intégrale d'action.....	A².s
t_i	Temps initial du phénomène.....	s
t_f	Temps final du phénomène.....	s
u	tension entre le clocher et la terre.....	V
R_t	Résistance de terre.....	Ω
R_{fil}	Résistance du fil.....	Ω
U_{RT}	Différence de potentiel entre le porche et la terre.....	V
H	hauteur du mât du paratonnerre.....	m
R_c	Rayon du cylindre.....	m
S	Surface de capture.....	m²
$n_{d.op}$	Distance optimale entre le câble de garde et la phase.....	m
θ	Angle de protection optimale.....	rad
Zl	Impédance effective longitudinale	Ω/m
Rl	Résistance linéique	Ω/m
Xl	Réactance linéique	Ω/m
Y	Impédance effective transversale	S/m
Zt	Impédance effective transversale	S/m
Bl	Suscéptance linéique	S/m
W	Pulsation du courant	Rad/s
C	Capacité	H
J	Densité de courant	A/m²
τ	Conductivité électrique	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
E	Champ électrique	r/m
l	Longueur du conducteur	m
ρ	Résistivité du conteur	($\Omega \cdot m$)

ρ_0	Résistivité du conducteur	$\Omega.m$
α	Coefficient de température	1
θ	Température	c°
μ_0	Profondeur de pénétration de l'effet pelliculaire	M
M_0	Perméabilité du vide	H/m
M_r	Perméabilité relative du conducteur	1
L_2	Réactance longitudinale (inductance)	H
\emptyset	Flux induit par le courant	Wb
i	Courant circulant dans le conducteur	A
C	Réactance transversale (capacité)	F
q	Charge électrique	C
I	Courant dans la phase	Ka
a	Opérateur de dérivation	1
U_p	Tension de phase	Kv
B	Induction magnétique	T
r	Rayon du conducteur	mm
M_{ii}, M_{ii}	Inductance propre linéique	H
M_{ij}, M_{ij}	Inductance mutuelle linéique	H
$M'_{ii}, corr$	Inductance propre linéique corrigée	H
$M'_{ij}, corr$	Inductance mutuelle linéique corrigée	H
μ_{rn}, μ_{ri}	Perméabilité relative du conducteur commun n et conducteur i	H/m
K_n, K_i	Facteurs correspondant au type des conducteurs	1
$R_{ij} = r_{ji}$	Distance entre axes de conducteur i et j	m
r_{ii}	Rayon du conducteur	mm
e_i	Epaisseur du tube i	mm
ρ_i	Résistivité du conducteur i	Ω
i_i	Courant dans le conducteur i	A
i_n	Courant dans le conducteur n	A
v_{ij}	Tension entre les conducteur i et j	V
v'_{in}	Accroissement linéique de la tension U_n	V
U'_{ij}	Accroissement linéique de la tension U_{ij}	V
$\Delta\Phi_{3n}$	Flux ombragé par deux conducteur 3 et n	Wb
E	Tension induite entre deux conducteurs.....	V

$s = \frac{\partial}{\partial t}$	Opérateur de dérivation par rapport au temps	1
ϵ_0	Constante électrique du vide	f/m
ϵ_r	Constante électrique relative	1
r_{jp}	Distance du point p au conducteur j	m
R_{j^*p}	Distance du point p au conducteur j*	m
E	Champ électrique	V/m
V_p	Potentiel du point p	V
E_c	Champ électrique critique	Kv/cm
D_{s.l}	Densité relative de l'air	1
E_o	Champ critique en fonction de l'état de surface	Kv/cm
m	Coefficient qui tient compte de l'état de surface	1
E_s	Champ électrique superficiel	Km/cm
E_{s*}	Champ électrique superficiel relatif	1
P_{pl.fai}	Pertes sous pluie faible	w/m
E_{s.max}	Champ électrique maximal	Kv/cm
E_{s.moy}	Camp électrique moyen	Kv/cm
K	Coefficient de réduction	1
repreq	Rayon électrique des conducteurs	mm
ρ	Rayon de charge d'espace	m
B	Facteur de peek	1
n	Nombre de conducteur par phase	1
P_{pl.for}	Pertes sens pluie forte	w/m
P_{t.hum}	Pertes en temps humide	w/m
P_{t.sec}	Pertes en temps sec	w/m
P_o	Pertes en fonction de l'état des conducteurs	w/m
P	Pression de l'air	cm Hg
to	Température ambiante	c°
Halt	Altitude au niveau de la mer	cm
f	Fréquence	HZ
r_{i.rc}	Rayon du conducteur	1
r_f	Rayon du cercle circonscrit un faisceau	mm
λ_{ii}	Coefficient de potentiel propre	1

<i>hi ,hj</i>	Hauteur moyenne du conducteur par rapport an sol	<i>m</i>
<i>H</i>	Hauteur d'ancrage	<i>m</i>
<i>F</i>	Flèche	<i>m</i>
<i>dcj</i>	Distance entre phases	<i>m</i>
<i>VL</i>	Tension de la ligne	<i>V</i>
<i>V</i>	Tension simple de la ligne	<i>V</i>
<i>q</i>	Charge linéique	<i>c/m</i>
<i>Tpl.for</i>	Temps de la pluie forte	<i>h</i>
<i>Tpl.fai</i>	Temps de la pluie faible	<i>h</i>
<i>TT.sec</i>	Temps du temps sec	<i>h</i>
<i>TT.hum</i>	Temps du temps humide	<i>h</i>
<i>TTem.sab</i>	Temps du tempête de sable	<i>h</i>
<i>Wef.co</i>	Perte d'énergie active par effet couronne	<i>Kwh/km</i>
<i>N.R</i>	Nombre d'heures	<i>H</i>
<i>µef.co</i>	Perte d'énergie réactive par effet couronne	<i>kvarh/km</i>
<i>Tg ce</i>	Correspondant au facteur de puissance	<i>I</i>
<i>Wact.</i>	Pertes actives dans la ligne	<i>W</i>
<i>Rl</i>	Résistance longitudinale de la ligne	<i>Ω</i>
<i>Il(r)</i>	Courant longitudinal au milieu de la ligne (partie réelle)	<i>A</i>
<i>Gp</i>	Conductance résultant de toutes les conductances	<i>s</i>
<i>Up</i>	Tension simple de phase	<i>V</i>
<i>Vréa.</i>	Pertes réactives dans la ligne	<i>VAR</i>
<i>Bp</i>	Susceptance résultant de l'ensemble des susceptances	<i>s</i>
<i>Xl</i>	Réactance longitudinale de la ligne	<i>Ω</i>
<i>Vc</i>	Tension maximale de régime permanent	<i>v</i>
<i>Vo</i>	Tension simple du réseau	<i>v</i>
<i>Icc</i>	Courant de court-circuit	<i>KA</i>
<i>Up</i>	Niveau de protection	<i>KV</i>
<i>Imax</i>	Courant maximal de décharge	<i>KA</i>
<i>F</i>	Niveau d'exposition de la foudre	<i>I</i>
<i>TH.T</i>	Coefficient qui tient compte de type des lignes	<i>I</i>
<i>δ</i>	Coefficient qui tient compte de la situation des lignes	<i>I</i>
<i>AL</i>	Gain en distance d'amorçage	<i>m</i>

ΔT	Gain en temps d'initiation du traceur ascendant	μs
v_{moy}	Vitesse moyenne du traceur descendant	$m/\mu s$
C	Constante qui tient compte de la nature du métal de fabrication des conducteurs	l
s	Section des conducteurs	mm^2
T_{cc}	temps de passage du courant de court-circuit	s

Liste des tableaux

Tableau	Titre du tableau	page
1.01	Principales caractéristiques des coups de foudre.....	25
1.02	Paramètres d'un coup de foudre.....	37
1.03	Hauteur des conducteurs d'une ligne à prendre en compte pour le calcul de leur foudroiement.....	40
2.01	Coefficients kéraunique (N_K).....	51
2.02	Dimensions des organes capteurs de descente des paratonnerres (exemple de Suisse)	57
2.03	Dimension des prises de terre artificielles pour paratonnerres	57
2.04	Courants critiques de foudre.....	64
2.05	Tensions nominales normales des parafoudres.....	74
2.06	Classes des tensions efficaces normales recommandées par la C E I pour des fréquences de services de $(50 \div 60) Hz$	77
2.07	Valeurs des paramètres caractéristiques des parafoudres au carbure de silicium et à éclateur du réseau français de transport d'électricité.....	83
2.08	Exemples des paramètres caractéristiques des parafoudres à oxyde de zinc.....	85
2.09	Distance d'installation des parafoudres à oxyde de zinc sur le réseau de transport d'électricité français.....	87
4.01	Résultats de calcul des pertes par effet de couronne dans les lignes de transport.....	121
4.02	Résultats de calcul des pertes actives et réactives dans chaque ligne de la boucle étudiée.....	123
4.03	Estimation des pertes d'énergie dans les lignes de transport en DA.....	123
5.01	Caractéristiques des parafoudres proposés	130
5.02	Positionnements optimaux des câbles de garde.....	133

Préambule

Dans notre monde industrialisé, la fée électricité comme beaucoup l'appellent et omniprésente.

Issue de diverses sources primaires possible, énergie électrique produite en centrale doit ensuite être acheminée vers les usagés via des lignes électriques de transport et de distribution. Ces lignes souterraines ou aériennes, jouent un rôle aussi fondamental que celui des centres de production.

En amenant sous tension d'usage l'énergie vers les consommateurs, elle augmente la valeur intrinsèque de cette énergie. Ceci justifie les dépenses d'investissement et d'exploitation nécessaires à ce transport et cette distribution.

L'ensemble de ces lignes de transport et de distribution formé un réseau qui un certain nombre de fonction et de comportement qu'il faut définir, mettre en œuvre, maîtriser grâce à une conception et une exploitation convenable, ce sont ensuite des ouvrages et du matériels, lignes aériennes et souterraines, postes, câbles, appareillages, transformateurs, parafoudres, paratonnerres, ... etc.

L'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques ce fait par la protection de ceux-ci contre les différents phénomènes tels que les surtensions de foudre qui se propagent le long d'une ligne électrique subissent une déformation sous l'influence de l'effet couronne, cette atténuation qui superpose à une distorsion par effet de peau (effet pelliculaire) est due à la dissipation supplémentaire d'énergie par injection de charges d'espace autour des conducteurs dès que la tension d'effet couronne est dépassée.

Le présent travail est consacré à l'étude du phénomène de la foudre et l'analyse des différents moyens de protection contre ce phénomène ; qui reste toujours très mystérieux pour la plupart des personnes depuis des décennies, la foudre terrifie de nombreux humains par ses manifestations qui frappent l'imagination, sa lumière aveuglante, sa rapidité et le grondement du tonnerre qui l'accompagne, elle apporte avec elle ; la destruction, la mort et le malheur, elle a été longtemps assimilée au feu de ALLAH.

Au cours des développement des recherches scientifiques et des sociétés industrielles, la connaissance de la foudre a avancé, malgré sa nature commence à être connue de l'homme moderne cultivé, de nombreuses questions continuent à se poser aux chercheurs.

L'objet de notre thème est une contribution à l'amélioration de la protection contre les surcharges atmosphériques. Pour cela nous avons pris le réseau de transport de l'énergie électrique à haute tension (**220 KV**) de l'Est Algérien, autrement dit la boucle : (EL HADJAR - EL KHROUB - SKIKDA - RAMDANE DJAMEL - EL HADJAR).

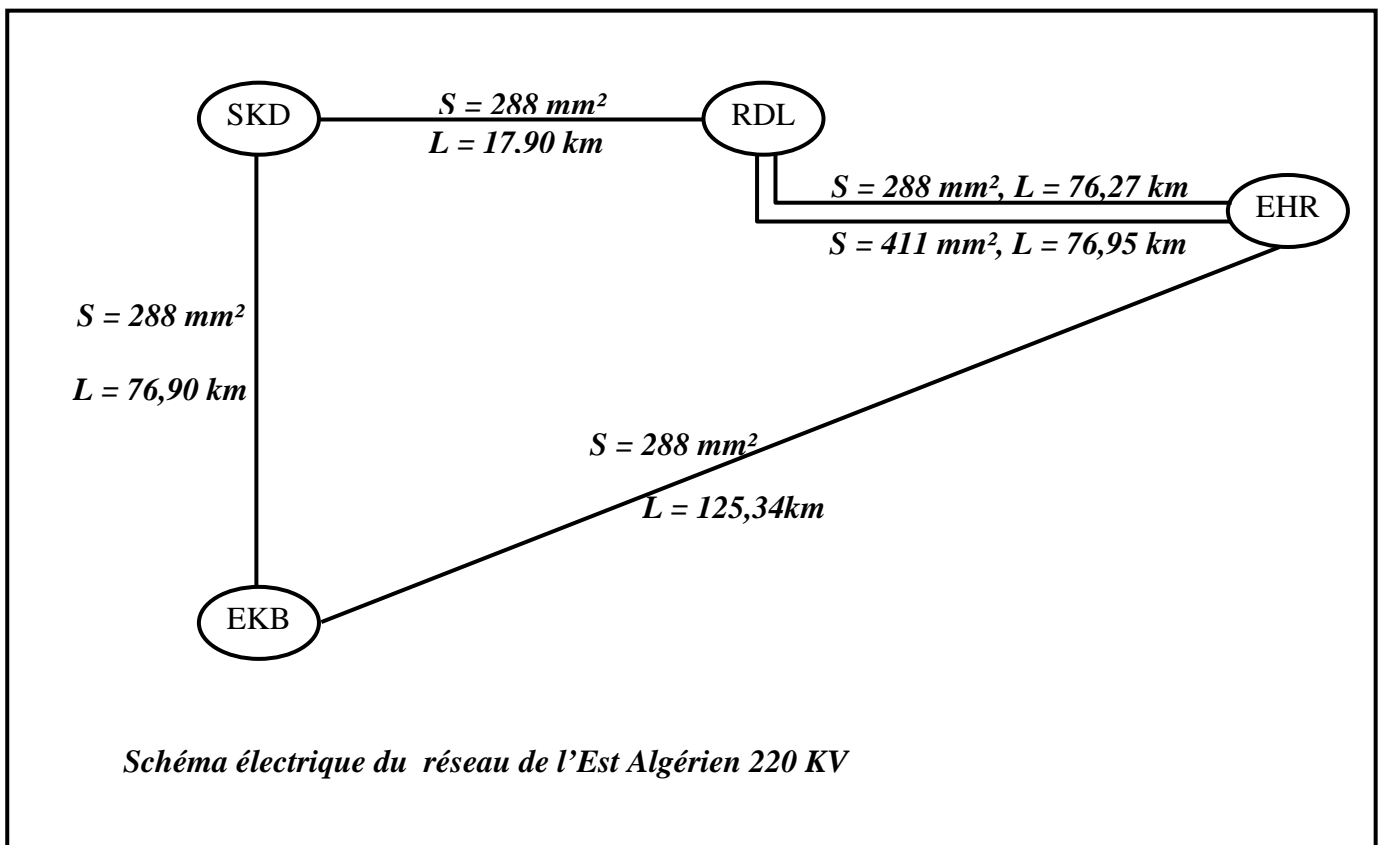
La deuxième priorité de notre travail sera ; la diminution des différentes pertes qui prennent naissance dans une ligne de transport (pertes par effet couronne, et les pertes de puissance active et réactive).

Identification du réseau

Le réseau de l'Est Algérien EL HADJAR - EL KHROUB - SKIKDA - RAMDANE DJAMEL - EL HADJAR ; est un réseau de transport d'énergie électrique de haute tension **220 KV**, avec une section de **288 mm²** pour toutes les lignes et une section de **411 mm²** pour une deuxième ligne entre EL HADJAR et RAMDANE DJAMEL.

Un réseau en voie de réalisation qui lie entre RAMDANE DJAMEL et EL HADJAR avec les données ($S = 411 \text{ mm}^2$, $U = 400 \text{ KV}$).

Ce réseau est représenté par le schéma suivant :



Chapitre

1

Phénoménologie de la foudre

1.1 Introduction

Dans le domaine des réseaux électriques et de la haute tension; toute tension fonction du temps entre un conducteur de phase et la terre ou entre deux conducteurs de phase, dont la ou les valeurs crête dépassent la valeur crête ($U_m \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$), où $U_m \sqrt{2}$ respectivement correspondent à la tension la plus élevée pour le matériel.

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques à plusieurs titres :

- Toute la gamme de puissance et tous les niveaux de tension sont concernés : depuis le transport d'énergie très haute tension (*THT*) jusqu'aux circuits intégrés en passant par les alimentations basse tension (*BT*) et les transmissions de données.
- Elle peut être à l'origine de perturbations momentanées dans la continuité de service, donc de dégradation de la qualité des alimentations.
- Elle peut causer des destructions de matériel et en conséquence de longues interruptions de services des installations.
- Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre).

- Elle génère le phénomène de l'effet couronne qui occasionne des pertes d'énergie considérables.

La foudre a toujours été une cause de perturbation dans l'utilisation de l'électricité ; Mais il faut noter l'exigence assez récente et croissante de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, disponibilité, continuité de service,...etc.) ainsi que le souci permanent de minimiser les coûts de production et d'utilisation d'électricité.

Cela conduit à constater que la foudre est devenue un « point dur » dans l'amélioration de tous ces facteurs.

Une étude des effets de la foudre se déroule généralement en deux étapes, ces deux étapes ont pour objectif :

- Prévoir ce qui peut se passer sur une installation donnée et préconiser des solutions d'amélioration.
- Puis réaliser une étude technico-économique de coordination de l'isolement prenant en compte le coût des installations, de la maintenance et des interruptions de service.

1.2 Origine des surtensions atmosphériques

La foudre est un phénomène naturel dont les effets sont spectaculaires et destructeurs.

Il est important de remarquer que toutes les régions ne sont pas identiquement exposées à ce phénomène : il existe généralement une carte des niveaux kérauniques pour chaque pays pour une détermination plus précise de l'exposition d'un lieu, il faut se référer aux cartes éditées par des sociétés spécialisées dans la détection des orages et des phénomènes associés.

La foudre est liée à la formation de nuages orageux qui, avec le sol, constituent un véritable dipôle.

Le champ électrique au sol peut alors atteindre **20 KV/m** par bonds successifs, un traceur se développe entre le nuage et le sol créant le canal ionisé dans lequel circule l'arc en retour ou coup de foudre (**Fig.1.01**).

En fonction de la polarité du nuage par rapport au sol, il est question de coup négatif (nuage négatif) ou positif (nuage positif), et selon l'origine du traceur, le coup est ascendant ou descendant.

Il a été observé que dans les pays à climat tempéré, la majorité des coups de foudre sont négatifs, mais les plus énergétiques sont les positifs.

Les effets des coups de foudre font l'objet de deux approches :

- Lorsque l'élément étudié est celui qui reçoit la foudre, c'est le cas de coup de foudre direct.
- Lorsque l'élément étudié ne subit que des effets, c'est le coup de foudre indirect.

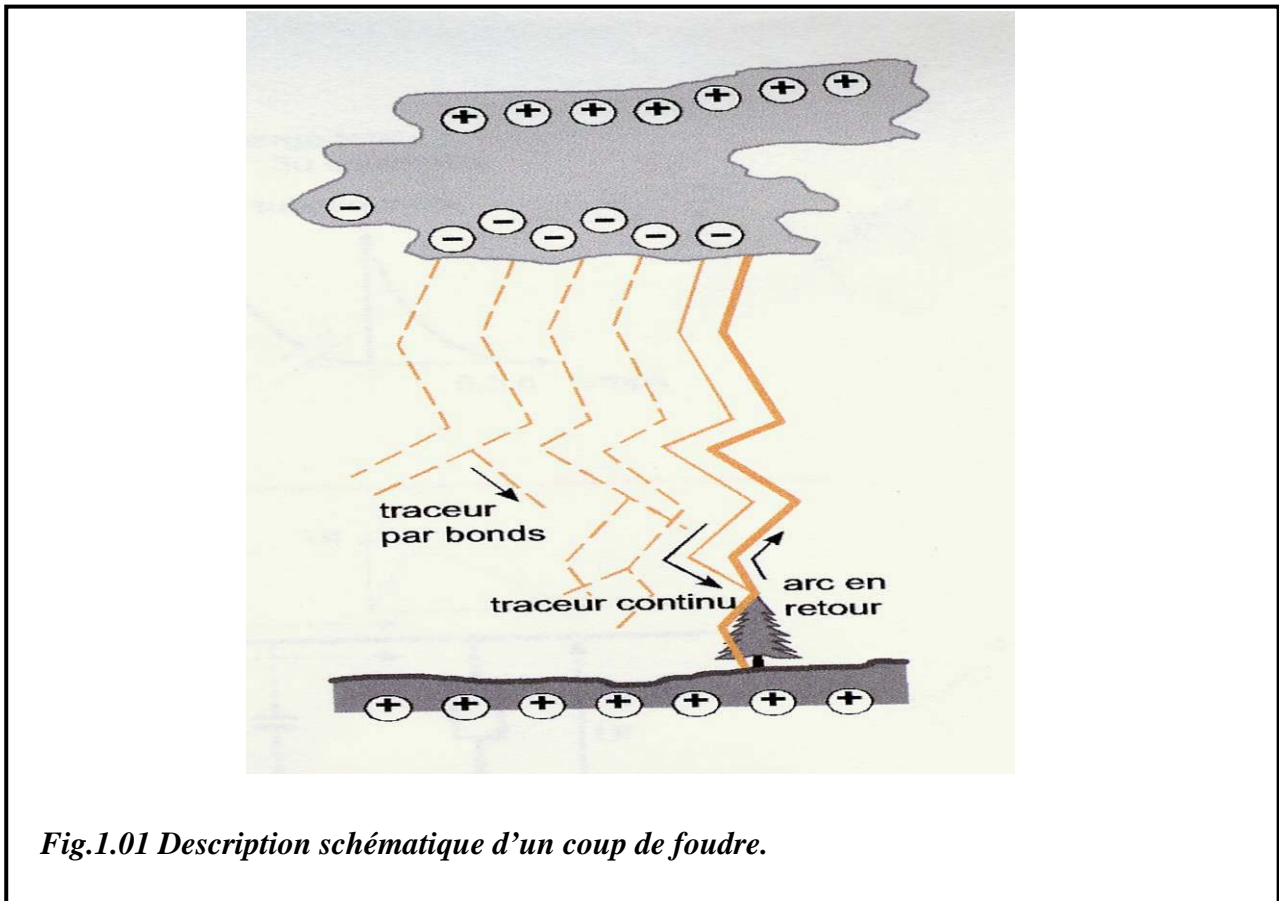


Fig.1.01 Description schématique d'un coup de foudre.

1.2.1 Coup de foudre direct

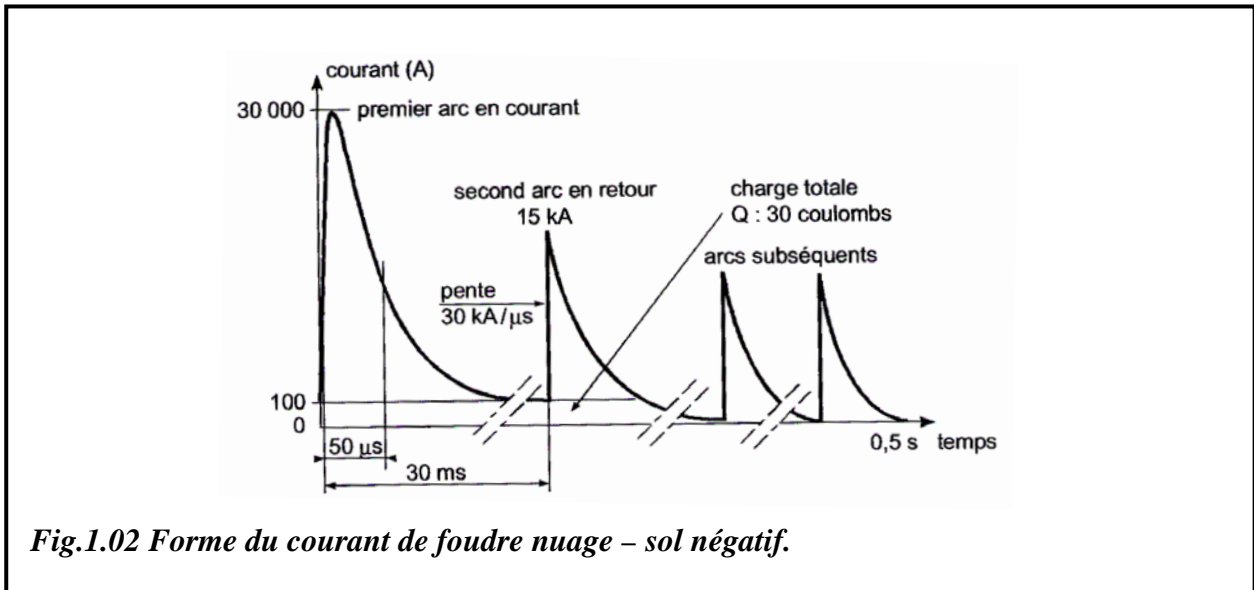
Le coup de foudre direct est celui qui atteint directement les installations électriques (lignes aériennes, postes,...).

Son énergie est importante puisque **50%** des coups de foudre dépassent **25 KA** crêtes et **01%** sont au-delà de **180 KA**. La raideur de ces décharges peut atteindre **100 KA/μs** (Tableau.1.01). [01]

<i>Probabilité de dépassement</i>	<i>Crête de courant</i>	<i>Charge</i>	<i>Pente</i>	$\int i^2 dt$	<i>Durée totale</i>	<i>Nombre de décharge</i>
<i>P (%)</i>	<i>I (KA)</i>	<i>Q (c)</i>	<i>S (KA/μs)</i>	<i>(KA². S)</i>	<i>T (c)</i>	<i>n</i>
50	26	14	48	0,54	0,09	1,8
10	73	70	74	1,9	0,56	5
01	180	330	97	35	2,7	12

Tableau.1.01 Principales caractéristiques des coups de foudres

De plus, un coup de foudre est rarement unique, plusieurs impulsions (décharges) séparées de dizaines de millisecondes sont détectables. (*Fig.1.02*).

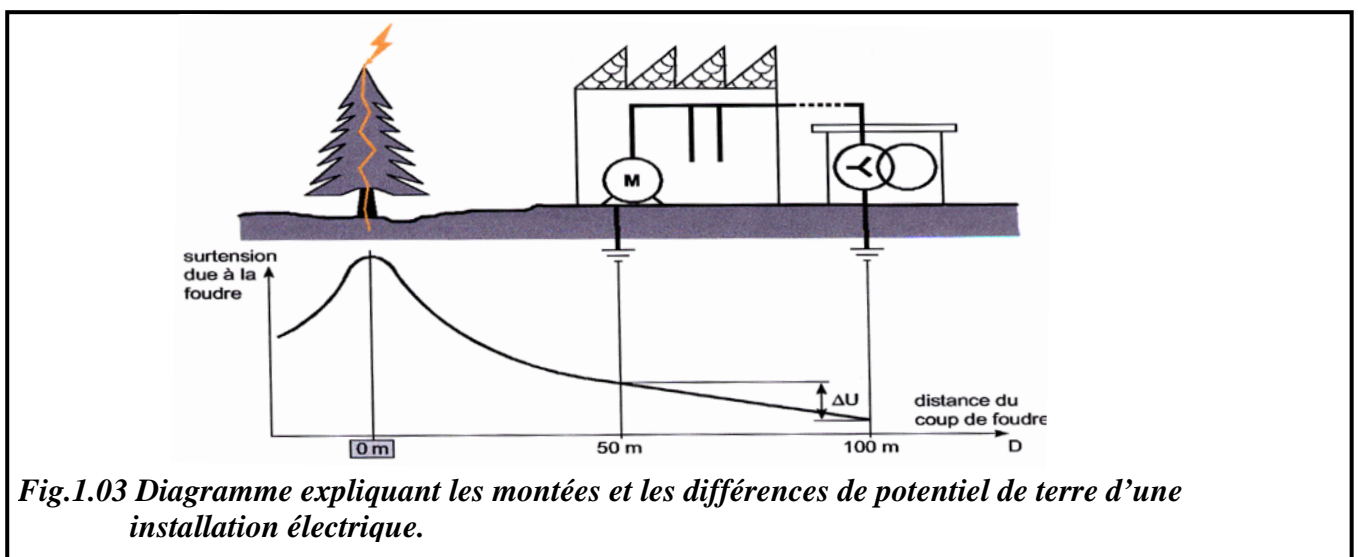


1.2.2 Coup de foudre indirect

C'est la manifestation à distance d'un coup de foudre direct.

Ses effets sont abordés selon trois aspects : les surtensions conduites, l'élévation du potentiel de terre et le rayonnement.

- Des surtensions conduites font suite à un impact sur des lignes aériennes, elles peuvent atteindre plusieurs centaines de Kilovolts.
- Une élévation du potentiel de terre lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol, cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre (*Fig.1.03*).



Ainsi à une distance donnée D du point d'impact de la foudre, le potentiel U s'exprime par l'équation : [01]

$$U = 0,2 \cdot I \cdot \rho_s / D \quad ; \text{KV} \quad (1.01)$$

Avec

I : Courant de foudre.

ρ_s : Résistivité du sol.

En appliquant cette formule au cas de la (*Fig.1.03*) avec :

$$I = 20 \text{ KA}$$

$$\rho_s = 1000 \text{ ohm. m}$$

$$D \text{ neutre} = 100 \text{ m}$$

$$D \text{ installation} = 50 \text{ m}$$

Le potentiel de la prise de terre du neutre atteint **40 KV** ; alors que celui de la prise de terre de l'installation est de **80 KV** soit une différence de potentiel entre les mises à la terre du neutre et de l'installation de **40 KV**.

- Le rayonnement est un autre effet, car un coup de foudre indirect pour produire une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique, qui est à l'origine des tensions induites dans les boucles.

Généralement à proximité des orages, il y'a des tensions induites d'une centaines de volts par mètre carré de boucle.

Les champs électriques associés, rayonnés par l'éclair, peuvent atteindre **50 KV/m**, ils peuvent induire des tensions importantes dans les circuits ouverts qui se comportent comme des antennes, un front très raide et un amortissement rapide caractérisent ces phénomènes.

L'étude statistique des surtensions et surintensités dues à la foudre a conduit à la normalisation des ondes présentées par la figure (*Fig.1.04*) [01].

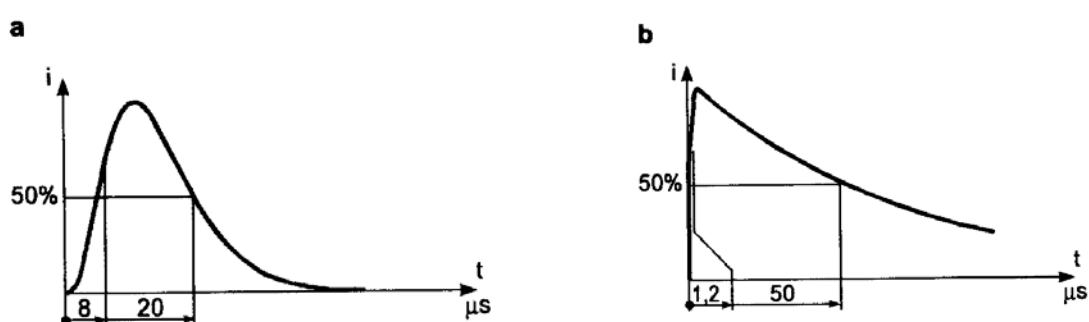


Fig.1.04 Forme des ondes de foudre normalisées .

a : Onde 8/20 µs dite de courant.

b : Onde 1,2/50 µs dite de tension.

1.3 Phénomène de foudre

La terre et l'électrosphère, zone conductrice de l'atmosphère (épaisseur de l'onde de **50 à 100 Km**), constituent un condensateur sphérique naturel qui se charge par ionisation, d'où un champ électrique dirigé vers le sol de l'ordre de quelques centaines de volts/mètre.

L'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent associé, de l'ordre de **1500 A** pour tout le globe terrestre. L'équilibre électrique est assuré lors des décharges par pointes, par pluies et coups de foudre). [02]

1.3.1 Les manifestations de la foudre

1.3.1.1 L'éclair et le tonnerre

La foudre est une manifestation de l'électricité d'origine atmosphérique, comportant une décharge accompagnée d'une vive lumière (éclair) et d'une violente détonation (tonnerre).

Le terme d'éclair représente l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges électriques d'origines atmosphériques.

Le tonnerre est le bruit induit par la décharge électrique (entre deux nuages, entre la base d'un nuage et le sol, ou à l'intérieur d'un même nuage).

La vitesse de la lumière étant **300 000 Km/s**, l'éclair est perçu au moment où il se produit, en revanche, le son se propageant à **340 m/s** seulement, le tonnerre est perçu sensiblement après l'éclair.

Le nombre N de secondes qui s'écoulent entre ces deux phénomènes permet d'estimer la distance D_{obs} en mètre qui sépare l'observation de la décharge orageuse grâce à la formule suivante : [03].

$$D_{obs} = 340 N \quad ; \quad m \quad (1.02)$$

Les recherches expérimentales [04], montre que les éclairs présentent simultanément des ramifications positives et négatives qui assurent la neutralisation des charges électriques coexistant à l'intérieur du nuage (*Fig.1.05*). Parmi ces décharges, certaines sont susceptibles d'atteindre le sol, la probabilité d'obtenir un coup de foudre négatif est nettement plus importante (**70 — 90 %**) que celle d'obtenir un coup de foudre positif (**10 — 30 %**).

La première phase d'un coup de foudre est toujours le développement d'un système de précurseurs, traceurs ou leaders, prédécharges faiblement lumineuses, de vitesse de propagation de l'ordre du **1/1000^{ième}** de la vitesse de la lumière, on a pour habitude de classer les coups de foudre selon le sens de développement du traceur principal (descendant ou ascendant) et suivant la polarité de décharges écoulées.

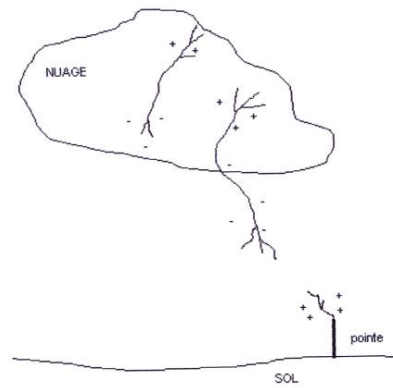


Fig.1.05 Phénomène du coup de foudre

Quelques statistiques de l'éclair

Il y a environ 20 millions d'orage par an. (50 milles par jour).

Diamètre d'un orage : 15 à 25 km.

Extension verticale 10,12 ou 15 km.

Durée 1 ou 2 heures (ou plus si bien violent).

A tout moment, 100 éclaires frappent la surface terrestre : total annuel mondial est de 32 millions éclaires.[09]

1.3.1.2 Conditions d'occurrence

La foudre est une des manifestations des orages, perturbations atmosphériques violentes, accompagnée d'éclairs, de tonnerres, de rafales de vent, d'averses de pluie ou de grêle.

La naissance de ces phénomènes orageux est généralement subordonnée à une grande instabilité atmosphérique, soit à des différences importantes de température entre l'air au niveau du sol et l'air en altitude. Ceci explique pourquoi les orages « électriques » sont plus, généralement observés en été qu'en hiver où cette différence de température peut ne pas être suffisante pour générer une grande stabilité. [03]

Il existe deux types de nuages orageux :

- les cumulo-nimbus, qui donnent lieu aux orages de chaleur, très localisés et de durée limitée.
- Les orages frontaux ou lignes de grains.

Dans ces deux cas, les nuages sont le siège de charges électriques et peuvent ainsi être à l'origine du phénomène de foudre.

Le cumulo-nimbus est une masse puissante de nuages sombres, en forme de double enclume à grand développement vertical (*300 à 15000 m* d'altitude) et s'étendant sur une surface de plusieurs *Km²*.

Le volume d'eau du nuage orageux peut atteindre *50 Km³*.

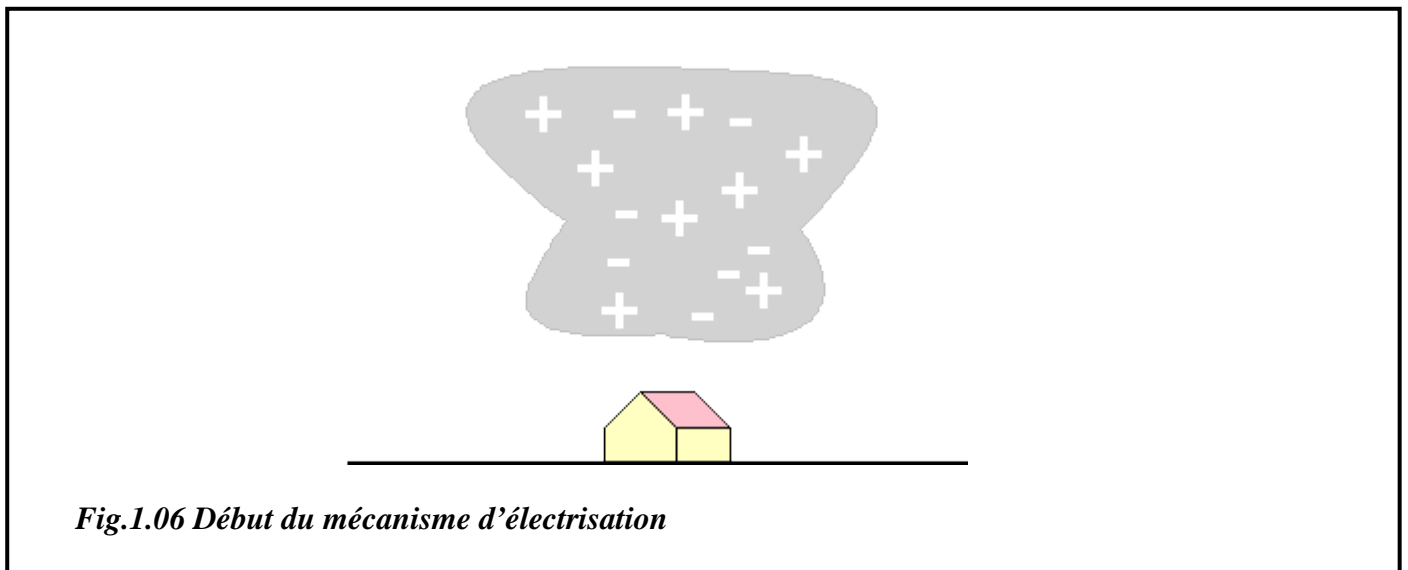
1.3.2 Formation d'un nuage orageux

Un nuage orageux est généralement du type cumulo-nimbus, s'étant sur plusieurs kilomètres carrés et se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de *15 kilomètres*. Comme cela a été évoqué, la formation de ce type de nuages est généralement liée à une grande instabilité atmosphérique, caractérisée par des différences de températures importantes entre les masses d'air au niveau du sol et les masses d'air en altitude. Cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage.

1.3.2.1 Début du mécanisme d'électrification

Les violents courants d'air ascendants et descendants entraînent des collisions entre les particules d'eau et les cristaux de glace, provoquant ainsi la création de charges positives et négatives.

(Fig.1.06). [05]



1.3.2.2 Début de la phase active

Les charges de signe opposé se séparent. Les charges positives se situent dans la partie supérieure, alors que les charges négatives se situent dans la partie inférieure du nuage. Une petite quantité de charges positives demeure à la base du nuage. Les premiers éclairs intra - nuages apparaissent.

(Fig.1.07). [05]

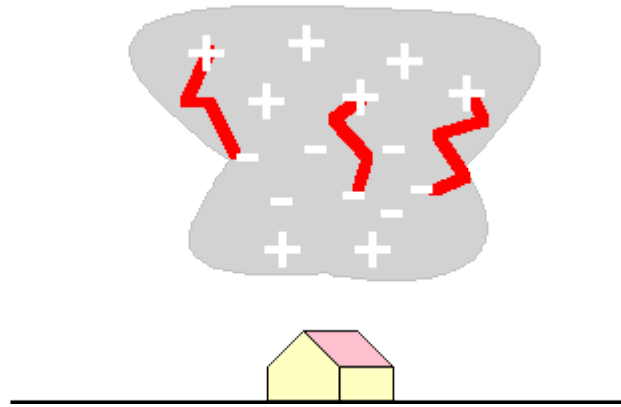


Fig.1.07 Début de la phase active

1.3.2.3 Maturité de la phase active

Ce nuage forme un énorme condensateur avec le sol. Après les premiers éclairs intra - nuages, des éclairs se forment entre le nuage et le sol (coup de foudre), les premières pluies apparaissent.

(Fig.1.08). [05]

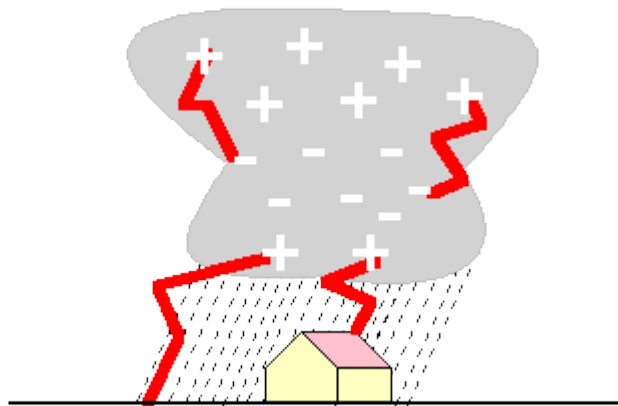


Fig. 1.08 Maturité de la phase active

1.3.2.4 Fin de la phase active

L'activité du nuage diminue tandis que le foudroiement du sol s'intensifie. Il s'accompagne de fortes précipitations et de rafales de vent.

C'est la phase d'effondrement du nuage.

1.3.3 Classification des coups de foudre

Les aspérités du sol ou des structures créent un « effet de pointe » qui amplifie de façon très importante le champ électrique local.

Cette augmentation du champ électrique au sol se traduit par une ionisation locale de l'air (effet « corona »). Ce phénomène est observé depuis longtemps et est ainsi connu sous l'appellation « feu de saint – Elme ». Un canal d'air ionisé reliant le nuage au sol est alors susceptible de se créer et de permettre l'écoulement d'un courant de foudre de forte intensité. [03]

Les coups de foudre sont classés selon :

- la partie positive ou négative du nuage qui se décharge.
- Le sens de formation du traceur qui se développe entre le nuage et le sol. Ce traceur crée un canal ionisé dans lequel circule l'arc. Selon l'origine du traceur, le coup de foudre sera ascendant ou descendant (*Fig.1.09*). [05]

1.3.3.1 Le coup négatif

Lorsque la partie négative du nuage se décharge (**80 %** des cas dans les pays tempérés), le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées : à une première décharge partielle de durée de front de **10 à 15 μ s** succèdent des décharges d'attaque plus raides et de descente plus douce.

1.3.3.2 Le coup positif

Lorsque la partie positive du nuage se décharge, le bas du nuage est chargé positivement, une seule décharge apparaît durant de **0,1 s à 0,2 s**. La durée d'attaque varie entre **20 μ s** et **50 μ s** et l'amplitude du courant des « coups positifs » est généralement supérieure à celle des « coups négatifs », c.à.d cette amplitude de courant peut atteindre de très fortes valeurs supérieures à **100 KA**. [03]. Sur (*Fig.1.09*) on représente quelques formes de courant de foudre. [05]

1.3.3.3 Le coup descendant

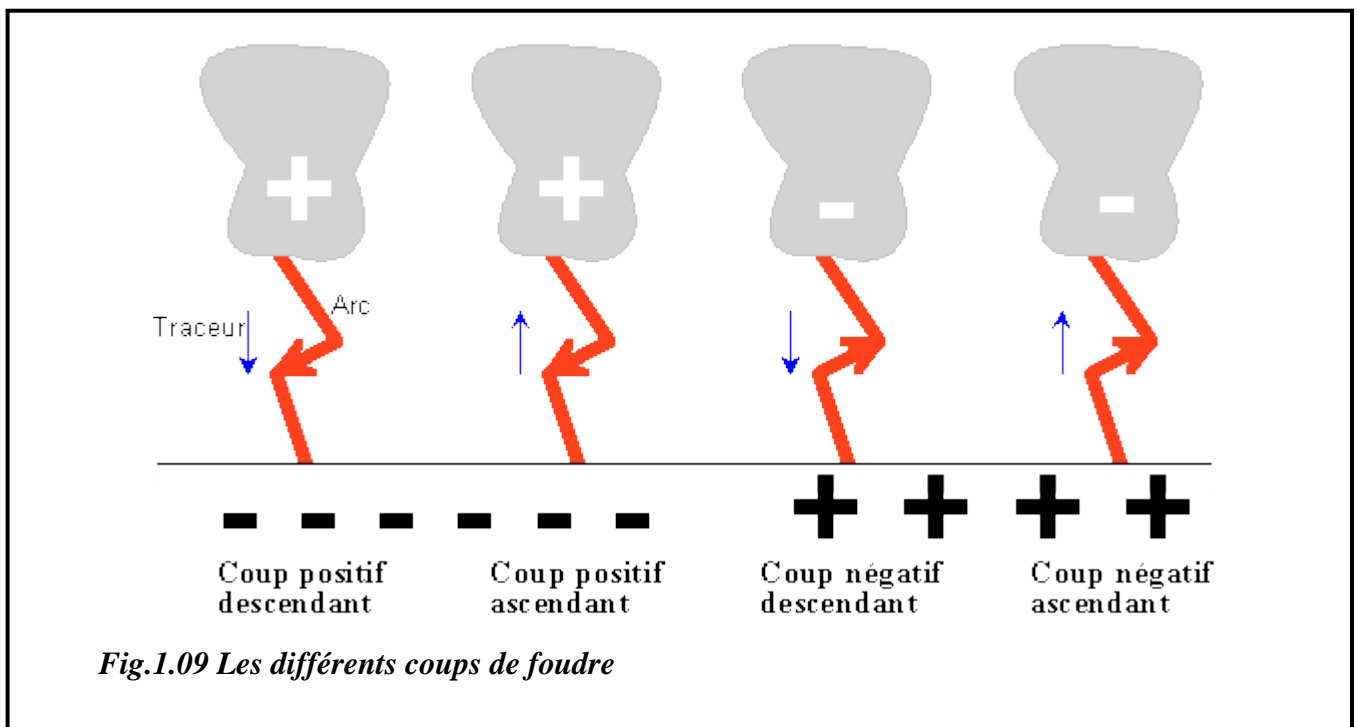
Développement du traceur depuis les nuages vers le sol (cas sur terrains assez plats). Il est caractérisé par son arborescence ouverte vers le bas, c'est le plus fréquent. Il comporte une phase initiale où une prédécharge se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (*traceur*). A l'extrémité de ce traceur, le champ électrique est extrêmement élevé, ce qui augmente localement de champ au sol.

Dès que la pointe du traceur approche du sol, des prés - décharges ascendantes vont se développer à partir du sol. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité. (*Fig.1.09*). [03]

1.3.3.4 Le coup ascendant

Développement du traceur depuis le sol vers le nuage (cas de terrains montagneux). Il est caractérisé par une arborescence ouverte vers le haut. Dans le cas de pylône de grandes hauteurs ou de tours, l'effet couronne peut créer une décharge (partant donc du sol) qui va développer suffisamment loin pour atteindre le nuage.

Dès qu'un canal conducteur est créé, les charges cumulées dans le nuage vont s'écouler au sol. Le coup de foudre ascendant est très fréquent en zones de montagnes. (*Fig.1.09*)



Il a été observé que dans les pays à climat tempéré, la majorité des coups de foudre sont de type négatif descendant. En montagne ou en présence d'une proéminence, des coups négatifs ascendants peuvent se développer.

1.3.4 Description de coup de foudre négatif

Le coup de foudre négatif descendant en France représente **90 %** des coups de foudre, l'amplitude du courant peut être très forte variant de **2 000 à 200 000 A**.

Le principe de la décharge d'un coup de foudre négatif descendant (*Fig.1.10*) est le suivant :

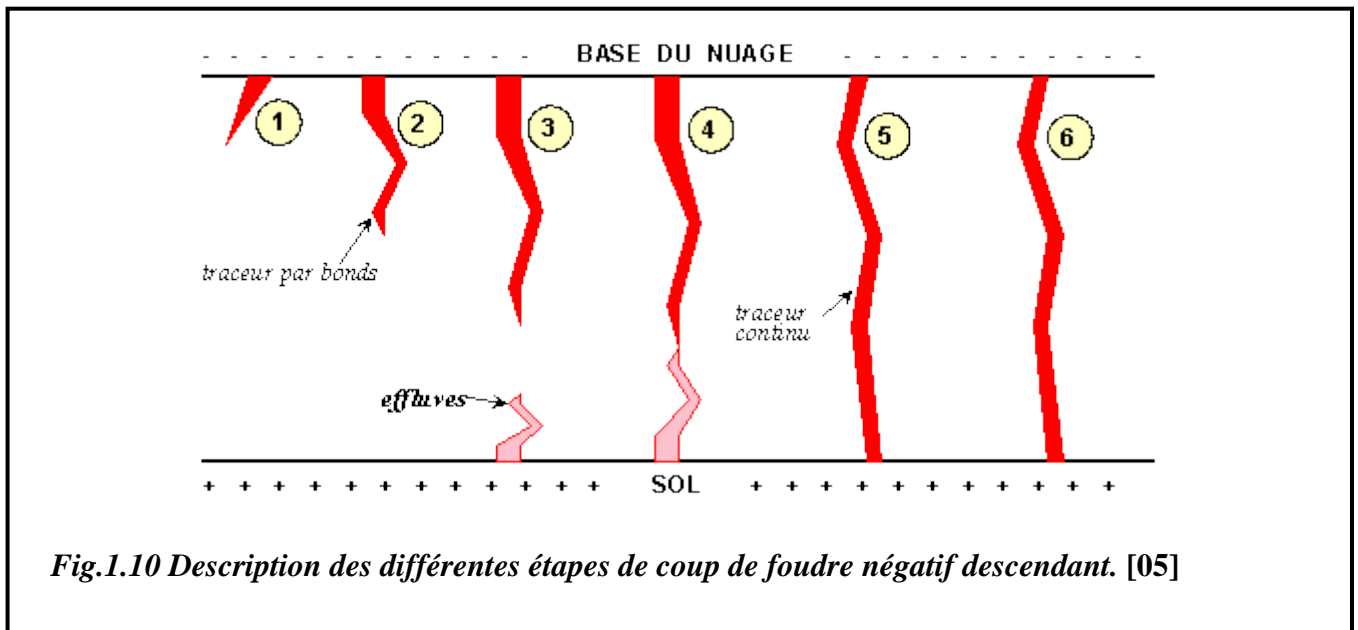


Fig.1.10 Description des différentes étapes de coup de foudre négatif descendant. [05]

- ① Un traceur se développe à partir du nuage.
- ② Ce traceur progresse par bonds vers le sol, il est constitué des particules électriques arrachés aux nuages par le champ électrique nuage – sol, ces particules forment un canal lumineux qui se dirige vers le sol.
- ③ Lorsque le traceur arrive à proximité du sol, les effluves (étincelles) partent du sol.
- ④ Les effluves entrent en contact avec la pointe du traceur.
- ⑤ Un arc électrique circule dans le canal ionisé créé par le traceur, cet arc très lumineux permet l'échange des charges électriques entre le nuage et le sol. Le traceur ne progresse plus et devient continu, l'onde de choc se transforme en onde sonore (le tonnerre).
- ⑥ Une succession d'arcs de moins en moins intenses suivra. Entre ces arcs, le traceur continu subsiste laissant circuler un courant. [03]

1.3.5 Principales caractéristiques des coups de foudre

Les coups de foudre sont caractérisés par :

1.3.5.1 Forme d'onde

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps.

La forme d'onde réelle est très variable : elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microsecondes à **20** microsecondes suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes). (Fig.1.11). [02]

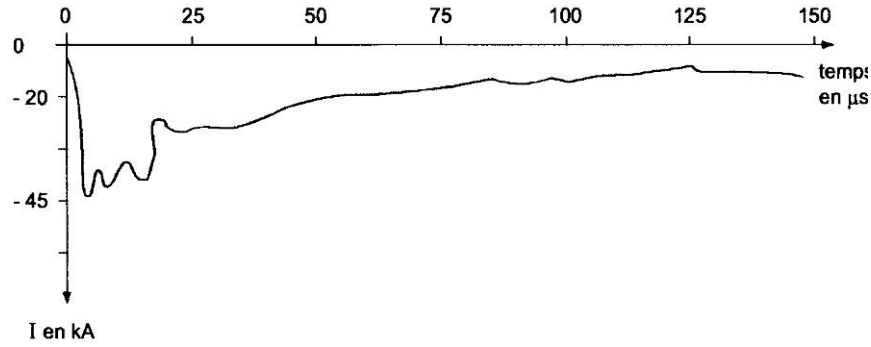


Fig.1.11 Oscillogramme d'un courant de foudre

1.3.5.2 Amplitude des coups de foudre

La distribution statistique expérimentale des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée par la figure (*Fig.1.12*). [02]

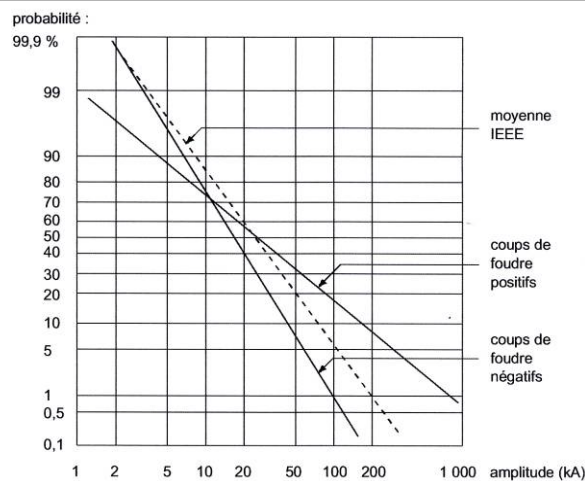


Fig.1.12 Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, selon I E E E.

1.3.5.3 Raideur de front

La distribution en raideur de front des coups de foudre est donnée par (*Fig.1.13*).

Pour les études de foudre, les valeurs suivantes sont en général choisies : [02]

- Amplitudes **100 KA** ou **200 KA** auxquelles est associées respectivement une probabilité de dépassement de **5 %** et **1 %**.
- Forme d'onde triangulaire : temps de montée **2 µs** et temps de descente à mi-queue **50 µs**, d'où un front de **50** ou **100 KA/µs**.

Ce temps de front est différent de celui de l'onde normalisé ($1,2 \mu\text{s}$) défini pour les essais en laboratoire (*CEI – 60*).

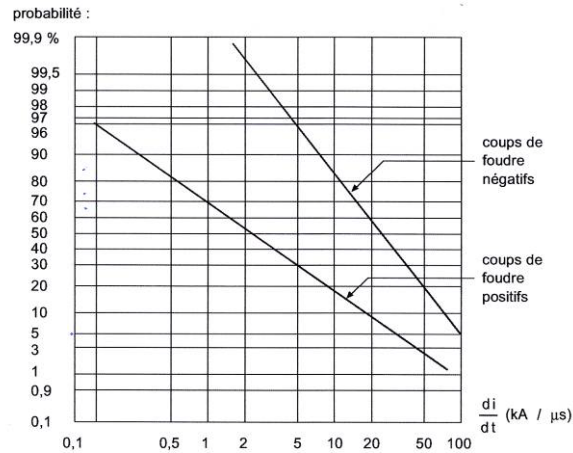


Fig.1.13 Distribution statistique expérimentale, en raideur de front, des courants de foudre positifs et négatifs, suivant I E E E

1.3.5.4 Charge des coups de foudre

En moyenne, cette charge est de quelques dizaines de coulombs mais elle peut dépasser **300 C**. [02]

1.3.5.5 Caractéristiques des différents coups de foudre

Un coup de foudre est composé en général de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé.

Les paramètres d'un coup de foudre sont représentés sur (*Tableau.1.02*) :

- L'amplitude d'un coup subséquent est généralement plus faible que l'amplitude d'un premier coup de foudre négatif. Par ailleurs, l'amplitude d'un coup de foudre positif (on rappelle qu'un coup de foudre positif est unique) est généralement plus forte que celle d'un coup de foudre négatif même pour ce qui concerne le premier coup.
- Si l'amplitude des coups subséquents associés aux coups de foudres négatifs est inférieure à celle du premier arc de retour, leurs temps de montée sont beaucoup plus rapides, comme le montrent les valeurs de raideurs maximales plus élevées. Les temps de montée d'un coup positif sont quant à eux significativement plus longs.
- Tout comme l'amplitude, l'énergie spécifique d'un coup de foudre va en décroissance selon qu'il s'agit d'un coup positif, d'un premier arc de foudre négatif, d'un coup subséquent.
- La charge totale associée à une décharge négative est généralement plus faible que celle associée à une décharge positive.

- La durée totale d'un coup de foudre positif est souvent plus importante que celle d'un coup de foudre négatif. (*Tableau.1.02*)

<i>Paramètres</i>	<i>Unité</i>	<i>Probabilité</i>		
<i>Amplitude</i>		95 %	50 %	05 %
<i>Premier coup</i>	<i>KA</i>	7	33	85
<i>Coup subséquent</i>		4,6	12	30
<i>Coup positif</i>		4,6	35	250
<i>Raïder max</i>		95 %	50 %	05 %
<i>Premier coup</i>	<i>KA/μs</i>	9,1	24	65
<i>Coup subséquent</i>		10	40	162
<i>Coup positif</i>		0,2	2,4	32
<i>Energie spécifique</i>		95 %	50 %	05 %
<i>Premier coup</i>	<i>A²s</i>	$6,0 \cdot 10^3$	$5,5 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^5$
<i>Coup subséquent</i>		$5,5 \cdot 10^2$	$6,0 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^4$
<i>Coup positif</i>		$2,5 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^7$
<i>Charge totale</i>		95 %	50 %	05 %
<i>Décharge négative</i>	<i>C</i>	1,3	7,5	40
<i>Décharge positive</i>		20	80	350
<i>Durée totale</i>		95 %	50 %	05 %
<i>Décharge négative</i>	<i>ms</i>	0,15	13	1100
<i>Décharge positive</i>		14	85	500

Tableau.1.02 Paramètres d'un coup de foudre. [03]

1.3.6 Prédiction de la foudre

En France l'implantation d'un réseau de localisation des décharges orageuses date de **1986** avec la création de **Météorage**.

Météorage exploite un réseau de stations de détection réparties sur l'ensemble du territoire national et reliées aux calculateurs d'un centre opérationnel basé à Paris.

Ces stations distantes de **200 à 300 Km** mesurent les ondes électromagnétiques créées par les décharges orageuses (sensibilité **800 Km**).

Elles permettent d'établir une caractérisation des orages à partir des informations suivantes :

- Localisation.

- Datation à la milliseconde.
- Polarité d'onde (> 0 , $0 <$).
- Amplitude d'onde (0 , à plusieurs centaines de **KA**).
- Nombre d'arcs. [02]

Météorage offre différents services qui intéressent des applications très diverses, en particulier le transport et la distribution de l'énergie électrique.

Quelques exemples parmi ces prestations :

- Alerte ;
- Signalisation ;
- Observation ;
- Surveillance ;
- Expertise ;
- Qualification ;
- Consultation ;
- Interrogation ;
- Statistique.

1.3.7 Mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique

Le mécanisme d'impact de la foudre se déroule de la façon suivante :

- 1- Un traceur issu d'un nuage se rapproche du sol à faible vitesse ; lorsque le champ électrique est suffisamment, une conduction brutale s'établit donnant lieu à la décharge de foudre.
- 2- Une approche pratique expérimentale a permis d'établir la relation qui lie la distance entre les points d'amorçage et de décharge d'un canal de foudre à l'intensité I du coup de foudre : [02]

$$d = 9,4 \cdot I^{2/3} ; m \quad , \quad \text{ou} \quad d = 6,7 I^{0,8} ; m \quad (1.03)$$

Selon les auteurs, avec :

d : Distance d'amorçage en mètre (striking distance).

I : Courant de foudre en **KA**.

- 3- Le modèle électrogéométrique est alors développé tel celui appliqué à une tige verticale donnée par ci-après (**Fig.1.14**).

Soit une tige verticale de hauteur $h_{t,v}$ et de sommet H , les zones définies dans l'espace sont les suivantes :

- Zone I , entre le sol et la parabole P , lieu des points équidistants de H et du sol : à l'instant d'amorçage, tout traceur étant dans cette zone touchera le sol puisque plus près de celui-ci que H .

- Zone 2, au dessus de la parabole : à l'instant d'amorçage, tout traceur étant dans cette zone sera capté par H dès que la distance H au traceur est inférieure à la distance d'amorçage d .

Pour un courant d'intensité donnée I , donc de distance d'amorçage définie, la distance à la tige X , dite rayon de capture, est :

$$\text{Si } d > h_{t,v} \Rightarrow X = \sqrt{2 \cdot d \cdot h_{t,v} - h_{t,v}^2} \quad (1.04)$$

$$\text{Si } d < h_{t,v} \Rightarrow X = d \quad (1.05)$$

Le rayon de capture de la tige est d'autant plus grand que le coup de foudre est intense.

Pour de très faible intensité, le rayon de capture devient inférieur à la hauteur de la tige qui peut alors devenir captatrice sur sa longueur, ce qui est vérifié expérimentalement.

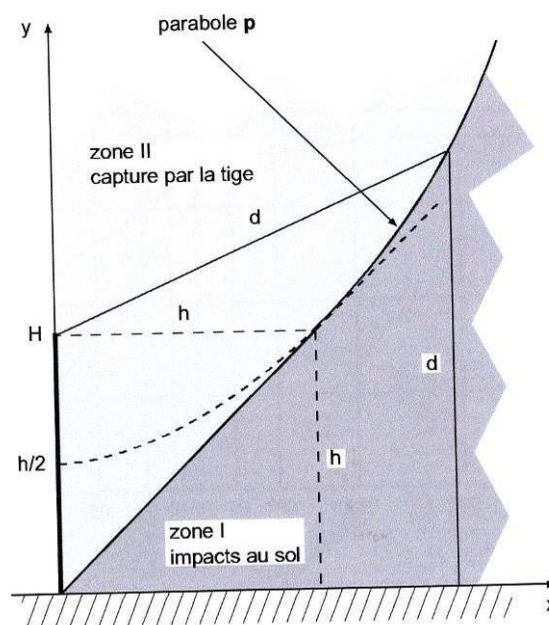


Fig.1.14 Représentation des différentes zones de protection offerte par une tige verticale. [02]

1.4 Distribution des amplitudes des courants de foudre

Après des expériences et des essais de longues durées et les résultats obtenus à la station de MONSON SALVATORE en suisse, l'amplitude des courants de foudre s'étend de **5 à 300 KA** selon une distribution approximativement log normal (Fig.1.15), il convient de noter que ces distributions ont été obtenus en captant la foudre sur des objets de grandes hauteurs, ainsi la valeur moyenne de l'intensité obtenue à partir des données mondiales est de **25 KA**, la valeur moyenne pour les coups au sol est de l'ordre de **8 KA**. [06]

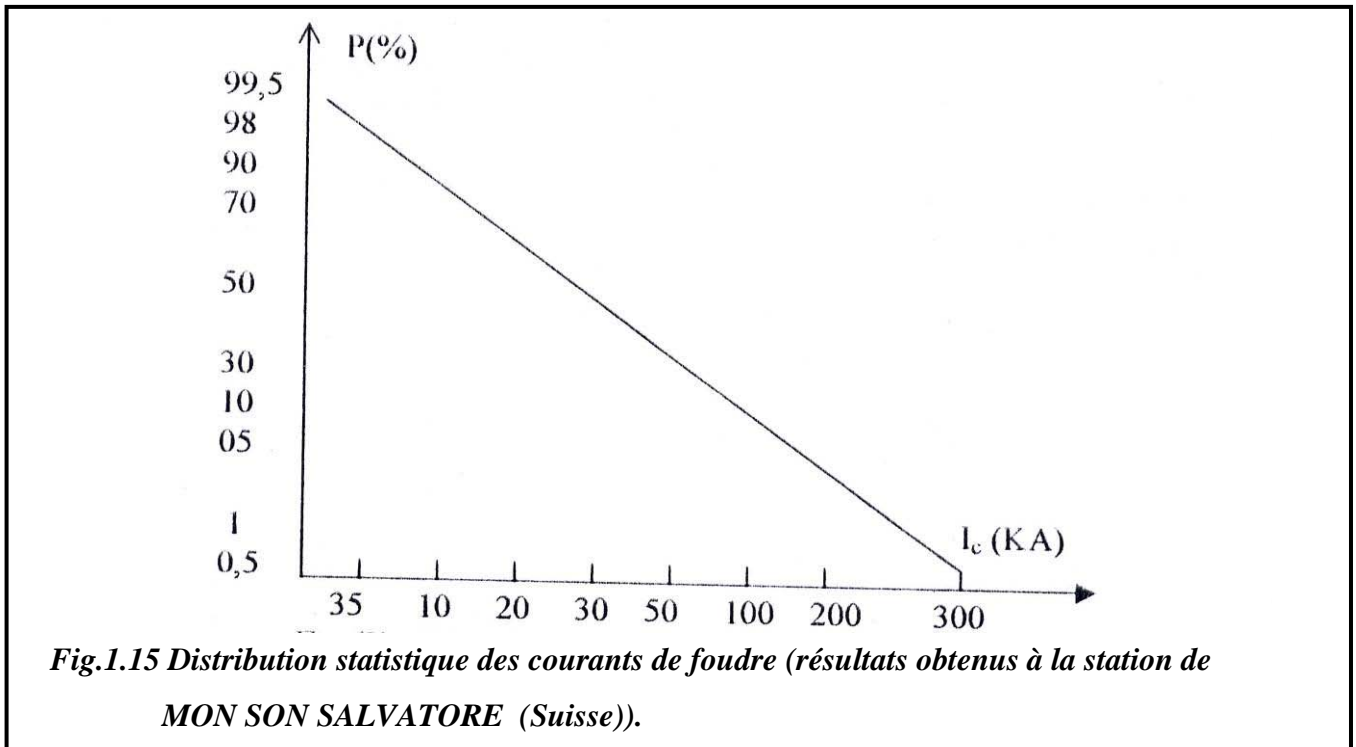


Fig.1.15 Distribution statistique des courants de foudre (résultats obtenus à la station de MON SON SALVATORE (Suisse)).

1.5 Fréquence de foudroiement d'une ligne

La fréquence de foudroiement d'une ligne dépend de la sévérité orageuse des régions traversées, de la hauteur des conducteurs au sol et de la largeur de la ligne :

- Le niveau kéraunique N_K exprime la sévérité orageuse qu'est le nombre de jours orageux par an où l'on entend de tonnerre en un lieu du territoire.
- La hauteur des conducteurs au dessus du sol est prise égale à la hauteur moyenne indiquée dans le tableau (Tableau.1.03). [07]

<i>Nature de la ligne</i> <i>Nature du terrain</i>	<i>Avec câble de garde</i>	<i>Sans câble</i>
<i>Plat</i>	$h = (h_p - \frac{2}{3} S_g)$	$h = (Y_p - \frac{2}{3} S_c)$
<i>Vallonné</i>	$h = h_p$	$h = Y_p$
<i>Montagneux</i>	$h = 2h_p$	$h = 2Y_p$

Tableau.1.03 Hauteur des conducteurs d'une ligne à prendre en compte pour le calcul de leur foudroiement.

Dans ce tableau :

h : Est la hauteur des conducteur au dessus du sol

h_p : Est la hauteur des pylônes

Y_p : Est la hauteur des conducteurs de phase à leur point d'accrochage au pylône

S_g et S_c : Respectivement les flèches des câbles de garde et des conducteurs de phase

➤ Dans le cas d'une ligne réelle, qui comporte plusieurs conducteurs, il faut en outre considérer la largeur l de la ligne qu'est pratiquement la distance interne entre les phases extrêmes.

La fréquence N_f du foudroiement d'une ligne exprime en nombre de coups de foudre par **100 Km** et par **an** reçu par un fil horizontal à la hauteur H en **m** (**Fig.1.16**) est normalisée mondialement par la formule empirique suivante : [07]

$$N_f = N_K (h/30 + l/70) \cdot \alpha \cdot (L/100) \quad (1.06)$$

Où :

N_f : Fréquence de foudroiement de la ligne ;

N_K : Niveau kéraunique pendéré de la région traversée ;

l : La largeur de la ligne en (**m**) ;

h : La hauteur des conducteurs au dessus du sol ;

L : La longueur de la ligne en (**Km**) ;

α : Facteur d'influence des pylônes avec :

$\alpha = 1,65$ pour une ligne sans câble de garde ;

$\alpha = 1,40$ pour une ligne avec **1** câble de garde ;

$\alpha = 1,20$ pour une ligne avec **2** câbles de garde ;

$\alpha = 1,05$ pour une ligne avec **3** câbles de garde.

Remarque : On rencontre souvent dans la littérature la relation empirique [07]

$$N_f = (N_K / 4) \cdot h_p^{0,35} \cdot (L/100) \quad ; \quad (1.07)$$

Où :

h_p : Est ici la hauteur hors tout des pylônes, mais cette formule a été établie pour des lignes étroites (double drapeau en général).

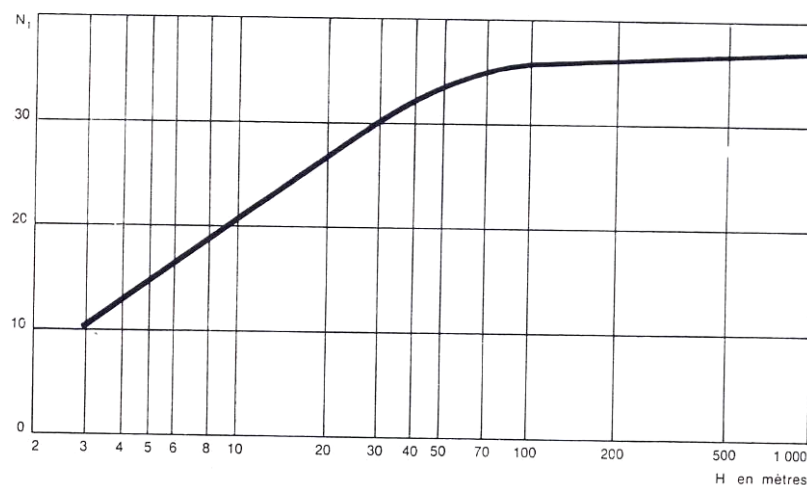


Fig.1.16 Fréquence de foudroiement d'un conducteur horizontal au dessus du sol
 Courbe donnée pour $L = 100$ Km et $N_K = 4$ coups/Km²/an.

1.6 Contraintes appliquées à une ligne touchée par un coup de foudre

1.6.1 Coup de foudre sur les conducteurs de phases (sans câble de garde)

Du point de vue de l'électrotechnicien, on admettra que le canal de foudre (steeped leader) est un générateur de courant à forte impédance interne, qui injecte le courant de foudre dans le point d'impact.

Lorsque le coup de foudre tombe sur les conducteurs de phase d'une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage le long des conducteurs. Il entraîne avec lui une onde de tension, [07] dont la valeur en première approximativement est donnée par :

$$U(t) = Z \cdot i(t) / 2 \quad ; \quad V \quad (1.08)$$

Avec :

Z : Impédance d'onde du conducteur touché. La figure (Fig.1.17) illustre ce comportement. [02]

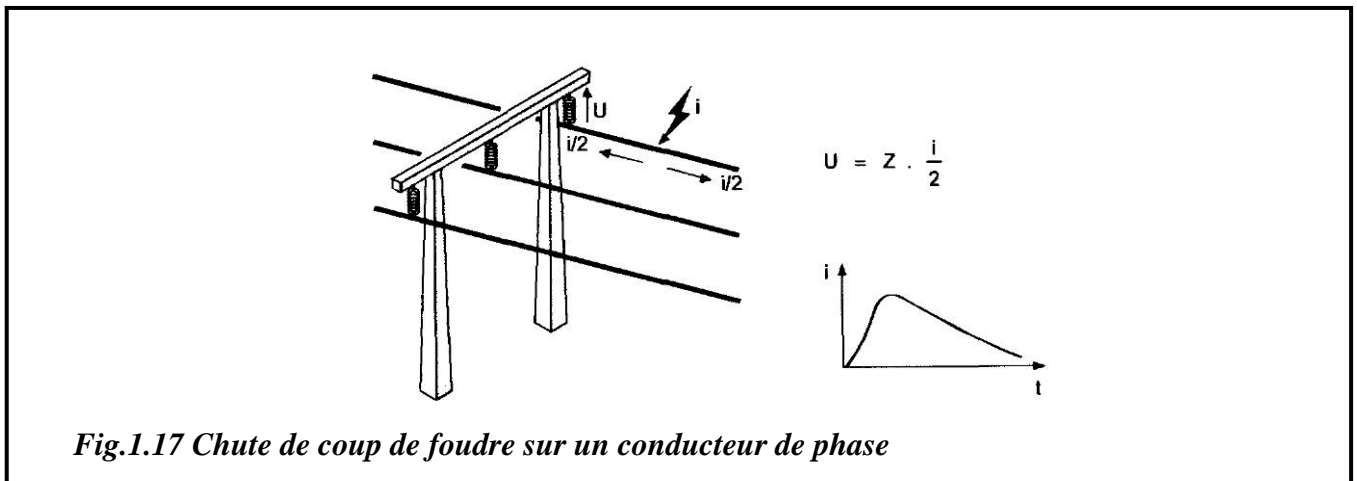


Fig.1.17 Chute de coup de foudre sur un conducteur de phase

En un point donné de la ligne, par exemple au premier pylône rencontré par l'onde, la tension croît jusqu'à ce que se produise l'amorçage de la distance d'isolement, ici la chaîne d'isolateurs, ou jusqu'à atteindre sa valeur maximale I .

L'onde de tension qui continue la propagation sera donc :

- Soit une onde pleine si : $U(t) = (Z \cdot i / 2) <$ tension d'amorçage au pylône U_F .
- Soit une onde coupée si : $U(t) = (Z \cdot i / 2) \geq$ tension d'amorçage au pylône U_F .

1.6.2 Coup de foudre sur un pylône ou sur un câble de garde (l'amorçage en retour)

L'amorçage de la ligne lors d'un coup de foudre direct sur les conducteurs actifs pouvant être considéré comme certain, on cherche à s'en protéger en plaçant au –dessus de ces conducteurs actifs

des câbles de garde, reliés électriquement à la terre et qui ont pour fonction de traîner les coups de foudre vers eux.

Lorsque la foudre tombe directement sur un support métallique, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel des structures métalliques.

La tension apparaissant aux bornes de la chaîne d'isolateurs dépend alors de la résistance R (en onde raide) de la prise de terre, et du couplage électromagnétique entre le circuit emprunté par le courant de la foudre et le conducteur de phase considéré.

On se contente souvent d'évaluer la montée en potentiel de la tête de pylône, en exprimant le couplage de façon simple par la self-inductance L du pylône, de sorte que la contrainte appliquée à la chaîne s'écrira : [02], [08]

$$U(t) = K [R \cdot i(t) + (L \cdot di/dt)] \quad ; \quad V \quad (1.09)$$

Avec :

K : Est la fraction du courant s'écoulant par un pylône.

Ce comportement est illustré par (Fig.1.18). [02]

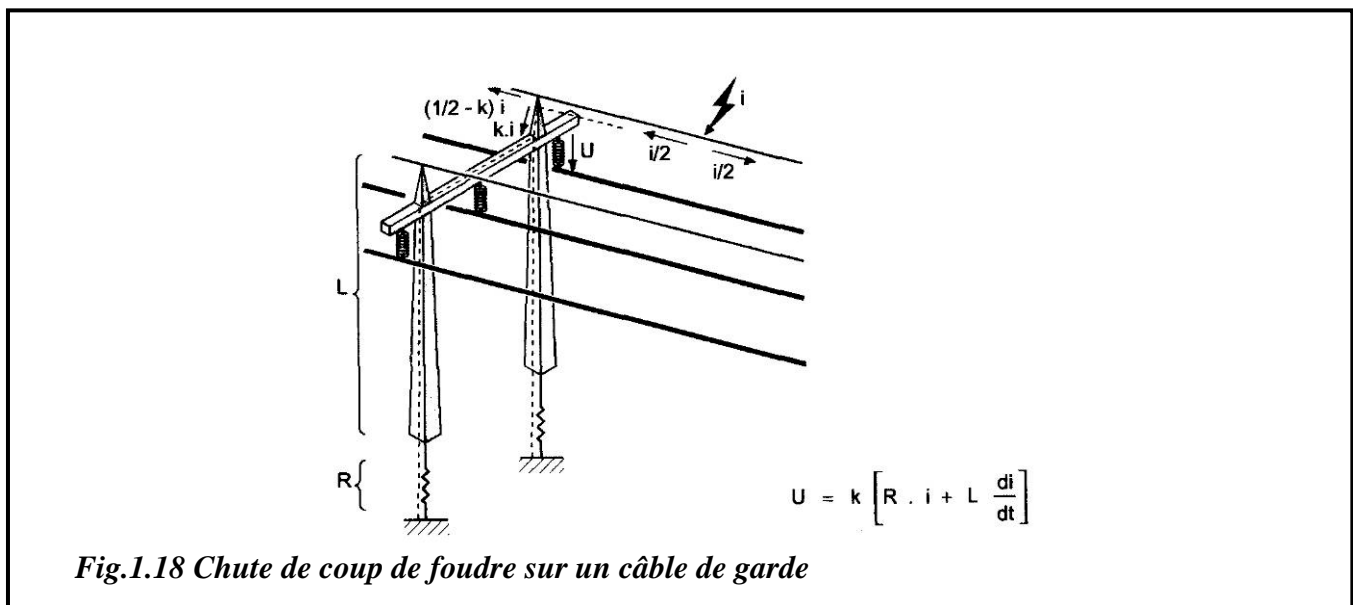


Fig.1.18 Chute de coup de foudre sur un câble de garde

Lorsque cette tension atteint la tension de disruption de l'isolement de la ligne, il se produit un amorçage dit « en retour ».

La qualité des prises de terre joue dans ces phénomènes un rôle prépondérant. On constate, si on se base sur une résistance de terre de 15Ω au choc, par exemple, que l'amorçage reste probable pour une ligne à 150 KV , mais que cette probabilité devient pratiquement nulle pour une ligne à 750 KV . Il y a donc de très sérieuses justifications à l'installation des câbles de garde sur les lignes à très haute tension.

Dans le cas des postes, les coups de foudre directs doivent être évités ; la mise en place de câble de garde au dessus d'un poste situé dans une région à niveau kéraunique élevé est donc recommandée.

1.6.3 Onde des surtensions par coup de foudre arrivant d'un poste de transformation

L'onde de tension pleine ou coupée se propage le long de la ligne en subissant une certaine atténuation fonction de la distance de propagation de l'intensité de l'effet couronne (perte par ionisation de l'air entourant les conducteurs de la ligne).

Lorsque cette onde mobile d'amplitude U_c atteint le poste, elle y engendre une surtension U_p donnée par la formule empirique suivante [08]

$$U_p = 2U_c / N_L \quad ; \quad V \quad (1.10)$$

Avec :

U_c : Valeur de crête de l'onde incidente ;

N_L : Nombre de lignes arrivant au poste.

Ce comportement est illustré par (Fig.1.19). [08]

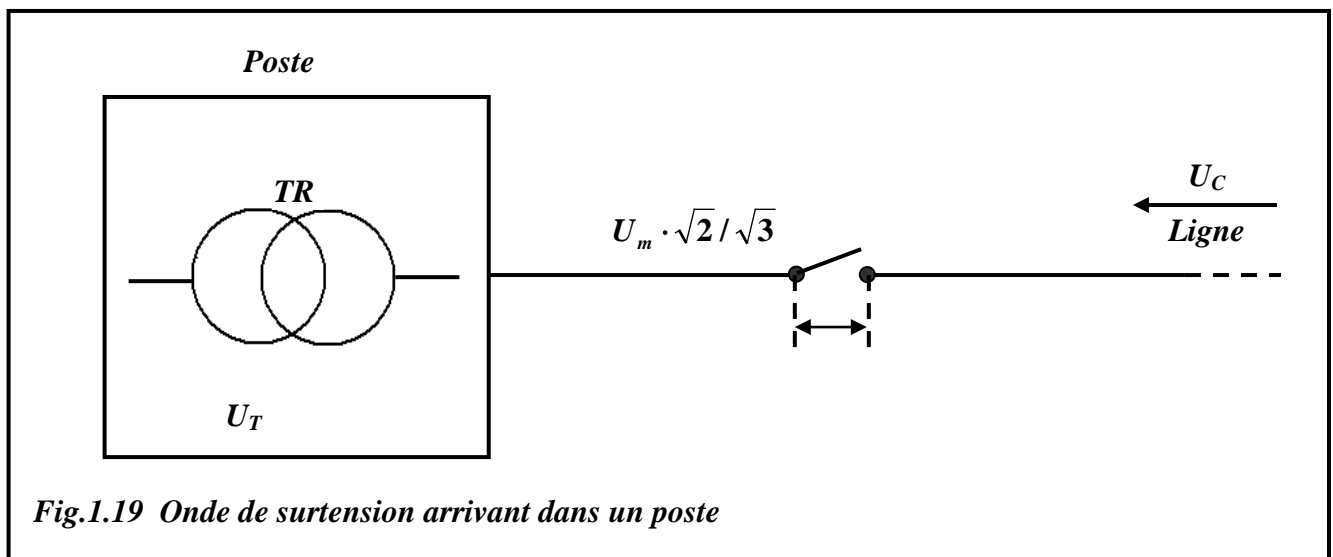


Fig.1.19 Onde de surtension arrivant dans un poste

Si le disjoncteur (ou le sectionneur) de la ligne est ouvert, la tension apparaissant entre bornes d'entrée et de sortie peut avoir deux composantes :

- La première ; coté ligne est l'onde de choc de surtension majorée par réflexion sur l'extrémité ($2U_c$) ;
- La deuxième ; la tension entre phases à fréquence industrielle sur le reste du poste (Fig.1.19) donc la tension de crête aux bornes de l'appareil peut atteindre en valeur absolue U_T :

$$U_T = 2U_c + U_m (2/3)^{0,5} \quad ; \quad V \quad (1.11)$$

U_m : la tension la plus élevée du matériel.

1.7 Effets de la foudre sur les installations électriques

La foudre est un courant électrique haute fréquence qui entraîne les mêmes effets que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique notamment : [03]

- Effets thermiques (effet joule).
- Effets dus aux amorçages (montées en potentiel des prises de terre et tensions dangereuses dues à l'impédance élevée des conducteurs en haute fréquence).
- Effets électromagnétiques.
- Effets électrodynamiques.
- Effets électrochimiques.
- Effets acoustiques (tonnerre).
- Effets lumineux.

1.7.1 Effets thermiques

Les effets thermiques associés au phénomène de foudre peuvent être de plusieurs sortes :

- A-** De manière générale, un courant électrique s'écoulant dans un corps conducteur entraîne son échauffement. Ce phénomène qualifié d'effet joule, peut être à l'origine dans le cas de la foudre, de la fusion des conducteurs dont le volume n'est pas suffisant pour évacuer la quantité de chaleur générée par les courants de foudre.
- B-** Lors de coup de foudre, un contact de mauvaise qualité entre deux conducteurs peut être le siège d'un échauffement important conduisant à la fusion des pièces en contact. Cette fusion pouvant s'accompagner également de la formation d'un arc de retour et de projection de métal porté à haute température, peu constituer un facteur incendiaire important.
- C-** Dans les cas particuliers où les courants de foudre s'écoulent dans un mauvais conducteur (bois, béton), l'échauffement généré est susceptible d'entraîner une vaporisation de l'eau contenue dans le matériau et en conséquence, l'éclatement de ce dernier.
- D-** Aux points de jonction entre un conducteur (surface métallique) et un arc de retour, une grande quantité de charges électriques doit être écoulée dans un temps très bref. Ce phénomène entraîne un échauffement local important du métal, qui, s'il s'avère généralement sans conséquences graves, peut conduire à la perforation de tôle d'acier de 2 à 3 mm d'épaisseur.
- E-** Enfin, lorsque l'arc de retour traverse des substances inflammables, il est capable de déclencher un incendie directement par conduction de la chaleur ou par simple rayonnement thermique. [03]

1.7.2 Effets dus aux amorçages (montée en potentiel et amorçage)

L'amorçage (l'étincelage) se produit lorsque la tension électrique entre deux points dépasse un seuil qui dépend du milieu isolant et de l'éloignement entre ces deux points.

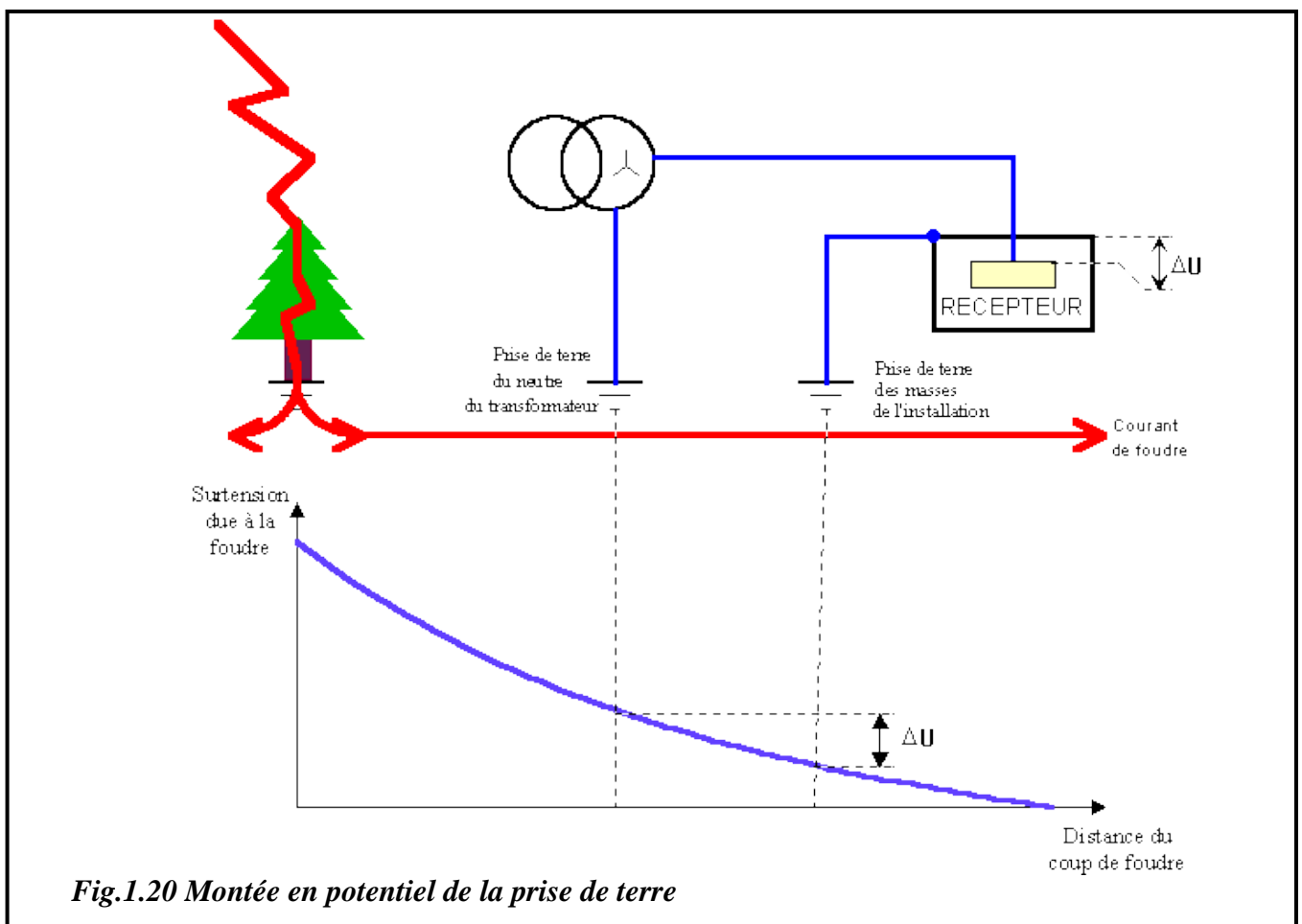
Ce phénomène transitoire se produit dans l'air lorsque le champ électrique est de l'ordre de **30 KV/Cm**.

Ces différences de potentielle peuvent ainsi occasionner :

- Des destructions d'équipements électriques ou électroniques.
- Des claquages (étincelles) entre les descentes de paratonnerre et des objets métallique proches reliés au sol, créant ainsi un risque important d'inflammation.

Un coup de foudre frappant le sol engendre la circulation d'un courant se propageant dans le sol suivant une loi dépendant de la nature du sol et de prise de terre.

Une différence de tension apparaît entre deux points du sol (tension de pas) provoquant la montée en potentiel des équipements par les prises de terre (*Fig.1.20*) [05]



1.7.3 Effets électromagnétiques

Le canal de la foudre ainsi que les éléments écoulant le courant de foudre à la terre génèrent un champ électromagnétique. Des courants et tensions induits vont alors apparaître dans les conducteurs proches. A titre d'illustration, signalons qu'à **100 m** du point d'impact, un éclair peut induire une tension de **80 V** dans une boucle d'un mètre carré formée un conducteur.

Les différences de potentiels en résultant peuvent à leur tour entraîner des claquages dans les éléments électriques ou électroniques reliés à ces conducteurs. Ces claquages peuvent être également de fortes intensités et créent un risque d'inflammation ou de destruction du même type que celui créé par le coup direct.

Par ailleurs, certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétiques peuvent être perturbés ou détruits par le champ créé par un éclair proche.

Les surtensions induites par un champ électromagnétique sont généralement de courte durée et leur amplitude dépend notamment de la vitesse de variation du courant induit dans le composant considéré. Cette vitesse de variation est à relier à la raideur du coup de foudre et donc au profil de l'onde magnétique générée.

Ainsi, les temps de montée, de valeur de crête et le temps de descente ont chacun des effets des traceurs ou perturbateurs :

- A. Le temps de montée :** certains composants discrets (triacs, thyristor par exemple) sont déclenchés ou détruits par des impulsions de bas niveau, mais à front très raide (dU/dt et dI/dt important).
- B. La valeur de crête :** Les surtensions de crête supérieur à la valeur admissible de certains éléments entraînent leur destruction par claquage ; c'est le cas pour les condensateurs, les diodes et en générale les couches d'arrêt des semi-conducteurs.
- C. Le temps de descente :** Les impulsions de longue durée endommagent la plupart des composants du de l'énergie qu'elles véhiculent.

Sans aller jusqu'à la destruction d'un composant ou d'un circuit, les perturbations du réseau peuvent aussi entraîner des erreurs de fonctionnement d'équipements électronique par suite de l'action d'une impulsion, même faible, sur un microprocesseur, une mémoire ou une logique câblée (bascule,...).

Les effets seront par exemple : **[03]**

- L'arrêt ou le démarrage incontrôlé d'une machine automatique
- Le fonctionnement erratique d'équipements
- La perturbation de programmes informatiques

- Le déclenchement intempestif d'une centrale d'alarme
- Des erreurs d'affichage ou de calcul (mesures,...)

Il est clair que la perturbation d'organes électriques jouant un rôle particulièrement important pour la sécurité de l'installation, peut être la cause d'accidents majeurs.

En fin, l'action cumulée et répétée de surtensions ou de surintensités successives non destructives individuellement peut conduire à un vieillissement prématuré de certains composants électriques.

Relativement aux effets électromagnétiques de la foudre, il convient notamment de retenir que :

- La foudre peut avoir des conséquences destructrices ou perturbatrices sur des installations électriques ou électroniques situés dans un rayon de plusieurs kilomètres à partir du point d'impact.
- Une alimentation électrique d'un bâtiment réalisée par câbles souterrains n'en est pas pour autant protégée des effets de la foudre, et les équipements électriques ou électroniques branchés dans ce bâtiment ne sont pas à l'abri des conséquences de ce phénomène électrique.

1.7.4 Effets électrodynamiques

Des effets électrodynamiques peuvent être générés dès lors qu'un courant fort circule dans un conducteur se trouvant par ailleurs dans un champ magnétique généré par des courants voisins. Par analogie, on peut se référer aux phénomènes apparaissant sur les jeux de barres de postes de puissance en cas de court circuit.

Ces effets peuvent être soit attractif, soit répulsifs suivant la disposition des conducteurs les uns par rapport aux autres. Ces efforts peuvent atteindre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de newtons pour des coups de foudre violents et conduisent à des déformations mécaniques pouvant entraîner des ruptures ou des arrachages de support.

1.7.5 Effets électrochimiques

Ces effets sont généralement négligeables sur les installations au sol. Les quantités de matière pouvant se décomposer par l'électrolyse restent faibles, même pour les quantités de décharge transférées importantes. Une surveillance des prises de terre reste cependant nécessaire (risque de corrosion,...)

1.7.6 Effets acoustiques

Les forces électrodynamiques liées au courant s'écoulant dans l'éclair créent une dilatation de l'air du canal de foudre, accompagnée d'une élévation de pression dans le canal. [03]

Cette surpression et sa disparition brutale, créent une onde de choc se propageant ensuite dans l'atmosphère. Cette onde de choc peut générer de fortes surpressions sur des structures avoisinantes et conduire au renversement de panneaux, murs,...etc.

1.7.7 Effets lumineux

Les effets sur les installations sont limités aux équipements optiques (cellules, caméra,...).

En ce qui concerne l'homme, des lésions oculaires peuvent toute fois apparaître. [03]

1.8 Conclusion

Dans cette partie, on a étudié la phénoménologie de la foudre, qui démontre que ce phénomène est trop dangereux surtout pour les lignes de transport d'énergie électrique.

Ce phénomène (la foudre) provoque une onde de choc très importante, ce qui engendre l'augmentation du champ électrique des lignes de transport d'électricité, cette augmentation influe directement sur l'apparition de l'effet couronne qu'est l'objet de la quatrième partie dans notre travail de recherche.

Les foudres peuvent causer des dégâts très importants au niveau des installations électriques ce qui exige obligatoirement une protection propice et efficace qu'est l'objet de la deuxième partie dans ce travail.

Chapitre

2

Protection contre la foudre

2.1 Introduction

L'étude du système de protection contre la foudre nécessite la connaissance statistique de la probabilité de chute de foudre sur une installation déterminée. En conséquence on s'intéresse en premier lieu à connaître la statistique de chute de coups de foudre au sol, puis à estimer l'efficacité des systèmes de protection.

Chaque année les statistiques mondiales montrent qu'il y a des millions de coup de foudre qui cause la mort de dizaines des personnes et des milliers d'animaux, des milliers d'incendies, des milliers de coupures sur les réseaux électriques et téléphoniques. Par exemple en France deux millions de coup de foudre causent chaque année la mort de **40** personnes et de **20 000** animaux, **15 000** incendies, **50 000** coupures sur les réseaux électriques et téléphoniques, et la destruction de nombreux transformateurs et de milliers d'appareils électroménagers. Le coût total des effets de la foudre est estimé à près d'un milliard de francs par an malgré l'absence de statistique et des estimations exacts concernant les dégâts causés par la foudre nous supposons qu'ils sont relativement plus désastreux.

Pour cette raison il est impératif d'analyser l'efficacité des moyens de protection afin de choisir une protection complète et efficace contre les risques liés à la foudre.

2.2 Coefficient (niveau) Kéraunique (N_k)

La probabilité de chute de la foudre sur un endroit déterminé est fonction de niveau Kéraunique (N_k) de cette région.

Le niveau Kéraunique (N_k) correspond au nombre de jours orageux par année en lieu d'observation donnée.

Le jour orageux est défini comme un jour pendant lequel un coup de tonnerre au moins peut être entendu en un lieu d'observation donnée.

Il est évident que cette notion de jour orageux est assez subjective et qu'elle dépend du niveau de bruit de fond régnant au lieu d'observation (Compagne ou ville,... etc.).

Sur ce tableau nous citons quelque exemple de niveau Kéraunique dans le monde (*Tableau.2.01*).

<i>Lieu d'observation</i>	<i>N_k (jours orageux/année)</i>
<i>Cercle polaire</i>	0,1
<i>Europe centrale</i>	11
<i>Lausanne</i>	32
<i>USA</i>	10 ÷ 50
<i>Afrique du nord</i>	10 ÷ 30
<i>Afrique centrale</i>	150
<i>Java</i>	223
<i>Kampala (Ouganda)</i>	242
<i>France</i>	10 ÷ 30

Tableau.2.01 Coefficient Kéraunique (N_k). [10]

2.3 Courbes isokérauniques

Malgré tout, cette notion ayant l'avantage de la simplicité a permis d'établir des courbes isokérauniques sur l'ensemble du globe terrestre (*Fig.2.01*), et dans le cas particulier du suisse.

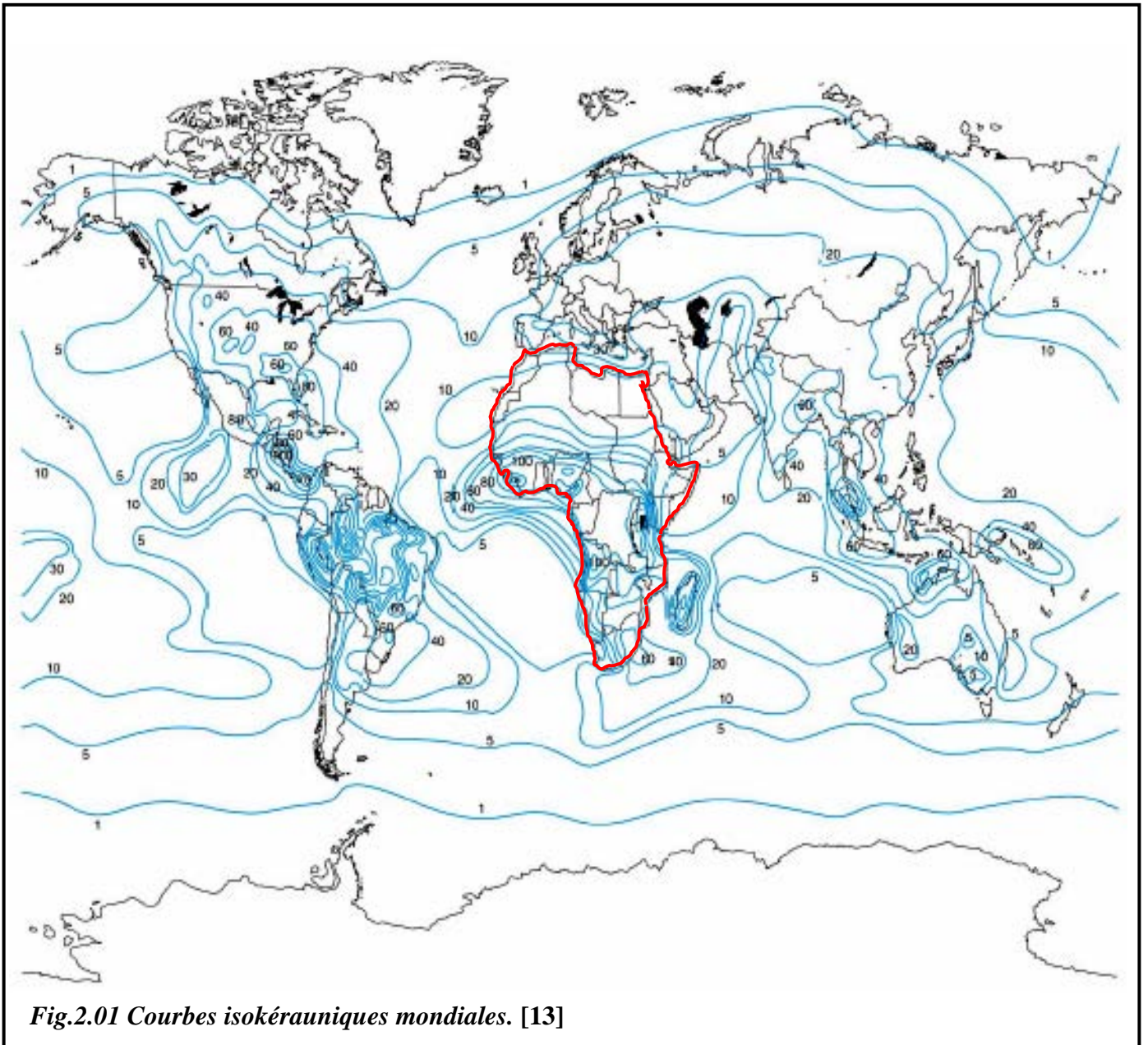


Fig.2.01 Courbes isokérauniques mondiales. [13]

Nous remarquons que le niveau kéraunique de l'Algérie est situé entre **20** au Nord et **10** au Sud.

2.4 Nombre de coup de foudre par unité de surface et par année (N_k)

Une formule expérimental permet de déterminer approximativement le nombre de coup de foudre (N_s) par unité de surface du sol (1 Km^2) et par année à partir du coefficient kéraunique (N_k) [11], [12]. Ce nombre (N_s) se détermine d'après la formule suivante :

$$N_s = N_k / 7 \quad ; \quad 1/\text{Km}^2 / \text{année} \quad (2.01)$$

Le nombre (N_s) s'appel aussi la densité de coups de foudre au sol.

2.5 Nombre de coups de foudre touchant le câble de garde ou la ligne par (Km) de longueur et par année. (N_l)

Il a été établi, sur une base empirique une formule permet de déterminer le nombre de coups de foudre N_l touchant le câble de garde ou la ligne par Km de longueur et par année :

$$N_l = N_k \sqrt{(h_p / 1m)} / (400 Km) \quad ; \text{Coups/ an Km} \quad (2.02)$$

Avec :

N_k : Le niveau Kéraunique ;

h_p : La hauteur moyenne des pylônes en (m). [16]

2.6 Compteur de coups de foudre

On utilise également, pour affiner la statistique des coups de foudre, un compteur mis au point par la CIGARE [11], [14], [15]. Ce compteur électronique traduit, par l'intermédiaire d'une antenne le rayonnement électromagnétique des éclairs sous forme d'impulsion de comptage.

Trois types de compteurs ont été développés :

- le compteur à antenne horizontale $500 Hz$. [11]
- le compteur à antenne verticale $500 Hz$. [14]
- le compteur à antenne verticale $10 KHz$. [14]

L'ensemble de ces compteurs était destiné à établir des cartes de densité de foudroiement au sol cohérentes entre elles.

Les principales difficulté d'exploitation de ces compteurs on été d'une part, leur étalonnage et d'autre part, la mise en place de facteurs de discrimination permettant de rejeter les phénomènes autres que les coups de foudre au sol.

2.7 Principe de protection contre la foudre

La protection contre la foudre en général, des bâtiments et des personnes en particulier, est d'autant meilleure qu'un écoulement maximal des perturbations vers la terre est assurée, le plus près possible des sources de perturbation.

La condition d'une protection efficace est donc d'assurer des impédances de terre minimales, en créant des maillages et des interconnexions de prise de terre chaque fois que possible.

En pratique, en haute tension ($H.T$) dans les postes une impédance de terre inférieure à 1Ω à fréquence industrielle est habituellement demandée, et pour les pylônes une indépendance de (10 à 15) Ω est recherchée.

Contre les courants des foudres et les élévations de potentiel qu'ils induisent, il y a lieu de distinguer plusieurs niveaux de protection (critère d'énergie) :

- **Premier niveau** : Dérivation vers le sol de l'essentiel de l'impact, et premier écrêtage. Ce niveau intéresse principalement les ouvrages susceptibles d'être foudroyés (lignes et postes).
- **Deuxième niveau** : Limitation de la tension résiduelle par écrêtage complémentaire. Il est destiné à protéger, contre les surtensions conduites, les équipements des postes et/ou des installations. Plusieurs dispositifs de protection répartis dans l'installation peuvent être nécessaires à la dissipation de l'énergie associée à l'écrêtage.
- **Troisième niveau** : En basse tension (**B.T**), dans le cas d'équipement sensibles (informatique, automatismes, télécommunications, réseau **B.T**,...), et en complément des niveaux précédents, des dispositifs supplémentaires tels que filtres série et/ou limiteurs de surtensions peuvent être nécessaires [02].

2.7.1 Protection 1^{er} niveau

Le but de cette protection est de limiter les impacts directs sur les ouvrages électriques en détournant la foudre vers des lieux d'écoulement privilégiés. Détourner la foudre de façon contrôlée vers des points précis se fait au moyen de :

2.7.1.1 Paratonnerre

Le paratonnerre se compose d'une tige placée au dessus du bâtiment à protéger. Cette tige est reliée à la terre par un ou plusieurs feuillards de cuivre (conducteur de descente). La réalisation de la prise de terre en patte d'oie doit être particulièrement soignée. L'étude et la réalisation d'un paratonnerre se fait selon les prescriptions définies dans la norme **NF C 17-100**.

Les observations montrent que la protection est bonne contre les coups de foudre directs dans un cône dont le sommet coïncide avec la pointe et de demi angle au sommet **45°**. (**Fig.2.02**).

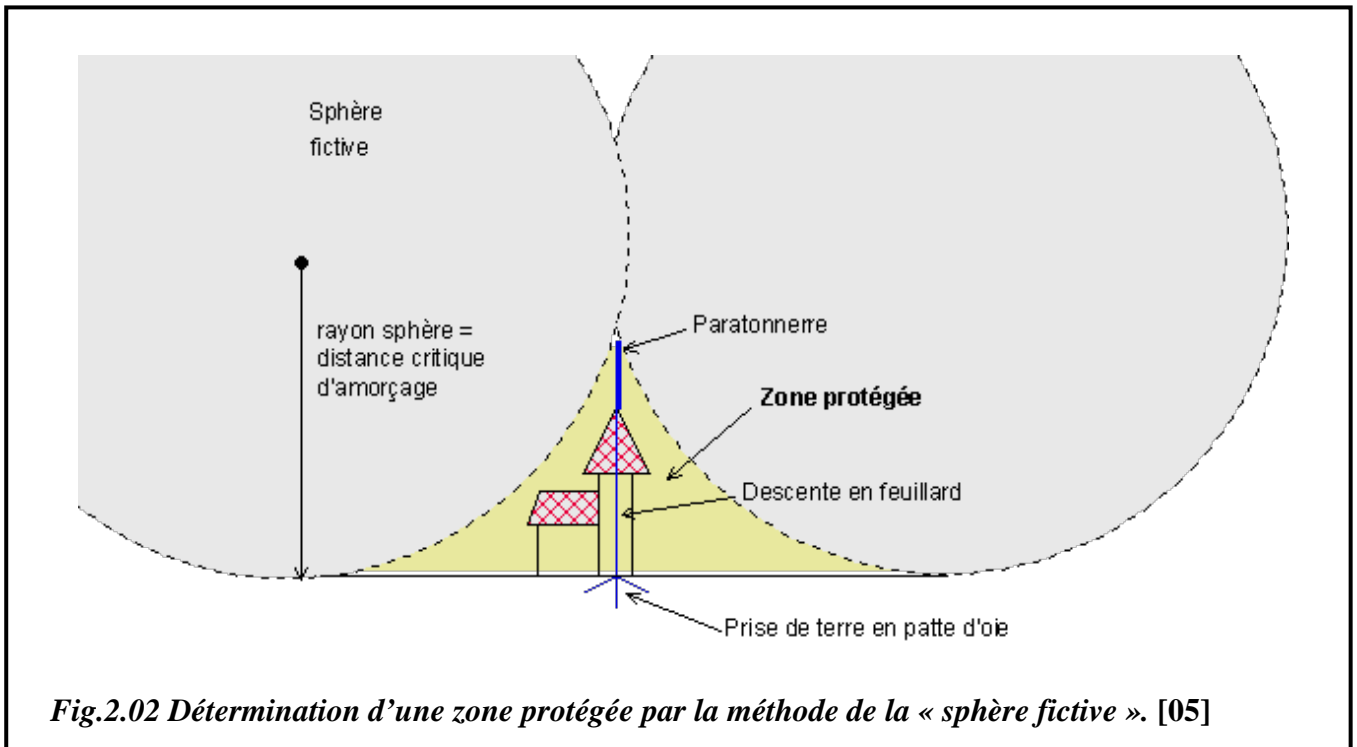


Fig.2.02 Détermination d'une zone protégée par la méthode de la « sphère fictive ». [05]

Le choix du paratonnerre sera déterminé à partir du courant de foudre maximal acceptable pour l'installation. La valeur crête du premier choc de ce courant permet de déterminer une distance d'amorçage critique qui sera utilisée comme rayon d'une sphère fictive, seule la zone située sous la sphère sera protégée.

2.7.1.1.1 Décence de paratonnerre :

La liaison entre les extrémités du paratonnerre et la prise de terre appelé « descente » doit être la plus courte possibles, a fin de rester maître du trajet du courant.

2.7.1.1.2 Echauffement des conducteurs de paratonnerre :

L'échauffement de conducteurs de cuivre est représenté par (Fig.2.03) et (Fig.2.04).

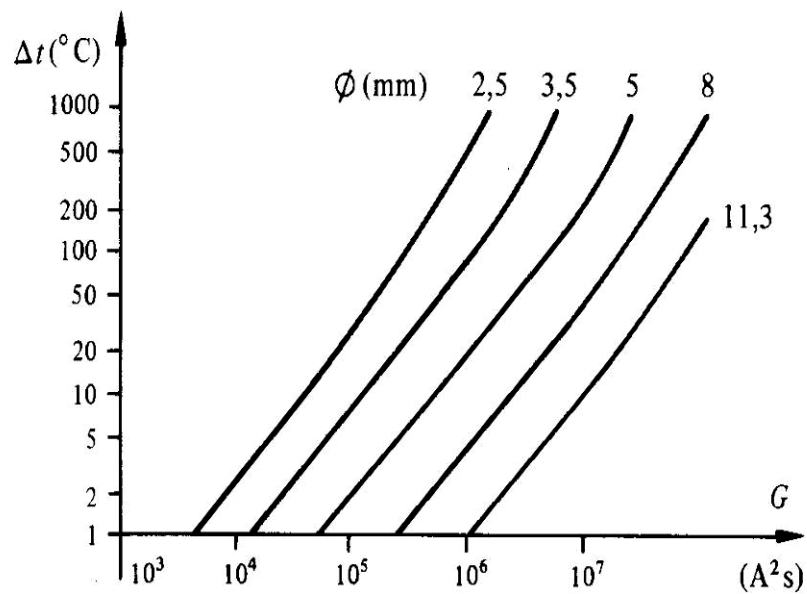


Fig.2.03 Augmentation de température Δt (C°) de conducteur de cuivre de différents diamètres en fonction de l'intégrale d'action. [13]

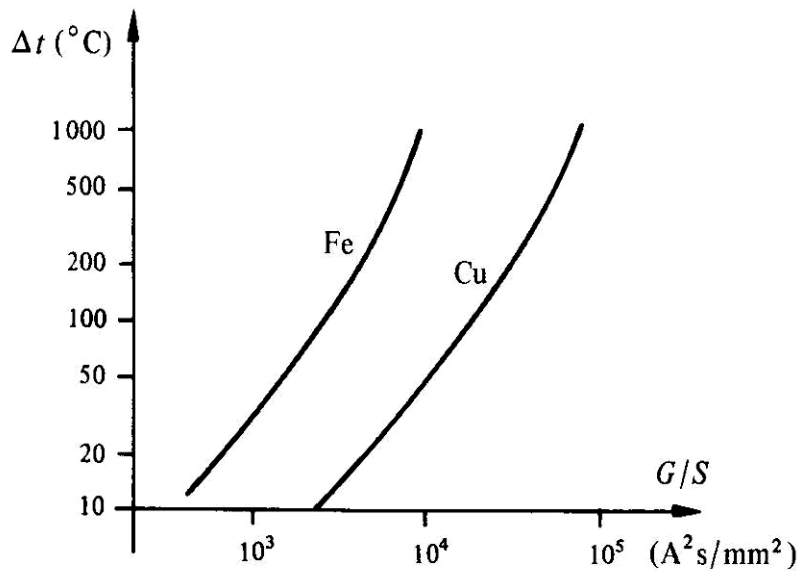


Fig.2.04 Augmentation de température Δt (C°) de conducteur de cuivre et de fer en fonction de l'intégrale d'action surfacique. [13]

Remarque

L'intégrale d'action (2.03) permet de calculer l'énergie libérée dans une charge située au point de chute de la foudre si l'on connaît sa résistance équivalente. Cette intégrale d'action est égale à :

$$G = \int_{t_i}^{t_f} i^2 dt \quad ; \quad (A^2 s) \quad (2.03)$$

Où :

t_i : est le temps initial du phénomène.

t_f : est le temps final du phénomène.

Les dimensions normalisées pour les descentes de paratonnerres sont présentées sur (Tableau.2.02) [17]

	<i>Bâtiment ordinaire</i>			<i>Constructions particulièrement élevées</i>		
	<i>Cuivre (mm)</i>	<i>Acier galvanisé à chaud (mm)</i>	<i>Aluminium (mm)</i>	<i>Cuivre (mm)</i>	<i>Acier galvanisé à chaud (mm)</i>	<i>Aluminium (mm)</i>
<i>Fil rond</i>	6	6	9	8	8	11
<i>ruban</i>	2 x 20	2,5 x 20	3 x 25	2 x 25	4 x 25	

Tableau.2.02 Dimension des organes capteurs descentes des paratonnerres (exemple de Suisse).

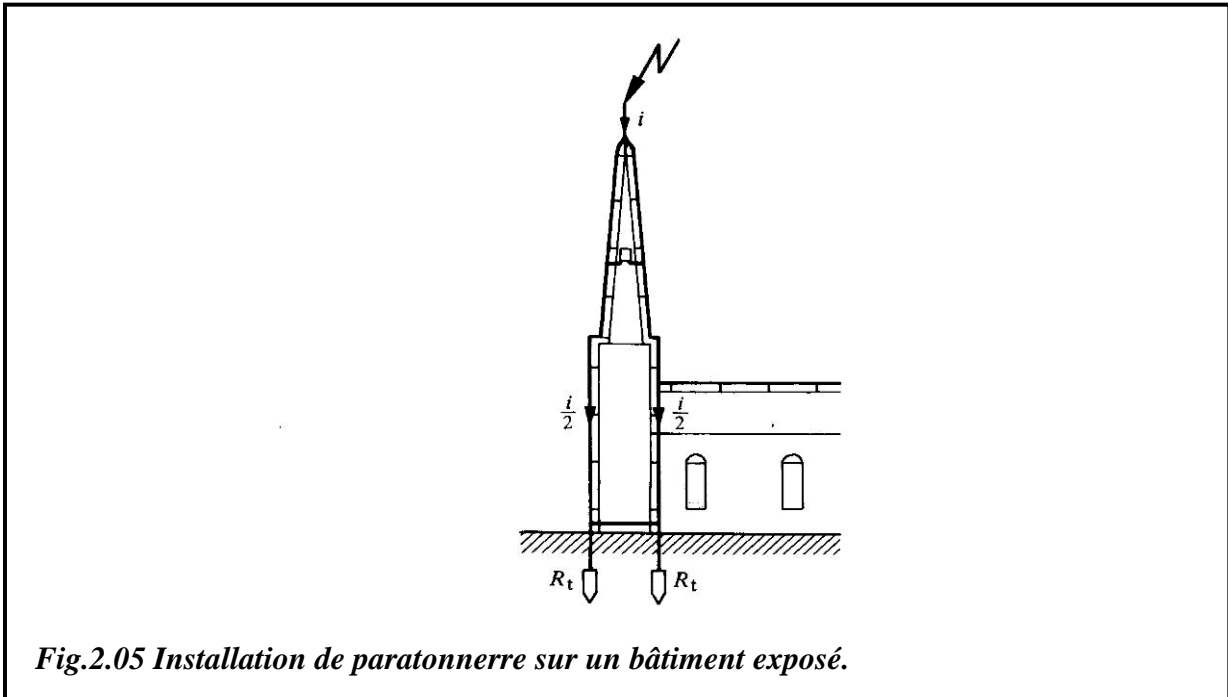
Il faut veiller à ce que la prise de terre ait une impédance aussi faible que possible. Comme prise de terre, on peut avoir recours, soit au réseau d'eau (longueur > 50m) (s'il n'est pas en matière synthétique), soit à des prises artificielles (Tableau.2.03)

	<i>Bâtiment ordinaire</i>		<i>Constructions particulièrement élevées</i>	
	<i>Acier galvanisé à chaud ou plombé (mm)</i>	<i>Cuivre (mm)</i>	<i>Acier galvanisé à chaud ou plombé (mm)</i>	<i>Cuivre (mm)</i>
<i>Fil rond</i>	8	6	10	8
<i>ruban</i>	3 x 25	2 x 20	4 x 25	2 x 25
<i>plaque</i>	500x1000x2	500x1000x1	500x1000x2	500x1000x1

Tableau 2.03 Dimensions des prises de terres artificielles pour paratonnerres. [17]

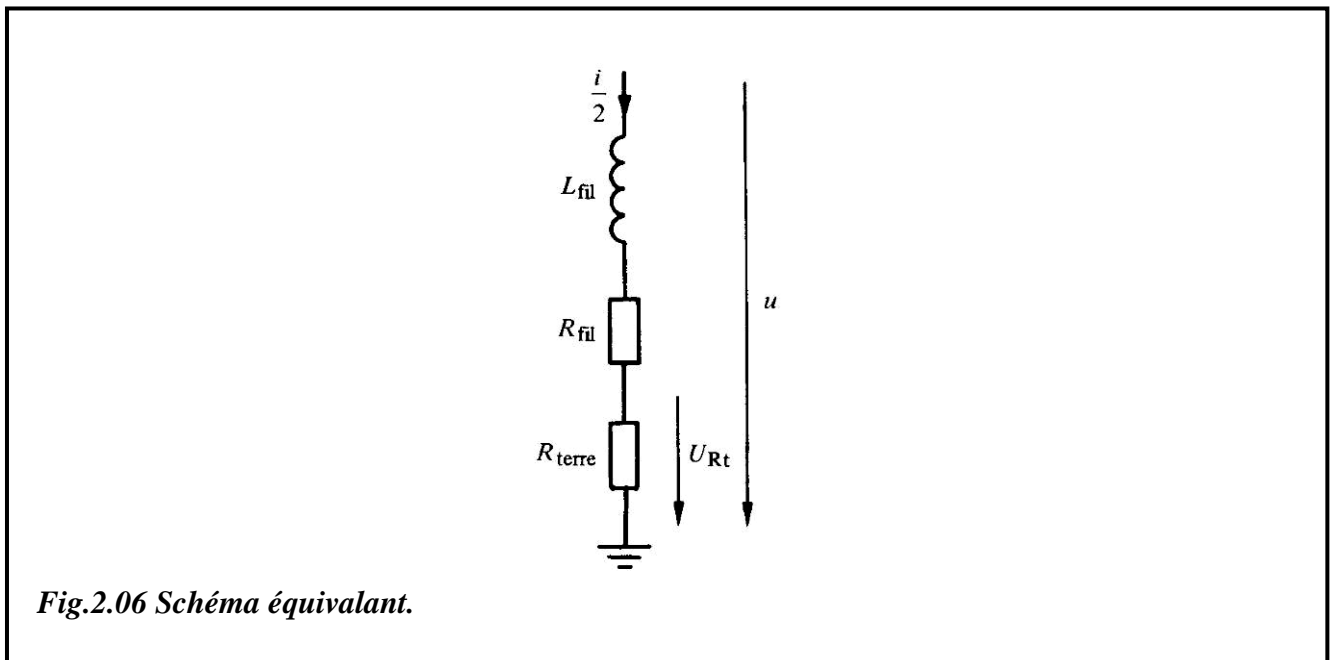
2.7.1.1.3 Installation de paratonnerre

Une installation type de paratonnerre est présentée sur (Fig.2.05)



2.7.1.1.4 Schéma équivalent

Le schéma équivalent de paratonnerre de (Fig.2.05) est donné par (Fig.2.06)



2.7.1.1.5 Détermination de la tension résiduelle

La tension U entre le clocher et la terre de référence est égale à :

$$\begin{aligned}
 U &= (R_{fil} + R_t) \frac{i}{2} + L \frac{d}{dt} \left(\frac{i}{2} \right) \\
 &= R \frac{i}{2} + L \frac{d}{dt} \left(\frac{i}{2} \right) \quad ; \quad V \quad (2.04)
 \end{aligned}$$

Où : $R = R_{fil} + R_t$

2.7.1.1.6 Détermination de la tension de contact

La différence de potentiel U_{Rt} entre le porche et la terre de référence (*Fig.2.06*) vaut [10]

$$U_{Rt} = R_t \frac{i}{2} \quad ; \quad V \quad (2.05)$$

Remarque

Dans le cas particulier, il serait nécessaire d'abaisser fortement la valeur de la prise de terre, ou de réaliser un maillage galvanique de bonne qualité afin d'éviter des dangers pour les personnes [18] et des amorçages d'arcs générateurs d'incendies.

2.7.1.1.7 Zone de protection contre la foudre

Les essais montrent que pour un paratonnerre en forme de mât, l'intérieur d'un cône ($\alpha=45^\circ$), centré sur le mât, présente une bonne probabilité de protection contre les coups de foudre directs.

2.7.1.1.8 Zone d'attraction de la foudre

La zone d'attraction de la foudre est définie comme un volume V (m^3) bien déterminé, aux abords d'un mât de paratonnerre (ou toutes constructions à protéger) limité par une surface S (m^2) pour laquelle, l'entrée en contact d'un canal ionisé, provoquera à coup sûr l'amorçage du coup de foudre sur le sommet du mât.

2.7.1.1.9 Modèle électrogéométrique d'un paratonnerre

Sur (*Fig.2.07*) on représente le modèle électrogéométrique d'un paratonnerre [13]. On distingue :

- un cylindre d'attraction de rayon R , centré sur la descente ;
- une demi-sphère d'attraction de rayon d , centré sur le paratonnerre.

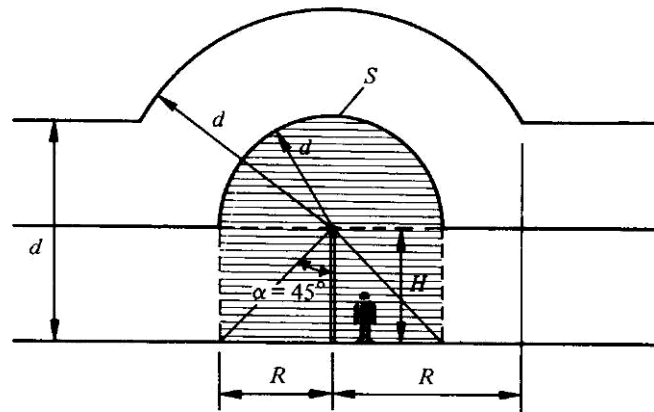


Fig.2.07 Zone d'attraction de la foudre [13]

Où :

H : hauteur du mât de paratonnerre.

R : rayon du cylindre.

d : distance d'amorçage.

S : surface de capture.

Le modèle électro-géométrique d'un paratonnerre est défini par les conditions suivantes :

- Si $d \leq H$, $R = d$
- Si $d > H$, $R = \sqrt{(2 \cdot dH - H^2)}$.

2. 7. 1.1. 10 Distance d'amorçage

La dépendance de la distance d'amorçage en fonction du courant de crête de foudre est représentée par (Fig.2.08).

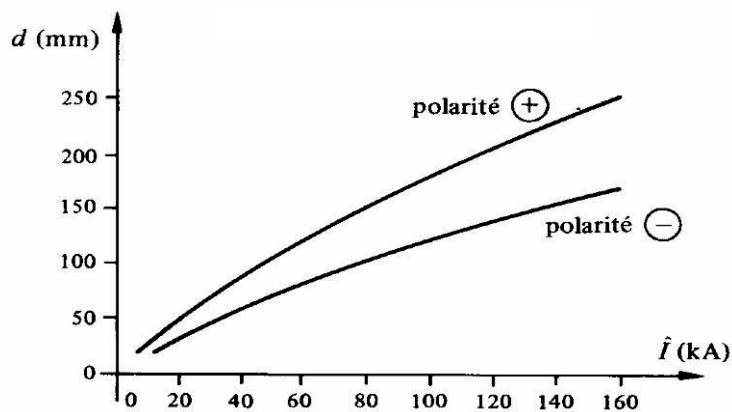
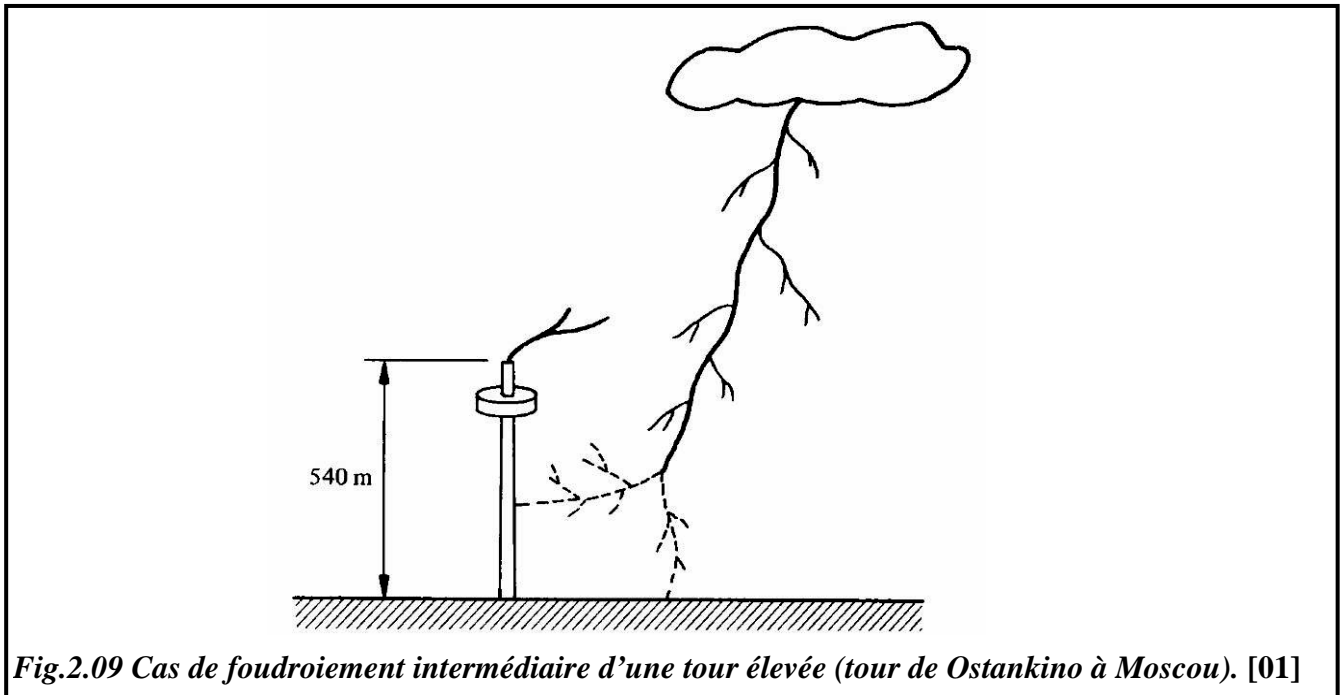


Fig.2.08 Relation déterminée entre la distance d'amorçage d et le courant de foudre i . [13]

2.7.1.1.11 Efficacité des paratonnerres

Le modèle électrostatique, basé sur la distance d'amorçage du traceur principal montre que pour les courants de foudre :

- Elevés et moyens, la protection est très bonne ;
- Faibles, la protection est moins bonne car le dernier trajet du traceur principal est très court (*Fig.2.09*).

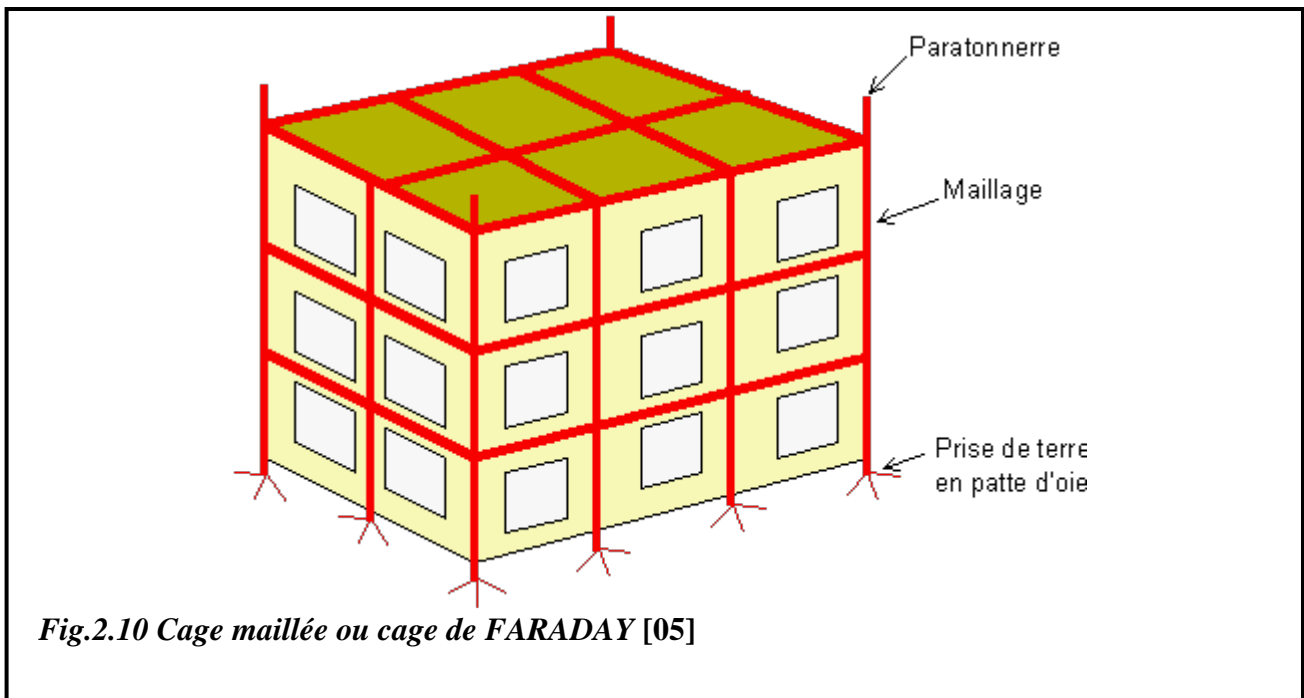


2.7.1.2 Cage maillée ou de FARADAY

Ce système consiste en la réalisation d'un maillage fermé de conducteurs horizontaux et verticaux reliés au sol à un réseau de terre [05] la largeur de maille est inférieure à **15m** et des tiges verticales sont placées aux nœuds des mailles, en partie supérieure. La couverture de la zone à protéger équivalente à une multiplicité de paratonnerre (*Fig.2.10*).

La cage maillée est utilisée pour protéger des bâtiments sensibles.

Dans les deux cas (paratonnerre et cage maillée), le modèle électrostatique permet de déterminer la zone protégée par la méthode de la « sphère fictive » (*Fig.2.02*)



2.7.1.3 Fils de garde (tendus)

Le fil tendu ou bien de garde, est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalant au conducteur de phase d'une ligne.

Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône (*Fig.2.11*). [05]

Le câble protecteur (câble de garde), dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de la foudre, joue un certain nombre d'autres rôles parallèles :

- Rôle statique.
- Rôle dynamique.

2.7.1.3.1 Rôle statique

Le câble protecteur contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne placés sous nuage orageux. Ceci n'est valable que si les conducteurs de phase sont laissés flottants ce qui en pratique n'est jamais le cas. En effet, les ligne sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité.

2.7.1.3.2 Rôle dynamique

Les différents types des rôles dynamiques du câble de garde sont :

- Protection contre l'impact direct de la foudre (zone d'amorçage sûr sur la phase non suivi le contournement, zone d'impact sur le câble de garde, angle de protection).
- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase [19], [20]
- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension sur les lignes de télécommunications [21].

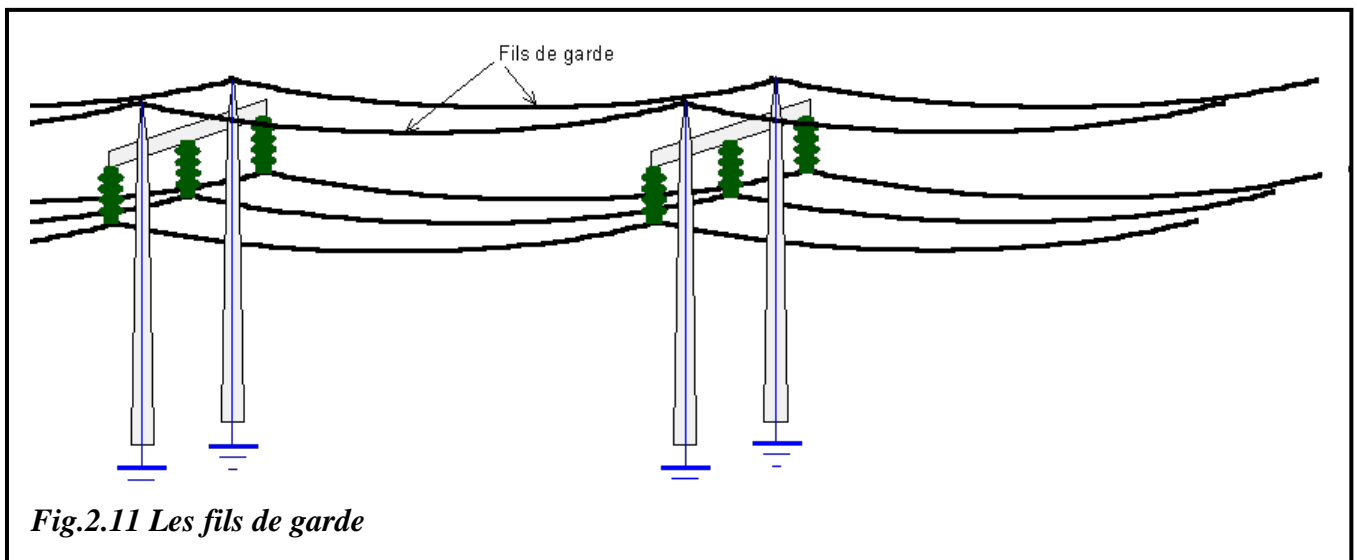


Fig.2.11 Les fils de garde

2.7.1.3.3 Protection contre la chute directe de la foudre

Le câble de garde joue un rôle de protection contre la chute directe du coup de foudre sur les conducteurs de phases.

Le nombre de coup de foudre touchant une ligne électrique en fonction du niveau kéraunique N_k est donné par la formule empirique (2.02). [16]

2.7.1.3.4 Courant critique de la foudre

Des mesures expérimentales ont permis de définir une distance d d'amorçage sûr d'arc lors d'un coup de foudre, entre la tête d'un traceur par bond (pilote) et le sol, en fonction de l'intensité du courant de foudre I (cette distance est donnée par la formule (1.03)).

Avec I : est le courant de crête de foudre en (KA).

2.7.1.3.5 Modèle électrogéométrique pour un câble de garde

Le modèle électrogéométrique utilisé pour définir l'effet d'un câble de garde est basé sur l'hypothèse qu'à chaque échelon de tension nominale d'une ligne U_n correspond un courant critique de foudre I_c entraînant l'amorçage du (des) conducteur(s) de phase contre terre (Tableau.2.04).

Il est évidant qu'a chaque courant critique de foudre I_c correspond une distance d'amorçage sûre d selon (Fig.2.07)

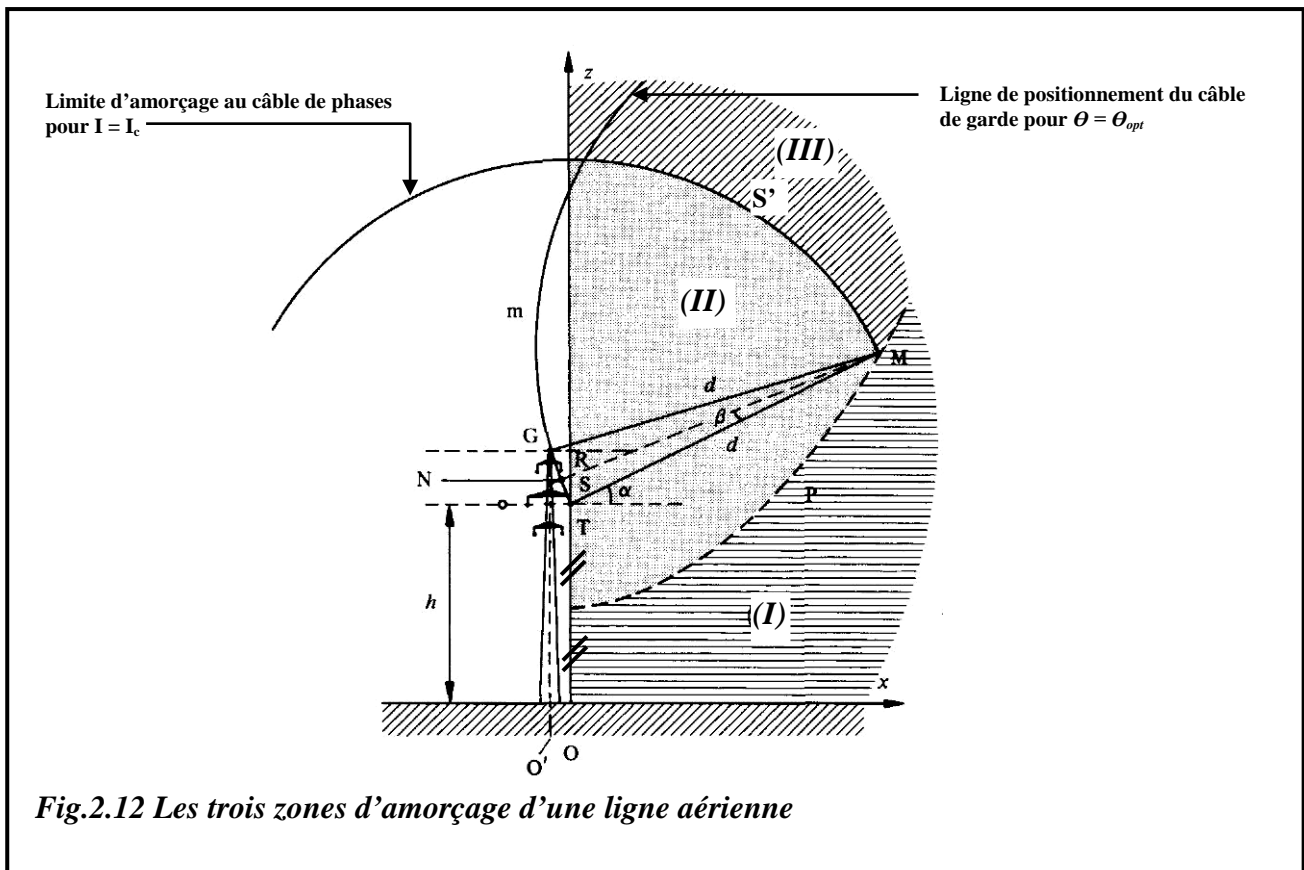
Tension nominal U_n (Kv)	Courant critique de foudre I_c (KA)	Distance d'amorçage d (m)	Probabilité d'amorçage (%)
220	6 ÷ 7	28,10 ÷ 32,00	95
400	8 ÷ 9	35,40 ÷ 38,90	87
750	18 ÷ 20	67,70 ÷ 73,60	62

Tableau.2.04 Courants critiques de foudre [16]

2.7.1.3.6 Positionnement du câble de garde

On construit le modèle électrogéométrique de la façon présentée sur la figure (Fig.2.12)

Avec ce module on peut déterminer trois zones d'amorçage ainsi que l'angle de protection.



On se limite au conducteur de phase S , le plus extérieur de la ligne, donc le plus exposé.

A- Zone d'amorçage au sol (I)

On trace la parabole P définie par le lieu des points à égale distance du conducteur S et du sol.

La zone (I) est défini comme étant la surface limitée par la parabole P , l'axe Z et l'axe X (sol).

La zone (I) est caractérisée par le fait que toute tête de traceur par bond pénétrant dans cette zone sera plus près du sol que du conducteur de phase S et que dans ce cas un amorçage sûr aura lieu contre le sol et non sur le conducteur S .

La distance d'amorçage d ayant été calculé sur la base du courant critique de foudre, dépendant de l'échelon de tension de la ligne considérée (*Tableau.2.04*), on trace un arc de cercle S' , de rayon d centré sur la phase S . cet arc de cercle S' coupe la parabole P en un point M .

B- Zone d'amorçage sûr sur la phase non suivi de contournement (II)

La zone (II) est définie comme étant la surface comprise entre l'arc de cercle S' , l'axe Z et la parabole P .

Elle est caractérisée par le fait que toute tête du traceur par bond pénétrant dans cette zone tombera sûrement sur le conducteur S (en absence de conducteur de garde G).

Etant donné les hypothèses, le courant de foudre sera inférieur au courant critique de foudre de la ligne, ce qui n'entraînera pas de contournement de la phase donc de défaut.

C- Zone d'impact sur le câble de garde (III)

Cette zone (III) est définie comme étant la surface au-dessus de l'arc de cercle S' et de la parabole P .

Elle caractérisée par le fait que toute tête du traceur par bond pénétrant dans cette zone déclanchera un coup de foudre sur le conducteur S en l'absence du conducteur de garde G .

Il est nécessaire d'introduire un conducteur de garde G dont le rôle est de protéger la phase S contre un coup de foudre direct. La condition que doit remplir le point G est qu'il faut que $\overline{PG} < \overline{PS}$; quelle que soit la position de point P dans la zone (III).

Ce point G peut être fixé n'importe où sur l'arc de cercle m , de rayon d et centré sur le point M . en effet, tout point p situé au-dessus de la médiatrice \overline{MN} du triangle isocèle MGS remplit la condition ci-dessus.

L'arc de cercle m est le lieu d'efficacité optimal du câble de garde protégeant le conducteur extérieur S le plus exposé de la ligne.

D- Angle de protection

On choisit en fonction de contraintes mécaniques et du design du pylône, un point G déterminé sur l'arc de cercle m . si aucune intersection n'est trouvée entre l'arc de cercle m et l'axe de symétrie du pylône Z , on peut être amené à placer deux câbles de garde de part et d'autre de Z .

L'angle de protection θ est défini comme l'angle $\overline{GS} = \overline{GO'}$. Il peut être calculé de la façon suivante : [10]

$$\theta = \alpha - \beta \quad ; \quad rad \quad (2.06)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{d-h}{d}\right) \quad ; \quad rad \quad (2.07)$$

Où : $h = \overline{SO}$ est la hauteur de la phase S par rapport au sol.

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_{d.op}}{2d}\right) \quad ; \quad rad \quad (2.08)$$

Où : $n_{d.op} = \overline{GS}$ est la distance entre le conducteur de garde G et la phase S . Alors :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{d-h}{d}\right) - \arcsin\left(\frac{n_{d.op}}{2d}\right) \quad ; \quad rad \quad (2.09)$$

Remarque

Les angles de protection optimale sont de l'ordre de 30° .

2.7.2 Protection 2^{ème} niveau :

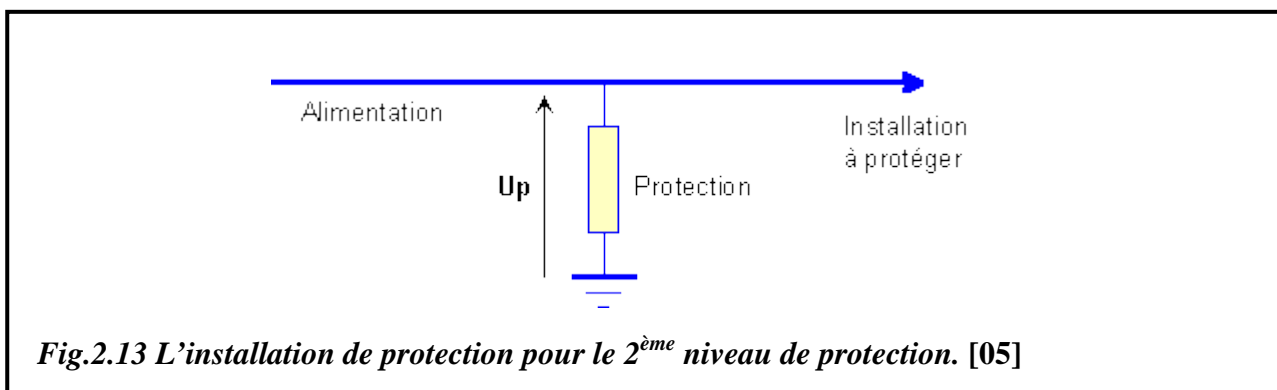
Ce type de protection s'applique en haute tension son objectif est d'assurer que le niveau d'isolement au choc ou BIL (Basic impulse level) des différents éléments du poste ne soit pas dépassé (Coordination des isolements).

Son principe est de créer un circuit de dérivation à la terre, permettant ainsi l'écoulement du courant de foudre, par amorçage ou conduction.

Il existe deux types d'appareils sont utilisés pour limiter la tension :

- L'éclateur ; est plus ancien.
- Le parafoudre ; qui tend à le supplanter dans de nombreuses applications.

Ce type de protection est installé en parallèle sur l'équipement à protéger, il peut s'adapter quelle que soit la puissance de cet équipement (*Fig.2.13*).



2.7.2.1 Eclateur

L'éclateur est un dispositif de limitation des surtensions, il est le plus simple, le plus ancien, le plus robuste et le moins cher des moyens de protection.

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre, comportant un intervalle d'éclatement d'air libre entre les deux électrodes.

Les éclateurs ont fait leurs preuves de façon satisfaisante sur les réseaux de tension inférieure ou égale à (245 KV) dans les pays où l'activité orageuse est modérée.

Le réglage de l'intervalle d'éclatement est souvent un compromis entre protection et continuité de service.

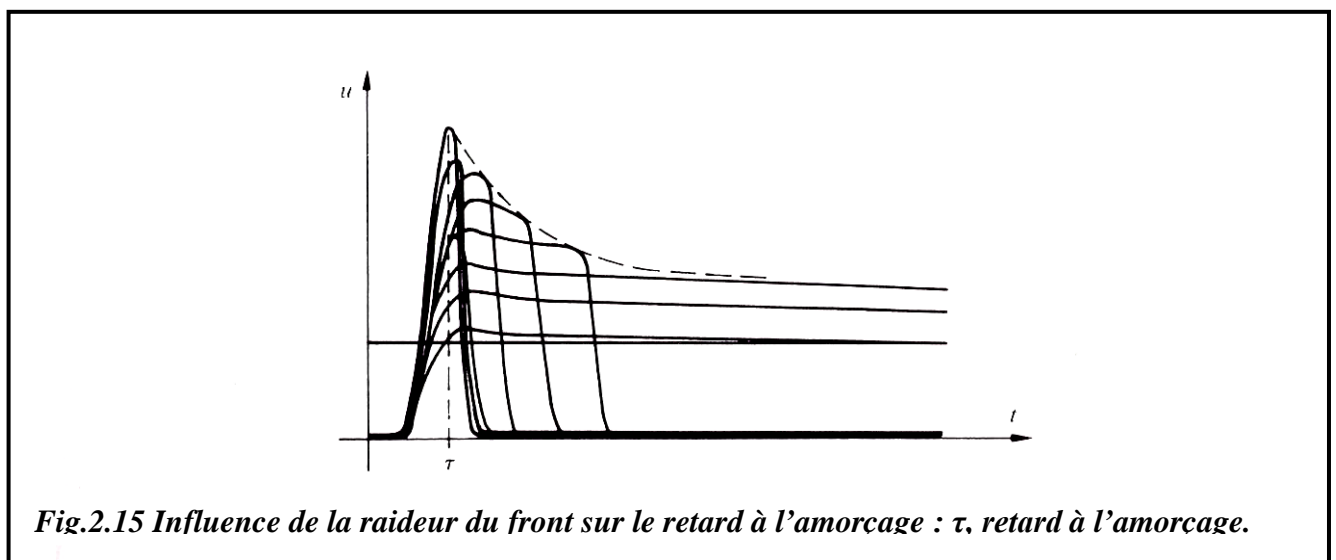
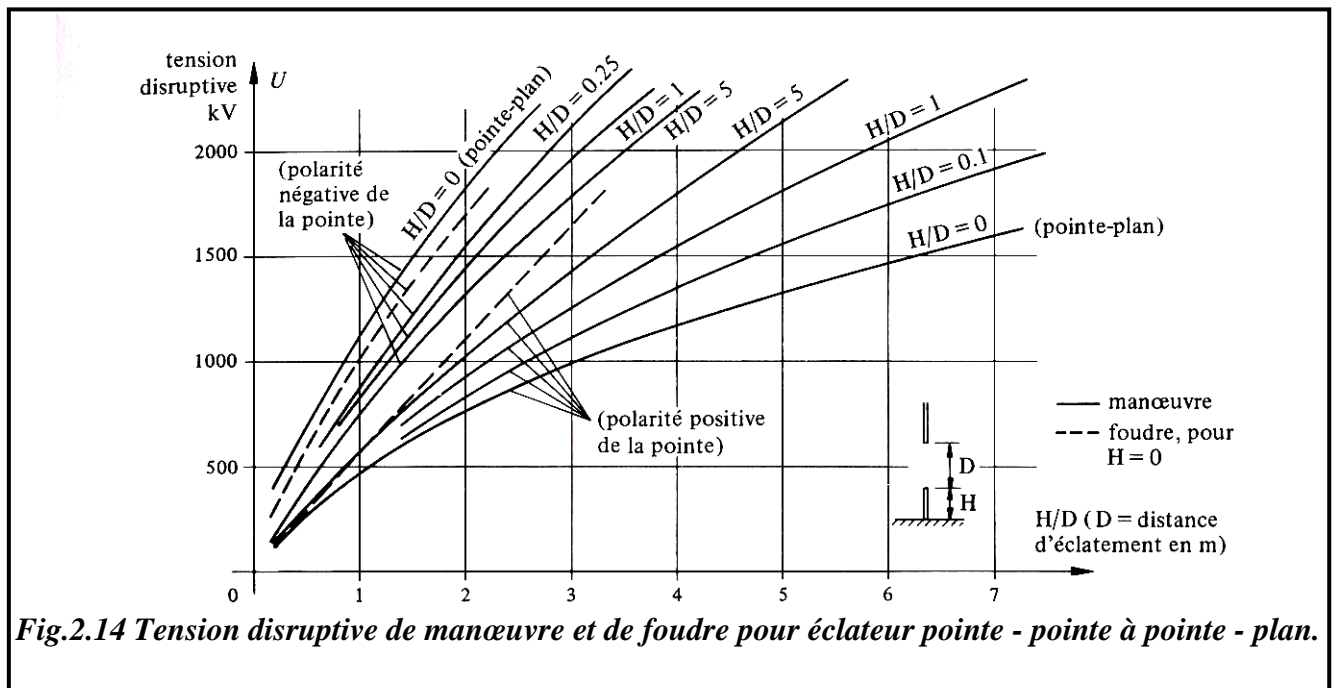
2.7.2.1.1 Tension d'amorçage et retard à l'amorçage

La tension d'amorçage (*Fig.2.14*) et le retard à l'amorçage (*Fig.2.15*) d'un éclateur dépendent principalement de la distance entre électrodes, de la polarité et de la raideur du front ; ils sont influencés par la forme des électrodes ainsi que par leur disposition et les distances relatives aux parties voisines sous tension et à la terre.

Pour améliorer le fonctionnement des éclateurs soumis aux surtensions à front raide et leur polarité donnant une caractéristique tension - temps d'amorçage plus plate, on modifie la configuration géométrique des électrodes pointe - pointe simples (par exemple grâce à un choix judicieux des formes des électrodes par aménagement d'une électrode auxiliaire centrale). [22]

La tension d'amorçage d'un éclateur dépend :

- de la distance d'amorçage d (distance la plus courte dans l'air entre les extrémités des électrodes) ;
- des conditions atmosphériques (essentiellement de la densité de l'air) ;
- de la forme des électrodes et de leur effet de polarité (on recherche une forme telle que la dépendance de la polarité du choc soit aussi faible que possible) ;
- de leur situation par rapport à leur support et aux surfaces voisines conductrices et isolantes ;
- de l'usure des électrodes (dépendant du nombre de fonctionnement antérieurs, des courants écoulés par l'arc et de leur durée).



2.7.2.1.2 Eclateur de protection

Un éclateur peut être utilisé comme dispositif normal de protection du poste, ce qui peut être admis dans certaines régions de sévérité orageuse modérée et lorsque le niveau des surtensions de coupure est relativement faible. Dans ce cas, on utilise de préférence un éclateur séparé, installé à quelque distance de tout objet qui risque d'être endommagé par l'arc (*Fig.2.16*) ; (lorsque l'éclateur est directement supporté par une borne de traversé d'un appareil, on doit l'enlever pour effectuer l'essai diélectrique de l'appareil) (*Fig.2.17*). [22]

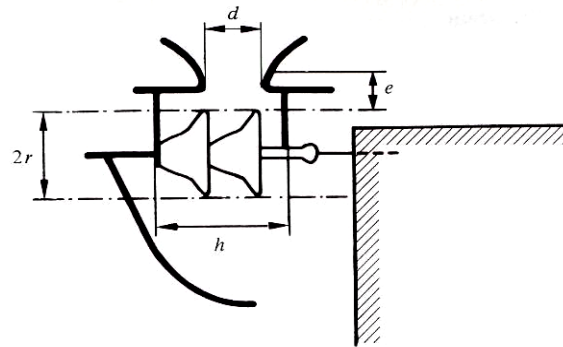


Fig.2.16 Eclateur de matérialisation à cornes de soufflage sur une chaîne d'isolateurs

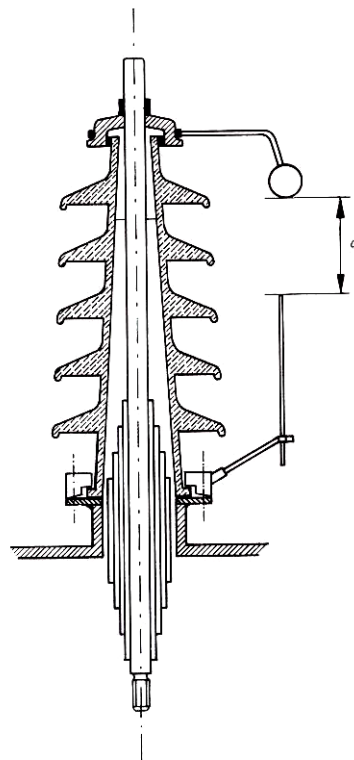


Fig.2.17 Eclateur de protection sur une borne de traversée d'appareillage.

2.7.2.1.3 Eclateur destiné à matérialiser le niveau de choc d'une isolation externe

Un éclateur peut être utilisé pour abaisser la tension de contournement d'isolateurs surdimensionnés. Ce surdimensionnement est nécessaire pour résister à la pollution (*Fig.2.17*). Un éclateur de ce genre peut être incorporé dans un appareil ayant une isolation interne dans l'intention d'assurer que tout amorçage se produira à l'extérieur plutôt qu'à l'intérieur ou par perforation. Un tel éclateur a pour rôle d'abaisser l'isolement externe d'un appareil peu au-dessus du niveau de tenue normal en onde pleine. [23]

On pourra donc généralement garder cet éclateur lors des essais diélectriques.

Un tel éclateur ne dispense pas d'un dispositif de protection contre les surtensions.

2.7.2.1.4 Eclateur incorporé de localisation d'arc

Cet éclateur est chargé d'écarter les arcs des matériaux isolants et de les empêcher de se fixer sur les parties vulnérables (*Fig.2.18*)

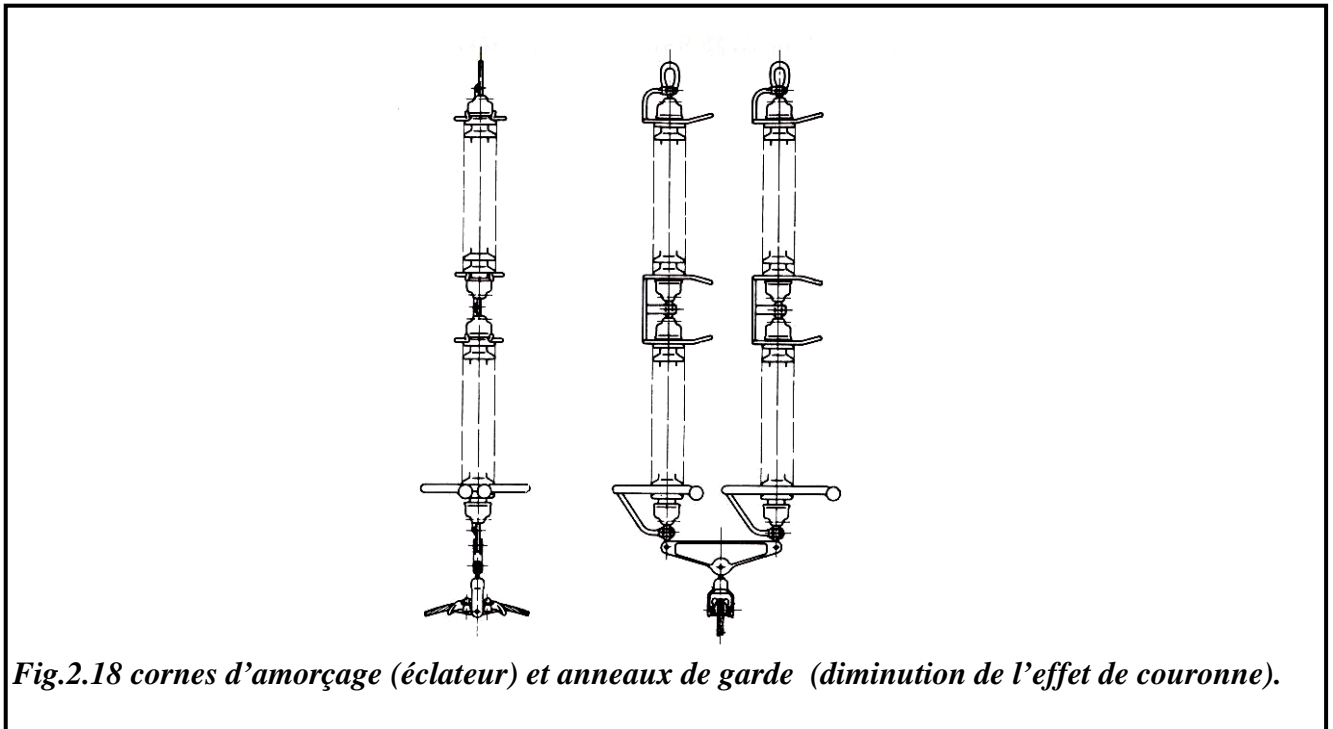


Fig.2.18 cornes d'amorçage (éclateur) et anneaux de garde (diminution de l'effet de couronne).

2.7.2.1.5 Caractéristiques de protection d'un éclateur

Du fait :

- de la dispersion de la tension d'amorçage d'un espace d'air ;
- de l'accroissement de la tension d'amorçage lorsque s'accroît la pente de la surtension appliquée dans le cas où l'amorçage a lieu sur le front de l'onde (*Fig.2.15*). [22]

2.7.2.1.6 Avantage et inconvénients des éclateurs

- ❖ Le principal avantage de l'éclateur est son faible prix. Il est aussi robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction
- ❖ Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans de nombreux inconvénients :
 - Un assez grande dispersion de sa tension d'amorçage (jusqu'à **40%**) ;
 - Un retard à l'amorçage fonction de la surtension ;
 - Un amorçage sensible aux influences externes ; conditions atmosphériques par exemple ;
 - Il crée un front d'onde coupée très raide pouvant détruire les enroulements de machines situées à proximité ;

- Il crée aussi un courant de suite à **50 Hz**, le courant ainsi dérivé est (vu) par l'appareil de protection contre les défauts terre qui commande alors l'ouverture en amont de la ligne touchée.

Malgré ses défauts et, surtout, à cause de son faible prix, l'éclateur demeure, sur les réseaux de distribution et de transport de l'énergie électrique, dispositif de protection privilégié.

En tout état de cause, l'éclateur reste un excellent moyen de protection des isolations dans l'air, les niveaux d'isolement du matériel à protéger subissant les mêmes fluctuations que les niveau de protection des éclateurs.

En revanche il est moins bien adapté à la protection des autres matériels tel que les transformateurs, les câbles, les postes électriques sous enveloppe métallique... etc.

On est alors amené à le remplacer par des parafoudres. [24]

2.7.2.2 Parafoudres

Le parafoudre est un dispositif installé dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions transitoires et la limitation de la durée et de l'amplitude des courants de suite, dus à l'amorçage.

Il est un semi-conducteur à résistance non linéaire (de plusieurs $M\Omega$ à quelque Ω) (*Fig.2.19*).

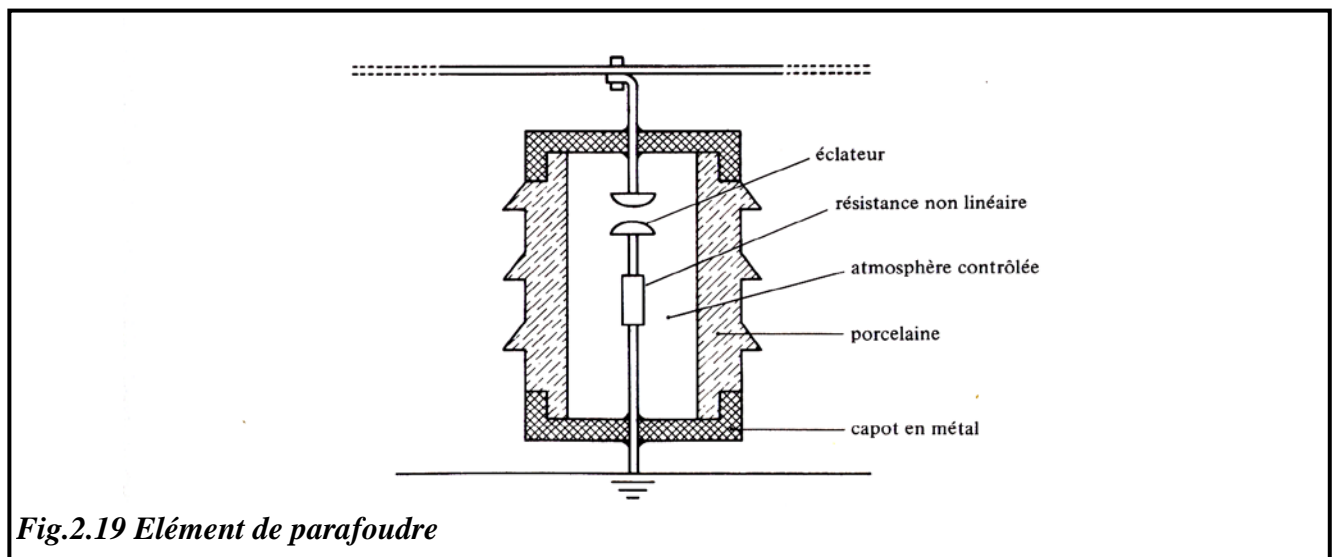
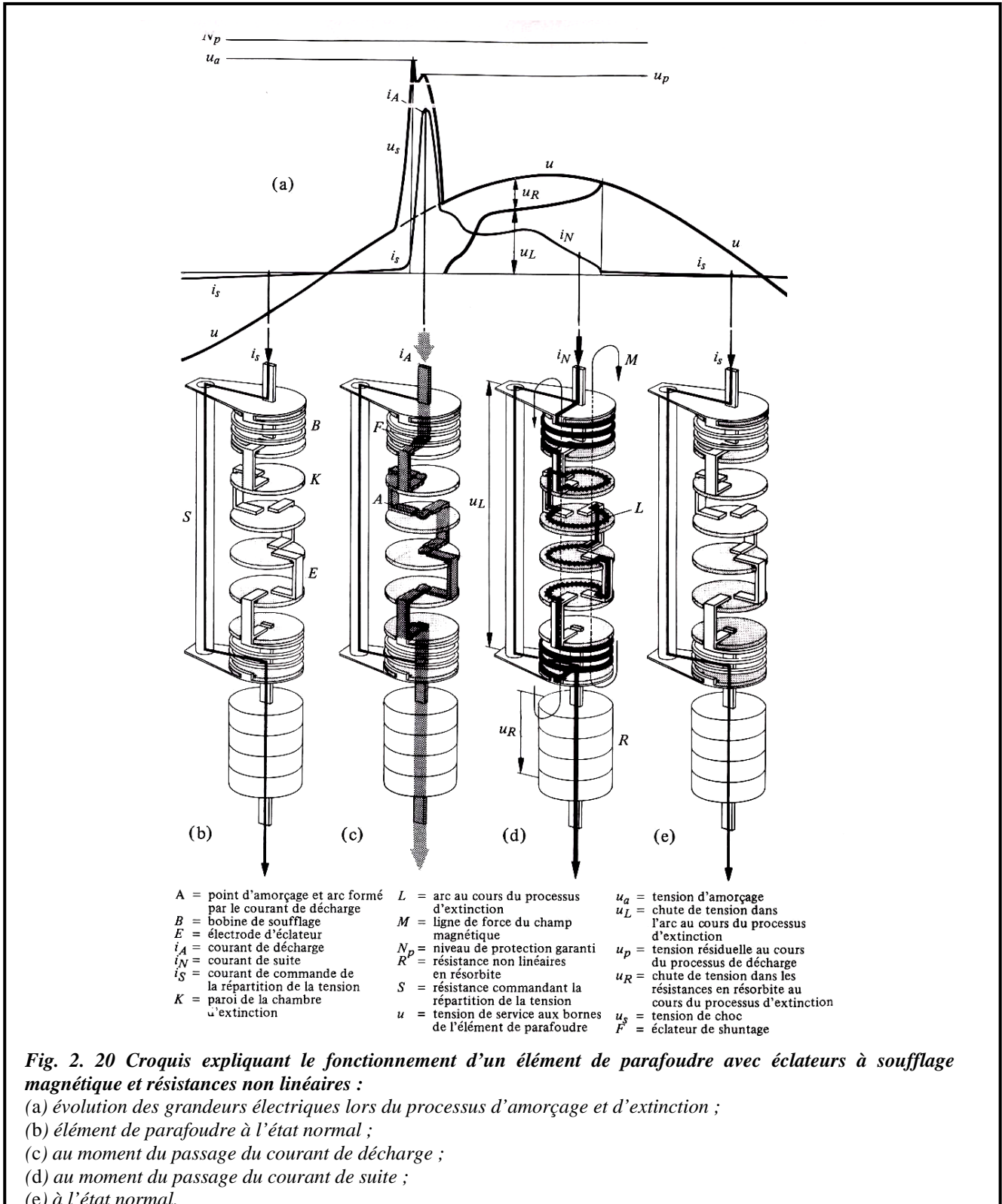


Fig.2.19 Élément de parafoudre

Le parafoudre se distingue de l'éclateur, dans son fonctionnement, par les faits suivants :

- Il travaille en atmosphère contrôlée, c'est-à-dire que sa tension n'est pratiquement pas influencée par les conditions atmosphériques.
- Contrairement aux éclateurs, il ne produit pas de front raide lors de son amorçage grâce à la présence de la résistance non linéaire. (*Fig.2.20*).

- La résistance non linéaire placée en série avec l'éclateur limite le courant de suite, qui est coupé lors du prochain passage par zéro de la tension.
- Peu de dispersion de sa tension résiduelle caractéristique $U = f(I)$ ou « résiduelle voltage ».
- retard à la conduction quasiment nul ;
- retour naturel à l'état initial, (isolant) donc sans établissement d'un courant de suite.



2.7.2.2.1 Principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre

Les principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre sont :

- Sa tension maximale permanente, ou « Maximum Continus Operating Voltage » (*MCOV*) doit être supérieur à la tension maximale d'exploitation du réseau, avec une marge de sécurité de 5%.
- Sa tension maximale, ou « rated voltage » fixée à ($1.25 \times MCOV$).
- Son niveau de protection.
- Sa capacité énergétique a supporté des surtensions temporaires, donnée par une courbe amplitude - durée.

2.7.2.2.2 Élément de parafoudre en série

Le parafoudre est connecté entre phase et terre. Pour les hautes tensions, il faut mettre plusieurs éléments en série, chaque élément comporte un petit éclateur en série avec la résistance non linéaire, en parallèle avec une grande résistance et avec une petite capacité qui ont pour mission d'assurer l'égalité des tensions sur tous les éclateurs (*Fig.2.21*). [22]

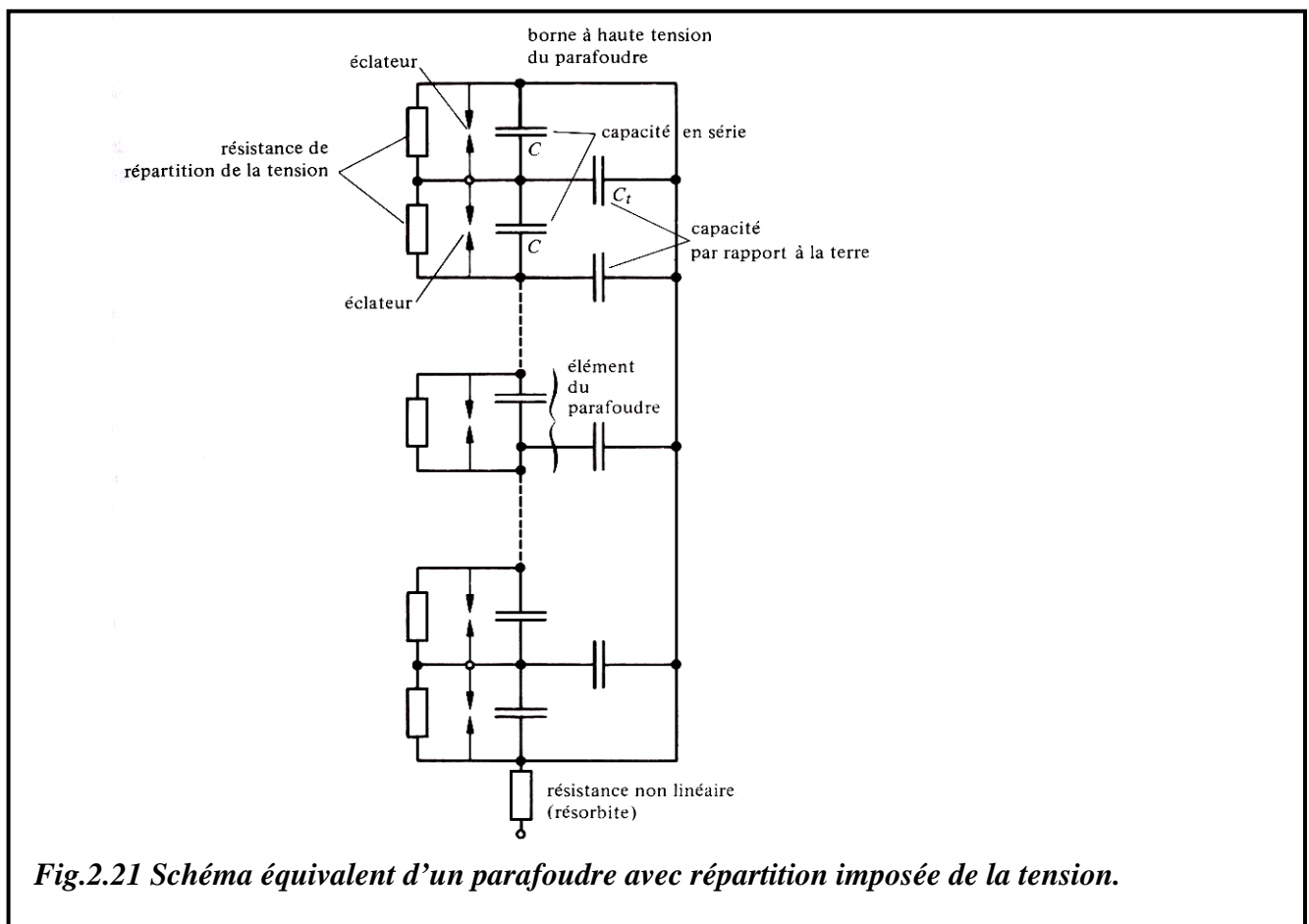


Fig.2.21 Schéma équivalent d'un parafoudre avec répartition imposée de la tension.

2.7.2.2.3 Caractéristiques tension - temps de retard à l'amorçage en régime transitoire

Les caractéristiques tension d'amorçage-durée (U, τ) en régime transitoire (**Fig.2.22**) se distinguent dans les cas du parafoudre par rapport à l'éclateur simple (**Fig.2.15**) par une caractéristique de la tension d'amorçage U peu dépendante de la durée de retard à l'amorçage τ , donc peu dépendante du front de l'onde incidente.

A l'heure actuel, le parafoudre est considéré comme la méthode sûr et fiable de protection des réseaux électriques contre les surtensions atmosphériques. [22]

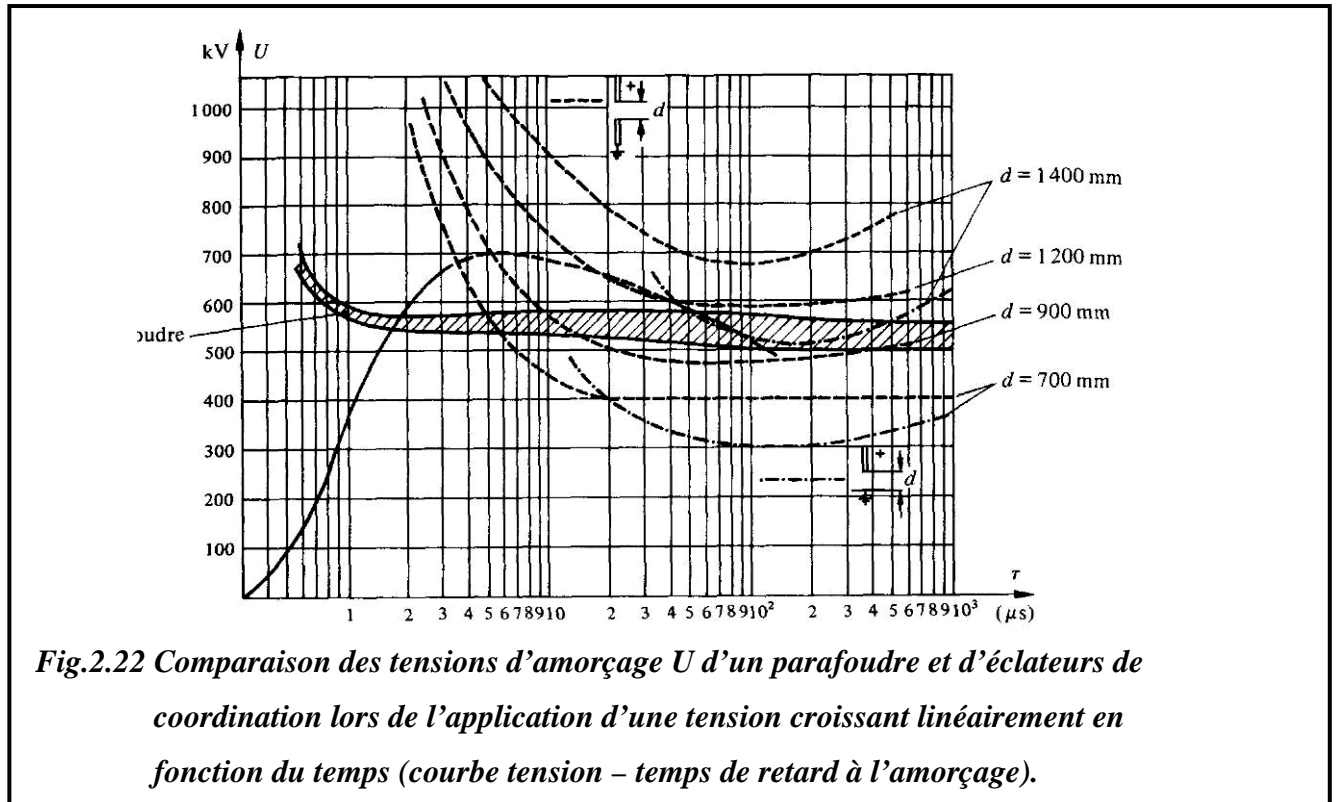


Fig.2.22 Comparaison des tensions d'amorçage U d'un parafoudre et d'éclateurs de coordination lors de l'application d'une tension croissant linéairement en fonction du temps (courbe tension - temps de retard à l'amorçage).

2.7.2.2.4 Tension normale du parafoudre

La tension normale d'un parafoudre est la valeur spécifiée maximum de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes de ligne et de terre ne présentant aucun risque d'amorçage (**Tableau.2.05**)

0.175	3	9	18	30	42	75	108	150
0.280	4.5	10.5	21	33	51	84	120	174
0.500	6	12	24	36	54	96	126	186
0.660	7.5	15	27	39	60	102	138	198

Tableau.2.05 Tensions nominales normales des parafoudres en KV.

Les valeurs normales des tensions normales des parafoudres sont données en Kilovolts, valeur efficace.

Pour les tensions normales supérieures à **198 KV**, les valeurs normales des parafoudres seront déterminées suivant les indications figurant sous [25].

2.7.2.2.5 Courant de décharge

Le courant de décharge est le courant écoulé par le parafoudre après un amorçage et provenant d'une onde de surtension propagée par la ligne.

2.7.2.2.6 Courant de suite

Le courant de suite d'un parafoudre est le courant débité par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge.

2.7.2.2.7 Tension résiduelle d'un parafoudre

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

2.7.2.2.8 Tension d'amorçage a fréquence industrielle

La tension d'amorçage à fréquence industrielle d'un parafoudre est la valeur efficace de la plus basse tension à fréquence industrielle qui, appliquée entre bornes de parafoudre, provoque l'amorçage du parafoudre.

2.7.2.2.9 Tension assigné

Ou bien tension d'extinction ; c'est la tension maximale à fréquence industrielle pour laquelle le parafoudre est capable de se désamorcer spontanément.

2.7.2.2.10 Tension d'amorçage au choc d'un parafoudre

La Tension d'amorçage au choc d'un parafoudre est la valeur la plus élever de la tension qui est atteinte avant le passage du courant de décharge quand une onde de forme et de polarité donnée est appliquée entre les bornes d'un parafoudre.

2.7.2.2.11 Niveau de protection au choc de foudre

Le Niveau de protection au choc de foudre d'un parafoudre est caractérisé par les tensions suivantes :

- La tension d'amorçage sous un choc de foudre plein normalisé.
- La tension de résiduelle (de décharge) sous le courant normal normalisé choisi.
- La tension d'amorçage du front d'onde.

2.7.2.2.12 Niveau de protection au choc de manœuvre

Le Niveau de protection au choc de manœuvre d'un parafoudre est caractérisé par les tensions suivantes :

- La tension maximale d'amorçage pour la forme d'onde normalisée.
- La tension totale aux bornes du parafoudre qui est maintenue par le parafoudre au cours des décharges en surtension de manœuvre.

2.7.2.2.13 Méthode de protection par parafoudre à résistance variable

Lorsque le parafoudre n'est pas placé à proximité de l'appareil à protéger, ce dernier est soumis à une surtension supérieure au niveau de protection du parafoudre.

Cette surélévation est due à :

- La chute de tension inductive dans les connexions du parafoudre et dans la liaison entre parafoudre et appareil à protéger.
- Un accroissement de courte durée de la tension aux bornes de l'appareil par rapport au niveau de protection du parafoudre, si la durée de propagation entre parafoudre et appareil n'est pas négligeable devant la durée de front de l'onde incidente.

Aussi, en règle générale, installe-t-on le parafoudre aussi près que possible de l'appareil à protéger. En particulier, il vaut mieux, soit monter le parafoudre sur cuve de transformateur soit relier la borne à haute tension et la borne de terre du parafoudre aux bornes correspondantes du transformateur par des connexions les plus courantes possibles.

De même, il faut placer les parafoudres à proximité des câbles, lorsqu'une telle protection est nécessaire, et disposer des connexions aussi courantes que possible entre les bornes du parafoudre, d'une part, le conducteur de phase et la gaine du câble, d'autre part.

Dans le cas où les parafoudres sont placés près de l'appareil à protéger, les coefficients de sécurité suivants sont recommandés :

- Pour le matériel de gamme **A** (**Tableau.2.06**), on prend un coefficient de sécurité de l'ordre de **1,4** entre le niveau de tenue aux chocs de foudre de l'appareil à protéger et le niveau de protection aux chocs du parafoudre.
- Pour la gamme **B**, on prend généralement des coefficients de sécurité d'au moins **1,2** entre les mêmes niveaux.
- Pour la gamme **C**, on prend généralement des coefficients de sécurité d'au moins **1,15** pour les surtensions de foudre.

Il est généralement plus facile d'installer des parafoudres à proximité de l'appareil à protéger dans la gamme de tension **A** que dans les gammes de tension **B** ou **C**.

La surélévation due aux différences citées ci-dessus dépend de plusieurs conditions :

- Distance du parafoudre.
- Emplacement en amont ou en aval de l'appareil à protéger.
- Caractéristiques de la ligne.
- Capacité de l'appareil à protéger.
- Configuration du poste.
- Raideur de l'onde incidente.

Niveau de tension	Gamme de tension	Tension nominale (composée) du réseau (Kv) _{eff}		Tension (composée) la plus élevée pour le matériel (Kv) _{eff}
		Suite I	Suite II	
Moyenne tension (MT)	A	(3) ⁽¹⁾	(3,3) ⁽¹⁾	(3,6) ⁽¹⁾
		(6) ⁽¹⁾	(6,6) ⁽¹⁾	(7,2) ⁽¹⁾
		10	11	12
		(15)	-	(17,5)
		20	22	24
		-	(33) ⁽²⁾	(36) ⁽²⁾
		(35) ⁽²⁾	-	(40,5) ⁽²⁾
Haute tension (HT)	B	-	(45)	(52)
		69	66	72,5
		115	110	123
		138	132	145
		-	(150)	(170)
		230	220	245
Très haute tension (THT)	C	300	-	(362)
		400	380	420
		-	-	525 ⁽³⁾
		735	750	765 ⁽⁴⁾
Ultra haute tension (UHT)	D	-	-	1200 ⁽⁵⁾

Tableau.2.06 classes des tensions efficaces normales recommandées par la CEI pour des fréquences de service de (50 ÷ 60) Hz

Ces réseaux sont en générale des réseaux à trois conducteurs. Les valeurs indiquées désignent la tension composée entre phases.

Les valeurs indiquées entre parenthèses doivent être considérées comme non préférentielles. Il est recommandé de ne pas utiliser ces valeurs pour les nouveaux réseaux à établir à l'avenir.

- (1) Ces valeurs ne devraient pas être utilisées pour les réseaux de distribution publique.
- (2) L'unification de ces valeurs est à l'étude.
- (3) La valeur **550KV** est aussi utilisée
- (4) L'augmentation de cette valeur jusqu'à une limite de **800KV** est à l'étude
- (5) La normalisation au-delà de **750KV** est à l'étude

2.7.2.2.14 Méthode de protection par éclateur

La courbe représentant la caractéristique tension-temps d'amorçage au choc d'un éclateur est habituellement beaucoup plus incurvée (*Fig.2.22*) que celles de certains types d'appareils à protéger, en particulier, celles des transformateurs et des câbles.

Par suite de la forme incurvée de la courbe représentant la caractéristique tension-temps d'un éclateur de distance pour laquelle la protection est assurée pour toutes les surtensions est généralement très faible, en générale inférieur à quelques mètre.

Un éclateur est donc appelé à fonctionner assez fréquemment sous l'action de surtension de foudre, et de temps en temps sous l'action de surtension de manœuvre.

Dans un grand nombre de cas, le fonctionnement d'un éclateur provoque l'amorçage d'un courant de suite, si l'alimentation peut être rétablie rapidement grâce à des réenclenchement automatiques, on peut choisir un réglage de l'éclateur assurant un degré de protection acceptables pour les appareils, sans provoquer pour les consommateurs, un trop grand nombre d'interruptions gênante de l'alimentation.

Des coefficients de sécurité de l'ordre de ceux données pour les parafoudres assurent en général une protection satisfaisante, à condition d'exclure la possibilité d'ondes à front très raides. [22]

2.7.2.2.15 Types des parafoudres

Jusqu'à aujourd'hui, on distingue les différents types de parafoudres suivants :

- Parafoudre au carbure de silicium et à éclateur moyenne tension (**MT**)
- Parafoudre au carbure de silicium et à éclateur haute tension (**HT**)
- Parafoudre a oxyde de zinc
- Les nouveaux parafoudres qui sont :

- ❖ Parafoudre à enveloppe synthétique
- ❖ Parafoudre pour application spéciale

2.7.2.2.15.1 Parafoudre au carbure de silicium et à éclateur moyenne tension (MT) :

A - Constitution

La constitution de ce parafoudre est caractérisé par une ou plusieurs varistances non linéaires, au carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs (*Fig.2.23*)

L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote). L'étanchéité est primordiale pour éviter la corrosion des éclateurs, les contournements de la partie active et la modification des caractéristiques. En subdivisant l'intervalle d'amorçage en plusieurs éclateurs élémentaires, on stabilise les caractéristiques d'amorçage du parafoudre.

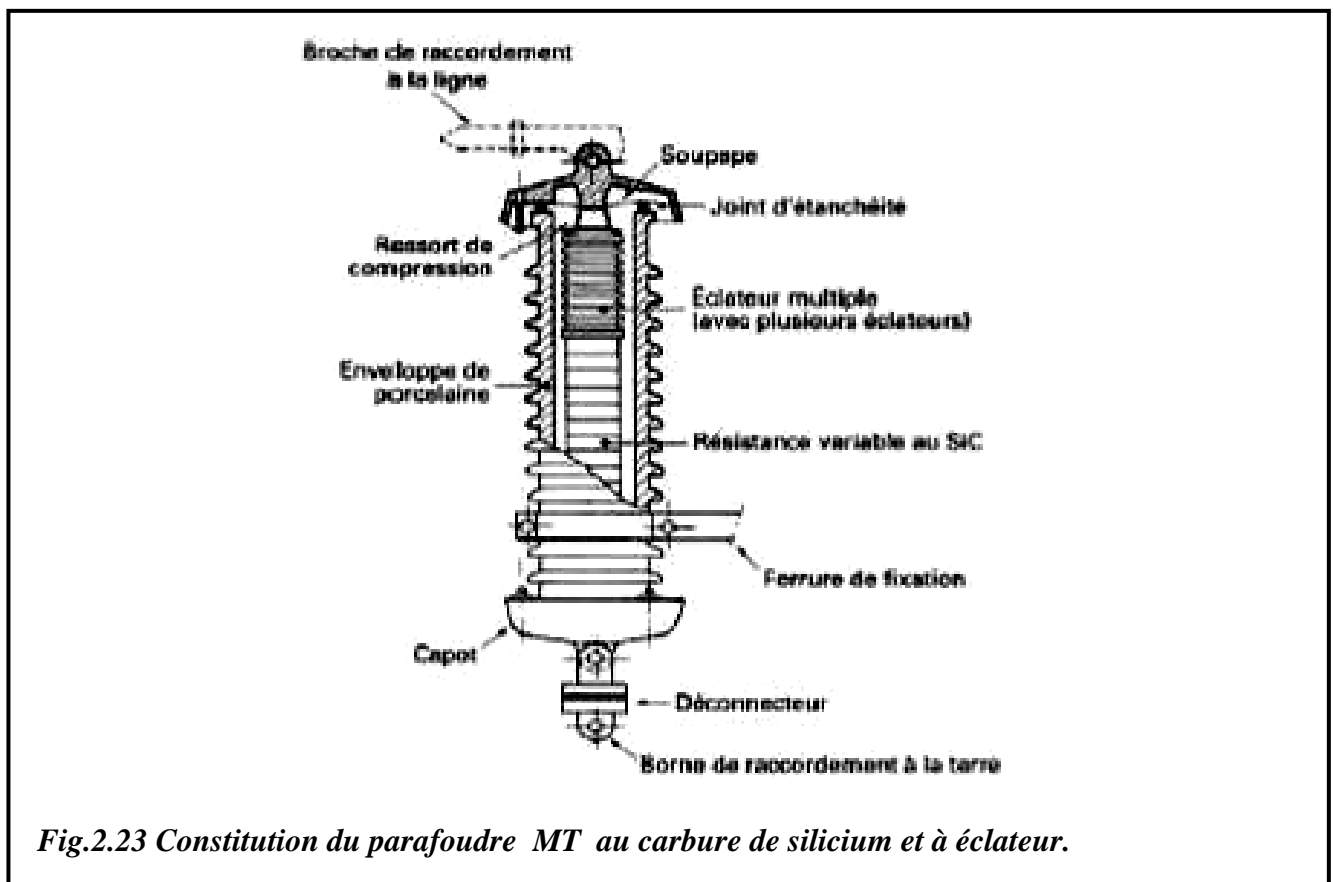


Fig.2.23 Constitution du parafoudre MT au carbure de silicium et à éclateur.

- Les éclateurs sont constitués de disque de laiton emboutis, empilés et séparés par de petites pièces isolantes en céramique.
- Les résistances variables sont constituées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disque dont les faces parallèles sont métallisées et le partour recouvert d'un revêtement isolant destinés à éliminer les contournements.

B- Fonctionnement

A l'état normal de fonctionnement de ce type de parafoudre, les éclateurs ne sont pas conducteurs. Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage (**Fig.2.24.**), les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge au travers des résistances dans la valeur est d'autant plus faible que le courant est élevé (caractéristiques non linéaire), ce qui permet de limité la surtension.

Après le passage du courant de décharge le parafoudre reste conducteur, mais la tension à ses bornes diminue et la non-linéarité des résistances entraîne une décroissance plus rapide du courant qui peut être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro.

Ainsi la surtension est écrêtée sans provoquer ni de défaut artificiel ni d'onde coupée, puisque la présence des résistances en séries avec les éclateurs évite l'effondrement de la tension après l'amorçage

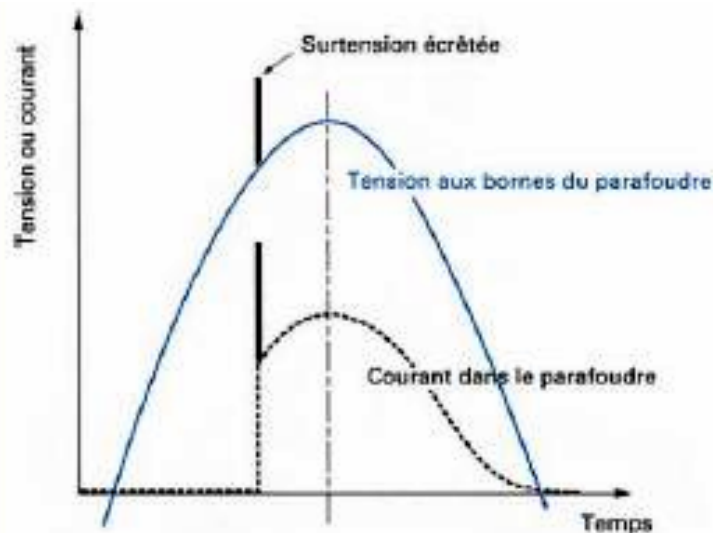


Fig.2.24 Fonctionnement du parafoudre *MT* au carbure de silicium et à éclateur.

2.7.2.2.15.2 Parafoudre au carbure de silicium et à éclateur *HT*

A- Constitution

En haute et très haute tension en cherche à améliorer le niveau de protection des parafoudres. Cela veut dire qu'il faut réduire d'une part, les tensions d'amorçages et d'autre part, la tension résiduelle au courant normale de décharge :

- Pour diminuer, en toute sécurité, les tensions d'amorçage il faut les stabiliser davantage. Pour se faire, on adjoint au montage utilisé en *MT* (**Fig.2.23**), Des systèmes de répartition de tension

composés de résistances non linéaires (*Fig.2.25*) et de condensateurs. Ces systèmes permettent de maîtriser la tension appliquée à chaque éclateur individuel.

Afin de diminuer les tensions d'amorçage, les éclateurs sont modifiés et sont ici constitués de deux électrodes de cuivre en regard, placés dans une chambre en céramique de forme cylindrique pour faciliter leur empilage avec les résistances non linéaires.

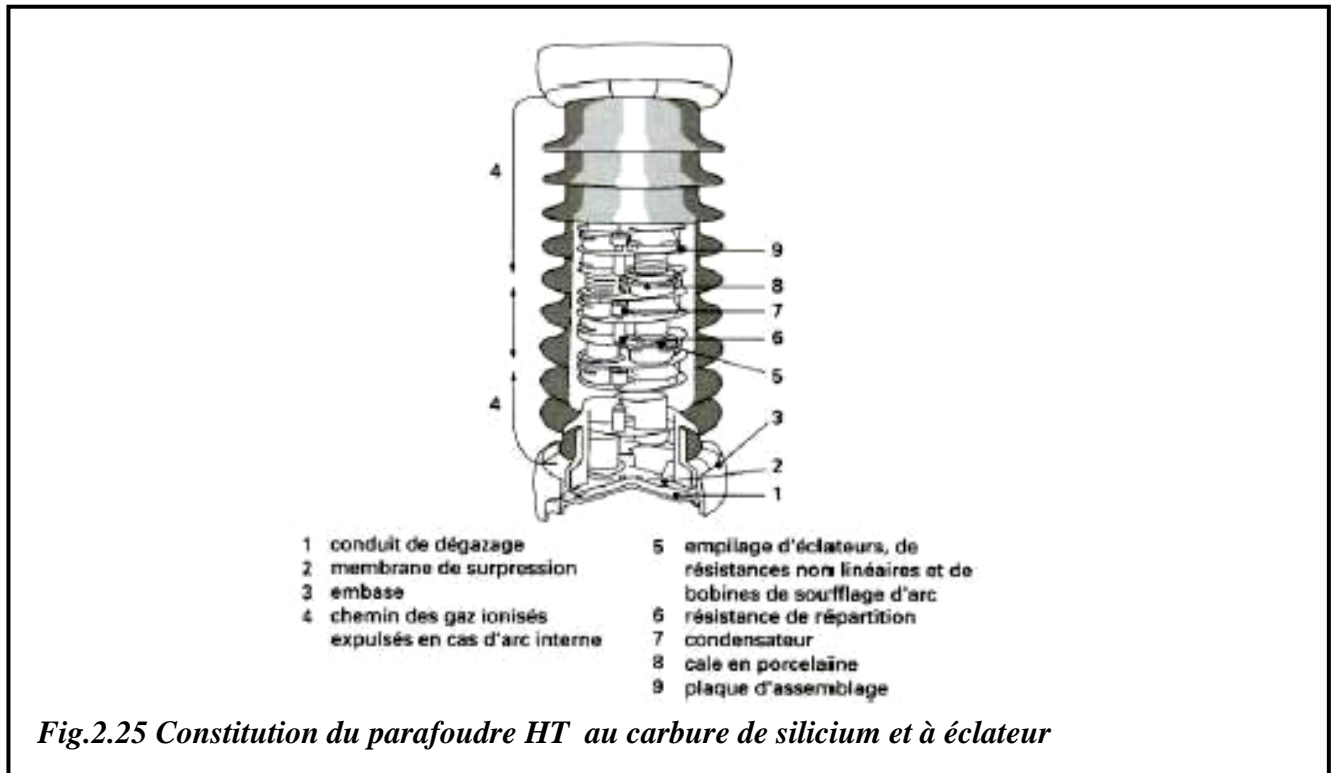


Fig.2.25 Constitution du parafoudre HT au carbure de silicium et à éclateur

- La diminution de la tension résiduelle au courant nominal de décharge et obtenue par l'emploi d'éclateurs à soufflage magnétique.

Les arcs, une fois allumée sont étirée dans la chambre en céramique sous l'effet d'un champs magnétique créés par une bobine parcourue par le courant traversant le parafoudre. Le profile cannelé de la chambre en céramique favorise l'allongement de l'arc. Ainsi, la tension d'arc étant considérablement augmentée, le parafoudre se désamorce spontanément bien avant le passage par zéro de la tension de service, limitant ainsi l'énergie à dissipée par les résistances non linéaires et facilitant la désionisation de l'air dans les chambres en céramiques.

B- Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un parafoudre *HT* au carbure de silicium est représenté par la (*Fig.2.26*) ;

- En régime permanent (*Fig.2.26-A*), le parafoudre est parcouru par le très faible courant (de l'ordre du milliampère) drainé par le système de répartition de tension.
- Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage (*Fig.2.26-B*), les éclateurs s'amorce et le courant augmente alors rapidement. La bobine présente vis-à-vis de ce courant

une impédance élevée et le courant s'écoule par l'intermédiaire des résistances non linéaires placées en parallèle sur la bobine de soufflage

- Après le passage de la surtension (*Fig.2.26-C*), les éclateurs fortement ionisés ne se désamorcent pas. Le courant traversant le parafoudre et alors issu du réseau. Son amplitude et ses variations sont beaucoup plus faibles, si bien que l'impédance de la bobine diminue considérablement et celle-ci va être, à son tour, parcourue par le courant. Sous l'effet du champ magnétique créé par cette bobine, l'arc est étiré dans la chambre en céramique, la tension d'arc augmente.
- Lorsque la tension d'arc atteint la tension appliquée au parafoudre, celui-ci se désamorce et retrouve le régime permanent (*Fig.2.26-D*)

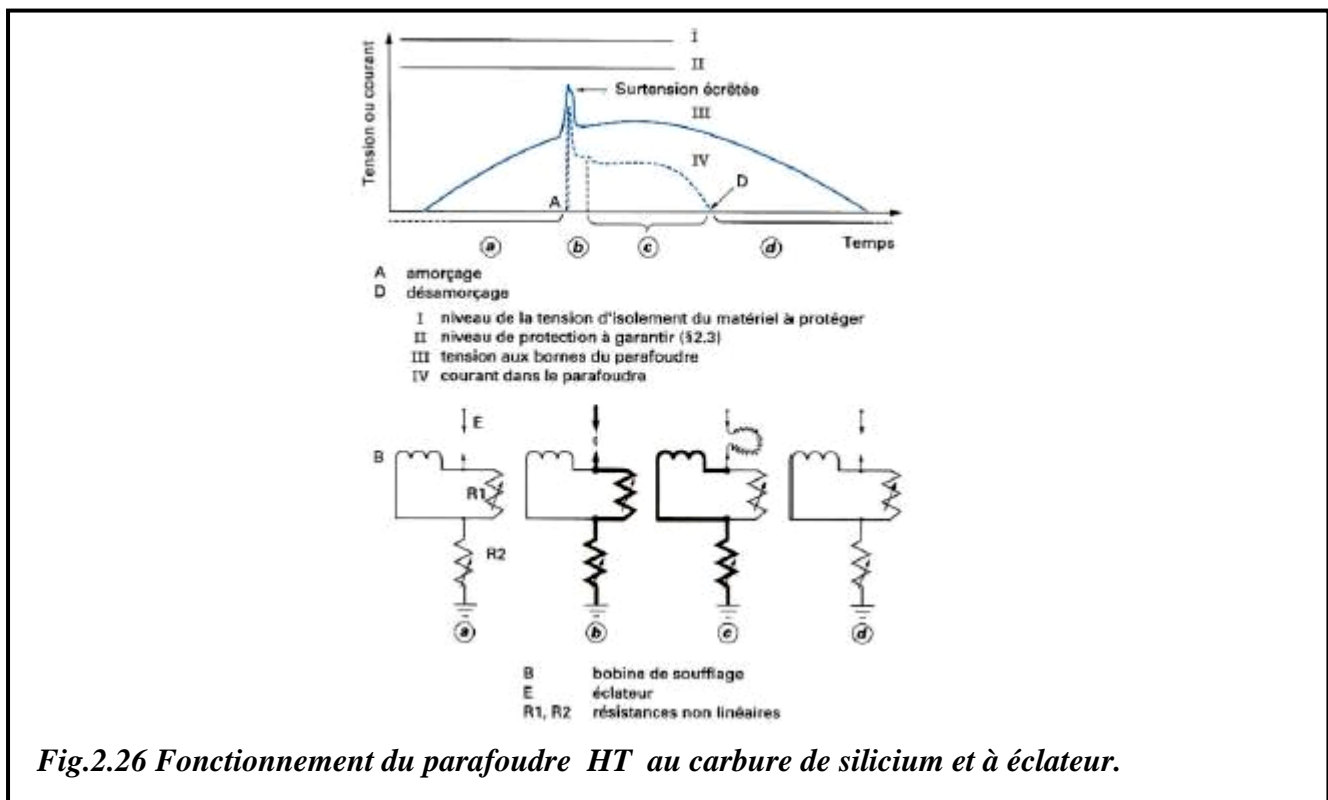


Fig.2.26 Fonctionnement du parafoudre HT au carbure de silicium et à éclateur.

C- Paramètres caractéristiques

Selon les normes NF C65-100 et CEI 99-1 on distingue les paramètres essentiels suivants :

(*Tableau.2.07*)

Paramètres caractéristiques	Tension efficace nominale du réseau			
	64KV	90KV	225 KV	400KV
Tension efficace assignée ; (KV)	75	102	246	378
Tension crête résiduelle au courant nominale de décharge (KV) (1)	190	255	615	900
Tension d'amorçage :				
- choc de foudre (2) :				
{ - valeur de crête maximale (KV)	190	255	615	900
{ - valeur de crête minimale (KV)	140	190	460	670
- Front de l'onde :				
{ - valeur de crête maximale (KV)	255	305	705	1050
{ - raideur du front (KV, MS)	625	830	1200	1200
- Choc de manœuvre (3) :				
valeur de crête maximale (KV)	190	255	560	850
- Fréquence industrielle (à sec et sous la pluie) :				
{ - valeur efficace maximale (KV)	140	190	395	600
{ - valeur efficace minimale (KV)	110	150	330	510
Courant crête nominale de décharge (KV) (A)	5	5	10	10

Tableau.2.07 Valeurs des paramètres caractéristiques des parafoudres au carbure de silicium et à éclateur du réseau Français de transport d'électricité.

(1) : onde normalisée 8/20 μ s de forme bi-exponentielle

(2) : onde normalisée 1.2/50 μ s de forme bi-exponentielle

(3) : onde normalisée dont le temps de montée à la valeur maximale est de 250 μ s et de forme bi-exponentiel.

Nota

Une onde de 8/20, est une onde dont le temps de montée à la valeur maximale est 8 μ s et la durée jusqu' à la mi-valeur en retombée 20 μ s.

2.7.2.2.15.3 Parafoudre à oxyde de zinc

C'est un parafoudre dont ses varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc.

A- Constitution

La technologie des parafoudres à éclateurs dépend fortement du niveau de tension considérée, mais ces nouveaux composants sont de la moyenne aux plus hautes tensions, constitué simplement d'un empilage de résistances non linéaires à oxyde de zinc. Par fois, mais uniquement pour les très

hautes tensions, ils comportent quelques capacités additionnelles placées en parallèle sur les varistances à la partie supérieure des parafoudres et destinée à améliorer les répartitions des tensions le long de la colonne de varistance. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou en matériau synthétique.

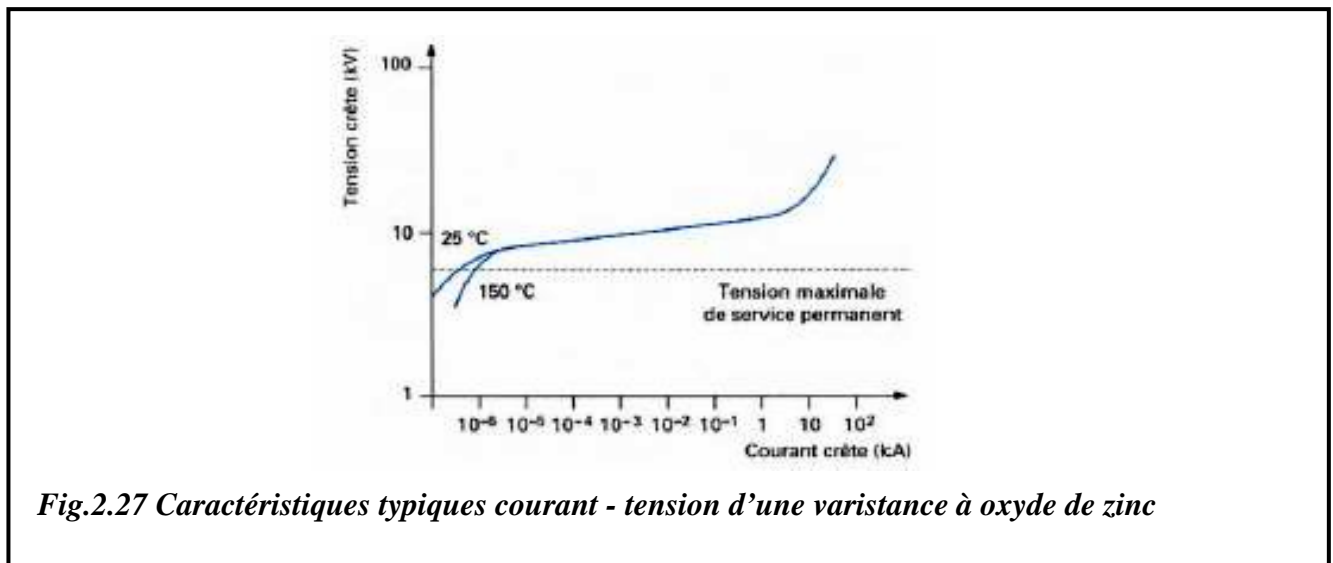
Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonymes de facilité de construction.

B- Fonctionnement

Tout l'intérêt de la varistance à base d'oxyde de zinc réside dans sa caractéristique courant-tension (*Fig.2.27*).

Sous la tension de service permanent, son impédance est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une tension apparaît, la résistance diminue rapidement, la varistance écrête la surtension en lui livrant un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre.

La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0.1 mA à 10 kA , la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal.



C- Paramètre caractéristiques

On trouve sur (*Tableau.2.08*) des données numériques relatives aux parafoudres à oxyde de zinc actuellement disponible sur le marché.

<i>Paramètres caractéristiques</i>	<i>Tension efficace nominale du réseau</i>				
	<i>20KV</i>	<i>63KV</i>	<i>90KV</i>	<i>225 KV</i>	<i>400KV</i>
<i>Tension efficace la plus élevée pour le matériel à protéger ; (KV)</i>	24	72.5	100	245	420
<i>Tension efficace assignée ; (KV)</i>	21 à 26	54 à 84	84 à 96	180 à 228	330 à 420
<i>Courant crête nominale de décharge (1) (KV)</i>	5	5	5	10	10
<i>Tension crête résiduelle au courant nominale de décharge (KV)</i>	60 à 73	117 à 183	194 à 222	416 à 527	718 à 914
<i>Tension crête résiduelle au Choc de manœuvre (2) (KV)</i>	52 à 63	105 à 163	163 à 187	350 à 443	642 à 817

Tableau. 2. 08 Exemple des paramètres caractéristiques des parafoudres à oxyde de zinc.

(1) : Onde normalisée $8/20 \mu s$ de forme bi-exponentielle

(2) : Lorsque le parafoudre est traversé par une onde de courant de manœuvre d'amplitude $1KA$

2.7.2.2.15.4 Nouveau Parafoudre

A- Parafoudre à enveloppe synthétique

De puis le début des années quatre-vingt, un nouveau palier technologique a été franchi avec l'émergence des parafoudres à oxyde de zinc à enveloppe synthétique (**Fig.2.28**).

L'enveloppe de porcelaine a été remplacé par une enveloppe synthétique, soit directement moulée sur la colonne de varistance, soit ménageant une couche d'air entre l'enveloppe et la colonne de varistance.



Fig.2.28 Parafoudre HT à oxyde de zinc et enveloppe synthétique protégeant un transformateur MT / BT.

A. 1 Avantages

Les avantages principaux du parafoudre à enveloppe synthétique par rapport aux parafoudres enveloppe de porcelaine sont :

- une conception plus simple ;
- une plus grande légèreté ;
- une meilleure étanchéité ;
- un comportement plus favorable en cas de défaillance interne (court-circuit) lors de la quelle les manifestations externes (projection de débris) sont très limitées.

A. 2 Inconvénients

L'enveloppe en matériau synthétique est plus sujette au vieillissement sous l'action combiné des courants de fuite, de la pollution et du rayonnement solaire.

B- Parafoudre pour application spéciale

Les avantages procurés par le parafoudre à enveloppe synthétique en terme de légèreté et de sécurité ont permit de trouver un nouveau champ d'application aux parafoudres à haute tension. Il s'agit de celui des parafoudres de ligne, qui sont installés en parallèle des chaînes d'isolateurs.

Ces parafoudres présentent généralement un intervalle d'air, en série avec la partie active, qui s'amorce en cas de surtension, permettant ainsi aux éléments non linéaires du parafoudre d'évacuer à la terre la surintensité, puis de bloquée le courant de suit (c'est-à-dire, le courant qui suit l'amorçage).

A titre d'exemple, des tronçons entiers de ligne ont été équipés notamment au JAPON, avec ce type de parafoudre afin d'améliorer la qualité de fourniture en énergie. [26]

2.7.2.2.15.5 Installation des parafoudres

A- Distance de protection

La protection offerte par un parafoudre est très locale. Ainsi, il ne suffit pas de connaître le niveau de protection du parafoudre pour connaître la surtension effectivement appliquée au matériel à protéger.

La distance maximale admissible entre le transformateur et le parafoudre est directement liée au rapport entre le niveau de protection du parafoudre et le niveau d'isolement du transformateur [27].

Sur (*Tableau.2.09*) on trouve les valeurs retenues sur le réseau de transport d'électricité français à haute et très haute tension pour les parafoudres à oxyde de zinc

<i>Caractéristiques d'installation</i>	<i>Tension efficace nominale du réseau</i>					
	<i>63KV</i>	<i>90KV</i>	<i>225 KV</i>		<i>400KV</i>	
<i>Niveau d'isolement des transformateurs (1) ; (KV)</i>	325	450	650	900	1175	1425
<i>Niveau de protection des parafoudres ; (KV)</i>	180	235	475	475	850	850
<i>Distance maximale entre le parafoudre et le transformateur (2) ; (m)</i>	30	30	(2)	40	20	40

Tableau.2.09 Distances d'installation des parafoudres à oxyde de zinc sur le réseau de transport d'électricité français.

(1) : Valeur de crête donnée en choc de foudre

(2) : Le parafoudre est placé directement sur le transformateur.

B- Qualité de service

Les parafoudres sont utilisés pour offrir une meilleure fiabilité dans la fourniture de l'électricité puisque leur fonctionnement, contrairement à celui des éclateurs, n'est pas assimilable à un défaut et n'engendre donc pas d'interruption de service. Cet avantage peut être décisif sur les réseaux de distribution de l'électricité où sont reliés des équipements fragiles tels que des robots, des ordinateurs, des chaînes automatisées, etc.

2.7.3 Protection 3^{ème} niveaux

Ce niveau de protection est appliqué en basse tension (**BT**) et pour les équipements sensibles.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié les niveaux de protection contre les risques de foudres.

Les deux premiers niveaux de protections sont constitués des moyens suivants :

- Paratonnerres ;
- Cages maillées ;
- Fils tendus ;
- Eclateurs ;
- Parafoudres.

Le troisième niveau de protection est dessiné pour les basses tensions.

Après une étude comparative entre ces différents moyens de protection contre les effets de foudre, on a conclu que la protection fiable et efficace des réseaux électriques à haute et très haute tension consiste à utiliser les parafoudres à oxyde de zinc et sans éclateurs.

Dans le cinquième chapitre on prend le réseau EHR-RDL-SKD-EKB-EHR pour choisir les moyens adéquats afin de déterminer les risques de foudres.

Chapitre

3

Modélisation de la ligne électrique

3.1 Introduction

Dans cette partie nous allons définir et calculer les caractéristiques longitudinales et transversales d'une ligne aérienne à haute tension (220 kV). Les résultats d'une analyse des caractéristiques longitudinales et transversales (R , L , et C) d'une ligne électrique sont vitales dans le cadre de la modélisation d'un réseau électrique, c'est pourquoi nous allons établir la modèle mathématique de celui-ci. Le modèle mathématique d'une ligne électrique doit être adapté au problème étudié (posé) et sera différent suivant qu'il existe ou non un courant dans le sol et suivant la rapidité du phénomène étudié.

3.2 Paramètres d'une ligne électrique

3.2.1 Schéma équivalent d'une ligne

Une ligne aérienne de longueur quelconque fonctionnent en régime symétrique sinusoïdal, peut être représentée (*Fig.3.01*) par un schéma équivalent en π .

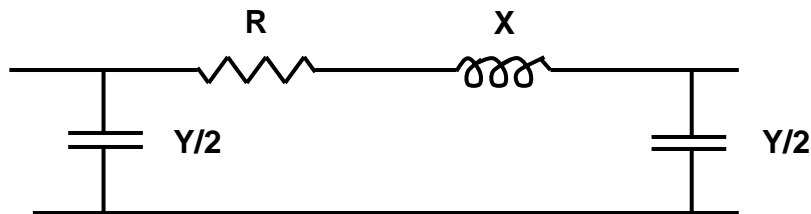


Fig.3.01 : Schéma équivalent en π d'une ligne aérienne.

Le schéma est composé de :

- L'impédance effective longitudinale (Z_l) composée de la résistance linéique (R_l) et la réactance linéique (X_l) ; ces paramètres peuvent être exprimés par les formules suivantes :

$$Z_{longitudinale} = R_l + jX_l \quad ; \quad \Omega / m \quad (3.01)$$

- L'indépendance effective transversale (Z_t) composée de la susceptance linéique (B_l) dont $B_l = \omega c$, et de la conductance transversale (G_t) d'où pour les lignes aériennes $G_t = 0$.

$$Z_t = Y = j \cdot \omega \cdot c \quad ; \quad s/m \quad (3.02)$$

3. 2. 2 Résistivité

Portons de la loi d'Ohm locale :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad ; \quad A/m^2 \quad (3.03)$$

Où :

J : est la densité de courant en (A/m^2)

σ : est la conductivité électrique en ($\Omega^{-1}m^{-1}$).

E : est le champ électrique en (V / m).

La loi de POUILLET s'en déduit aisément pour un conducteur de longueur l (m), de section S (m^2) et de conductivité σ ($\Omega^{-1}m^{-1}$), parcouru par un courant continu, nous trouvons :

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad ; \quad \Omega \quad (3.04)$$

Où :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad : \quad \text{est la résistivité du conducteur en } (\Omega m).$$

Par extension, la loi d'Ohm est utilisée en régime quasi-stationnaire. Ce régime introduit des modifications dans la répartition du courant dans les conducteurs. Les courants alternatifs qui circulent dans les conducteurs créent un champ d'induction magnétique qui existe non seulement entre les conducteurs, mais aussi à l'intérieur de ceux-ci. Un contour fermé à l'intérieur d'un conducteur embrasse un flux d'induction variable et se trouve être le siège d'une tension induite, qui provoque à

son tour des courants induits dans le métal. Ces courants appelés courants de FOUCAULT modifient la répartition du vecteur \vec{J} densité de courant admise uniforme en première approximation. Plus la fréquence est élevée et l'épaisseur des conducteurs forte, plus l'effet des courant de FOUCAULT est important.

La répartition du courant à l'intérieur d'un conducteur plein ou d'un faisceau de conducteurs est différente en courant alternatif de ce qu'elle est en courant continu.

Pour un conducteur, le courant utilisera essentiellement la surface externe du conducteur (effet pelliculaire). Pour un faisceau de conducteurs, le courant empruntera la surface interne des conducteurs (effet de proximité).

Lors d'un défaut à la terre, les courants de retour par la terre circulent essentiellement en surface (effet pelliculaire) et suivant le tracé de la ligne (effet de proximité).

La difficulté d'introduire dans les calculs le conducteur terre provient du fait que les dimensions de la couche de terre par où passe le courant sont males définies, que la répartition du courant dans cette couche n'est pas uniforme et que la résistivité du sol est irrégulière dans l'espace et variable au cours du temps. Nous devons aussi nous attendre à trouver toutes sorte de canalisations enterrées (eau, gaz, câbles,...) particulièrement aux voisinage des lignes électriques. La résistivité du sol peut ainsi varier suivant l'endroit et les conditions météorologiques entre $0,1$ et $10^9 \Omega.m$. la résistance du sol dépend très fort de la fréquence, du courant et de la résistivité du sol (Fig.3.02).

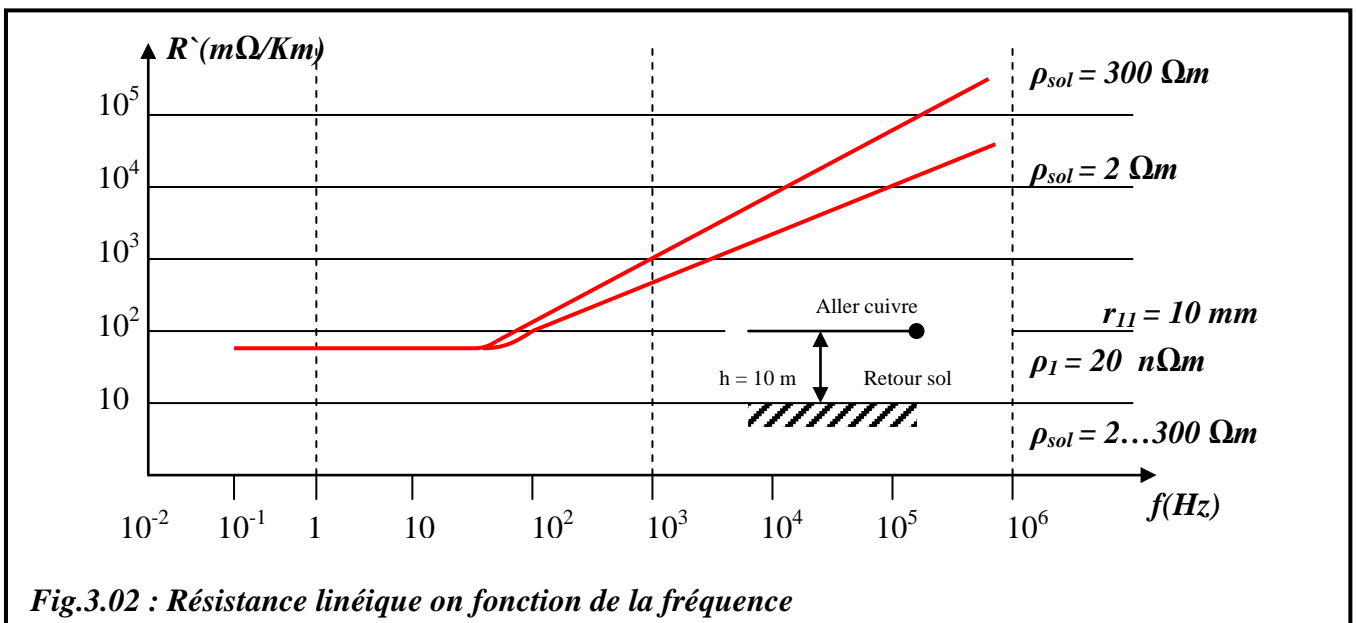


Fig.3.02 : Résistance linéique on fonction de la fréquence

Pour un courant de fréquence $50 Hz$, la profondeur de pénétration pour un conducteur de cuivre vaut $10 mm$ et pour un sol de résistivité $2 \Omega.m$ elle vaut $100 m$. nous pouvons donc assimiler le sol à un conducteur de $100 m$ de rayon. La résistance du sol est donc de $70 m\Omega/Km$.

La résistivité d'un matériau croît avec la température selon la loi :

$$\rho_{\theta} = \rho_0(1 + \alpha\theta) \quad ; \quad \Omega m \quad (3.05)$$

Où :

ρ_0 : est la résistivité du conducteur à 0°C en (Ωm) .

α : est le coefficient de température en $(^{\circ}\text{C}^{-1})$.

θ : est la température en $(^{\circ}\text{C})$.

3.2.2.1 Effet pelliculaire

En régime variable la densité du courant n'est plus uniforme à l'intérieur du conducteur, elle est plus grande en surface qu'à l'intérieur.

En première approximation, on tient compte de l'effet de peau (effet pelliculaire) en remplaçant le conducteur plein par un conducteur creux fictif de même rayon et d'épaisseur δ avec :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}} \quad ; \quad m \quad (3.06)$$

Où :

δ : est appelé la profondeur de pénétration de l'effet pelliculaire ou l'effet de peau en (m) ;

ρ : la résistivité du conducteur en (Ωm) ;

μ_0 : perméabilité du vide en (H/m)

μ_r : perméabilité relative du conducteur ;

ω : pulsation du courant en (rd/s) ; $(\omega = 2\pi f)$ avec f la fréquence.

La densité de courant en surface est d'autant plus marquée que l'épaisseur d'un matériau est grande ou que ω est élevée.

Alors la profondeur de pénétration de l'effet pelliculaire ou effet de peau est définie comme δ . [28]

3.2.2.2 Effet de proximité

Généralement, on pourrait démontrer que, pour les conducteurs multiples (faisceaux de 2 ou plusieurs conducteurs élémentaires), le courant alternatif se répartit différemment du courant continu. Plus la fréquence est élevée, plus les courants alternatifs ont tendance à choisir des chemins d'aller et de retour aussi voisins que possible. C'est ce que l'on nomme l'effet de proximité [29]. C'est ainsi que le courant de retour par le sol suit le tracé de la ligne, même si elle n'est pas rectiligne.

3.2.3 Réactance longitudinal (Inductance)

Une inductance (supposée linéaire) est toujours le quotient d'un flux, embrassé par le contour, par le courant qui en est la cause. Elle est déterminée par la relation :

$$L_l = \Phi / i \quad ; \quad H \quad (3.07)$$

Où :

Φ : le flux induit par le courant en (wb) ;

i : le courant circulant dans le conducteur en (A) .

On a deux types d'inductances :

➤ **Inductance propre**

La self-inductance d'un conducteur électrique parcourus par un courant est défini à un instant donné comme étant le rapport entre les valeurs de flux induit par le courant et ce courant lui-même.

➤ **Inductance mutuelle**

L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs de phases, les conducteurs de différents termes et tous les conducteurs parcourus par un courant tel que le fil de garde et le retour par la terre.

3.2.4 Réactance transversale (capacité)

On assimile les lignes aériennes à un condensateur qui constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phases et la terre). A cause de la présence des charges, sur ces deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes sur ces deux-ci.

Si nous prenons comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence) ; la valeur de la tension des conducteurs de phase représente la différence de potentiel. La relation linéaire qui lie la charge électrique (q_+ , q_-) sur les deux conducteurs et la différence de potentiel entre ceux-ci est donnée par :

$$C=q/u \quad ; \quad F \quad (3.08)$$

3.2.5 Systèmes équilibrés et déséquilibrés

Les réseaux sont dit parfaitement équilibrés si les amplitudes des courants de phase et les amplitudes des tentions de phase-terre sont égaux c.à.d. $I_1= I_2= I_3= I$ et $U_1= U_2= U_3= U$.

Pour un système triphasé parfaitement équilibré, ce ci se traduit par :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I \sin \omega t \\ I_2 &= I \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = a^2 \cdot I \\ I_3 &= I \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) = a \cdot I \end{aligned} \right\}, A \quad (3.09)$$

Où :

$$I = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \quad , \quad A \quad (3.10)$$

Donc :

$$\sum_{K=1}^3 I_K = 0 \quad (3.11)$$

Ce qui signifie que la somme des courants de phase est nulle.

$$\left. \begin{aligned} U_{1n} &= U \sin \omega t \\ U_{2n} &= U \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = a \cdot U \\ U_{3n} &= U \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) = a^2 \cdot U \end{aligned} \right\}, V \quad (3.12)$$

Où :

$$U = \sqrt{2} \cdot U_{eff} \quad , \quad V \quad (3.13)$$

Et donc :

$$\sum_{K=1}^3 U_{Kn} = 0 \quad (3.14)$$

Ce qui signifie que la somme des tensions phase-neutre est nulle.

Certains réseaux peuvent être équilibrés soit en courant soit en tension.

Lors d'une perturbation sur une ligne électrique (foudre, défaut à la terre,...) les courants de phases ou les tensions phase-terre ne sont plus égaux. Nous avons un courant de retour qui circule soit par le fil de garde (s'il existe), soit par la terre.

Généralement nous avons deux types de systèmes déséquilibrés :

➤ **Système déséquilibré géométriquement**

Nous pouvons compenser un déséquilibre par des méthodes de transposition (ce qui consiste à inverser régulièrement les phases sur la longueur de la ligne électrique).

➤ **Système déséquilibré électriquement**

Ces systèmes sont traités par des méthodes de CLARCK ou de FORTESCUE.

- ❖ Les méthodes de CLARCK ou de FORTESCUE ; sont des méthodes qui permettent d'étudier à la place du système déséquilibré, tous sous système équilibré (direct, inverse, homopolaire), ce qui facilite l'analyse de ce système.

Dans ce cas, il faut tenir compte des conducteurs de phase mais aussi de fil de garde et de la terre.

3.2.6. Réseaux symétrique

Tous les réseaux électriques peuvent être représentés par une matrice d'impédance Z telle que :

$$[U] = [Z] \cdot [I] \quad , \quad V \quad (3.15)$$

Où :

U : est le vecteur de tension phase-neutre.

Z : est le vecteur courant de phase.

Tous les réseaux électriques équilibrés peuvent être découplés. Si de plus la matrice d'impédance Z est de symétrie au moins circulante telle que :

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_a & Z_b & Z_c \\ Z_c & Z_a & Z_b \\ Z_b & Z_c & Z_a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad , \quad V \quad (3.16)$$

Où :

Z : est la matrice de symétrie circulante.

Ce système peut se réduire à trois relations similaires mais déphasées de 120° . L'analyse du système total se réduit à l'étude d'une phase unique (gain de temps).

Si de plus la matrice d'impédance Z est de symétrie complète ($Z_b=Z_c$), le système se réduit à trois relation identiques et nous pouvons analyser uniquement une phase. [28]

3.3. Caractéristiques longitudinales

3.3.1 Introduction

Pour rendre compte des effets produits par la résistivité des métaux, qui constituent les conducteurs d'une ligne électrique, et par la résistivité du sol, considéré comme $n^{\text{ième}}$ conducteur, on va introduire les notions de résistances rapportées à l'unité de longueur ou résistance linéiques R'_1, R'_2, \dots, R'_n .

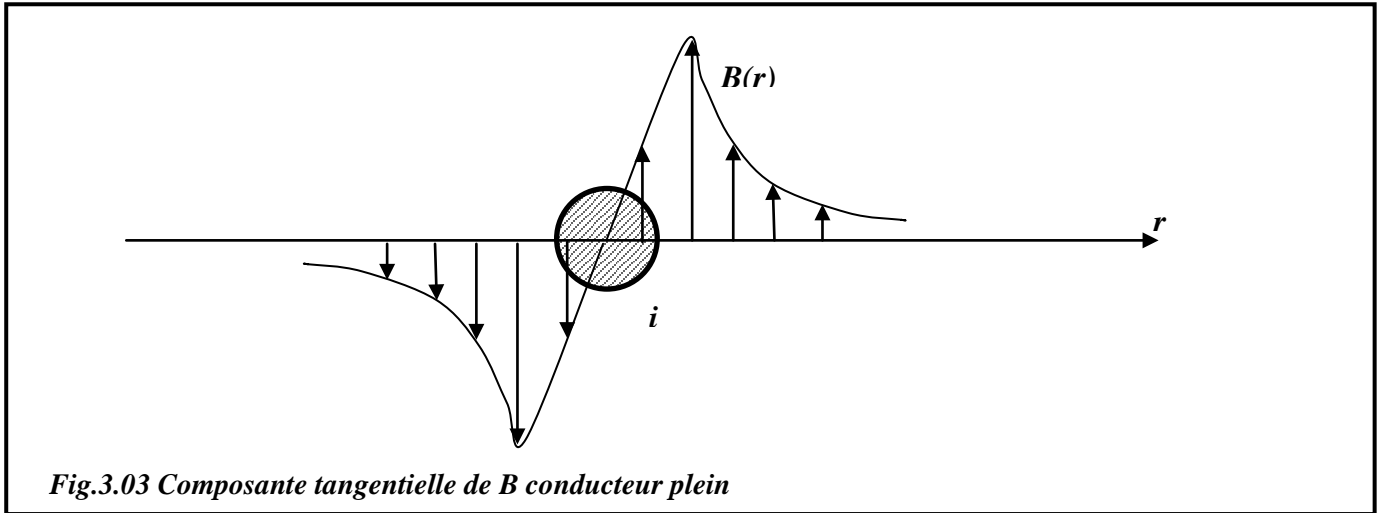
Pour rendre compte des effets des flux d'induction magnétique circulant autour et entre les conducteurs, voire à l'intérieur même de ceux-ci, on introduit les notions de l'inductance linéiques propres et mutuelles (M'_{ii}, M'_{ij}) ; (H/m).

3.3.2 Induction magnétique créée par un conducteur seul

Le passage d'un courant électrique i , dans un conducteur cylindrique de longueur supposée infinie, crée un champ d'induction magnétique circulaire dont la composante tangentielle à l'extérieur du conducteur est donnée par le théorème d'AMPÈRE :

$$B = \mu_0 i / 2\pi r \quad ; \quad T \quad (3.17)$$

Le schéma (Fig.3.03) représente $B = f(r)$ pour un conducteur plein, pour un courant continu $i = I$



3.3.3 Géométrie du système à n conducteurs :

Lorsqu'il y a plusieurs conducteurs, l'induction résultante est la somme des vecteurs d'inductions produits par chaque conducteur, pour autant qu'il n'y ait aucun corps saturable dans le voisinage.

Soit un ensemble de n conducteurs cylindriques et creux parcourus par les courants i_1, i_2, \dots, i_n .

Le sol est assimilé à un conducteur de propriété différente (l'indice n sera attribué à ce conducteur). [28]

Remarque : On calculera en première approximation toutes les inductances propres et mutuelles linéiques comme si tous les conducteurs étaient creux, puis on ajoutera le supplément de l'inductance mutuelle correspondant aux conducteurs pleins. Dans ce cas, on a l'expression de ceux-ci corrigés :

$$M'_{ij,corr} = M'_{ij} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rn} \cdot K_n}{8 \cdot \pi} \quad ; \quad H/m \quad (3.18)$$

$$M'_{ii,corr} = M'_{ii} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{ri} \cdot K_i}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rn} \cdot K_n}{8\pi} \quad ; \quad H/m \quad (3.19)$$

Avec : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (H/m)$

M'_{ij}, M'_{ii} : Les inductances linéique mutuelle et propres.

$\mu_{rn}, \mu_{ri} = 1$ (H/m), où elles sont les perméabilités relatives du conducteur commun n et du conducteur i .

K_n et K_i : sont des facteurs nuls si les conducteurs correspondants sont creux, ils prennent la valeur 1 s'ils sont pleins ou encore une valeur comprise entre 0 et 1 si le tube conducteur est non négligeable, ou lorsque on veut tenir compte de l'effet pelliculaire.

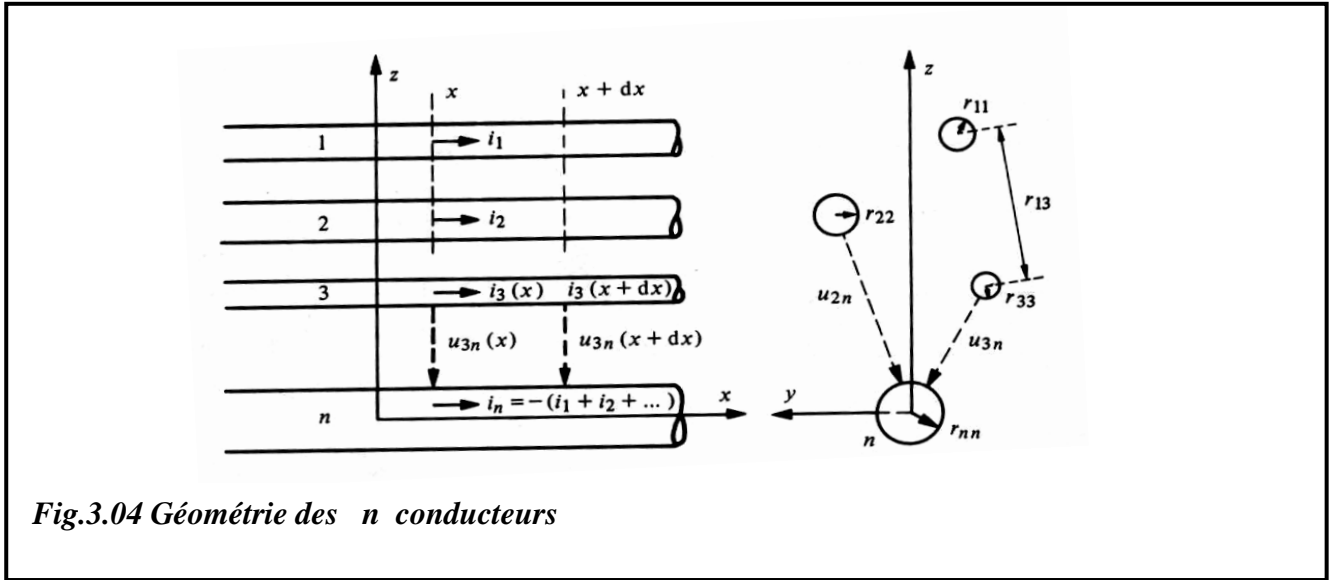


Fig.3.04 Géométrie des n conducteurs

Nous définissons les grandeurs suivantes qui se rapportent à (Fig.3.04) :

$r_{ij}=r_{ji}$: la distance entre axes de conducteurs i et j ;

r_{ij} : le rayon du conducteur i ;

e_i : l'épaisseur du tube i où ($e_i \ll r_{ii}$) ;

ρ_i : la résistivité du conducteur i ;

i_i : le courant dans le conducteur i , compté positivement dans le sens des X croissant.

i_n : le courant dans le conducteur de référence n ;

U_{ij} : la tension entre le conducteur i et le conducteur j ;

U_{in} : la tension transverse entre le conducteur i et le conducteur de référence n à l'abscisse X

$U'_{in} = \frac{\partial U_{in}}{\partial X}$: l'accroissement linéique de la tension U_{in} ;

$U'_{ij} = \frac{\partial U_{ij}}{\partial X}$: l'accroissement linéique de la tension U_{ij} .

3.3.4 Flux embrassé par deux conducteurs dans un système à conducteurs

Comme la somme des courants doit être nulle, on peut toujours choisir l'un de conducteurs comme conducteur de retour et comme conducteur de référence (c'est le cas pour le sol qui sera considéré comme le conducteur n).

On désignera par n le conducteur de référence et de retour avec :

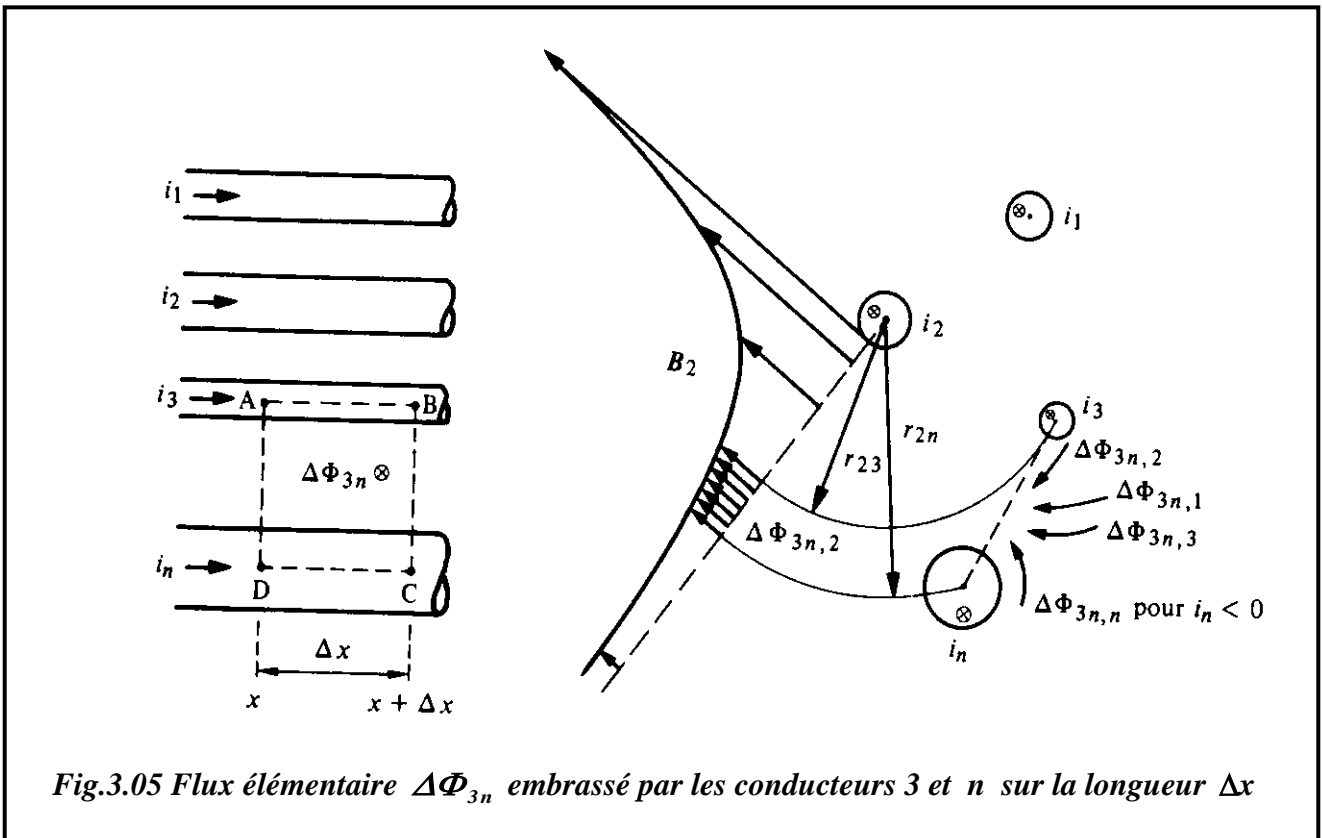
$$i_n = - (i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1}) \quad ; \quad A \quad (3.20)$$

On obtient de cette manière un ensemble de $(n-1)$ dispositions similaires formées par des paires de conducteurs 1 et n , 2 et $n, \dots, (n-1)$ et n . On peut donc limiter à l'étude d'une seule paire formée par un conducteur d'aller et le conducteur de retour n , les phénomènes restant semblables pour les autres paires. Par exemple pour la paire 3 et n (Fig.3.05), le flux élémentaire $\Delta\Phi_{3n}$ embrassé par ces conducteurs sur la longueur Δx est :

$$\Delta\Phi_{3n} = \Delta\Phi_{3n,1} + \Delta\Phi_{3n,2} + \Delta\Phi_{3n,3} + \Delta\Phi_{3n,n} \quad ; \quad Wb \quad (3.21)$$

Où :

$\Delta\Phi_{3n}$: est le flux d'induction embrassé par un rectangle $ABCD$ dont les cotés AB et CD sont situés respectivement dans les conducteurs 3 et n à des endroits quelconques à l'intérieur de ces derniers.



La liaison entre le flux embrassé et l'induction est donnée par le théorème de GAUSSE :

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds \quad ; \quad Wb \quad (3.22)$$

En précisant les limites de l'intégration dans les expressions des $\Delta\Phi_{3n,k}$ et tenant compte de l'équation (3.17), nous trouvons :

$$\Delta\Phi_{3n,1} = \Delta x \int_{r_{13}}^{r_{1n}} \mu_0 \cdot \frac{i_1}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{1n}}{r_{13}}\right) \cdot i_1 \quad ; \quad Wb \quad (3.23)$$

$$\Delta\Phi_{3n,3} = \Delta x \int_{r_{33}}^{r_{3n}} \mu_0 \cdot \frac{i_3}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{3n}}{r_{33}}\right) \cdot i_3 \quad ; \quad Wb \quad (3.24)$$

3.3.5 Tension induite entre deux conducteurs :

Choisissons un contour $ABCD$ qui passe à l'intérieur des conducteurs 3 et n et aux abscisses X et $X+\Delta X$ (Fig.3.05). La tension induite par la variation du flux d'induction dans le contour $ABCD$ est égale à la dérivée du flux embrassé dû à tous les courants voisins, y compris le courant propre (loi de LENZ) :

$$\oint E \cdot dI = -\frac{d\Delta\Phi_{3n}}{dt} \quad ; \quad V \quad (3.25)$$

On peut exprimer ces deux grandeurs en remontant aux définitions de la (Fig.3.05) :

$$\int_A^B E \cdot dI = R'_3 \cdot \Delta x \cdot i_3 \quad ; \quad V \quad (3.26)$$

Où :

$$R'_3 = \rho_3 / S_3 \quad ; \quad \Omega/m \quad (3.27)$$

$$\int_B^C E \cdot dI = U_{3n} + \frac{\partial U_{3n}}{\partial X} \Delta X \quad ; \quad V \quad (3.28)$$

$$\int_C^D E \cdot dI = -R'_n \cdot \Delta x \cdot i_n \quad ; \quad V \quad (3.29)$$

$$\int_D^A E \cdot dI = -U_{3n} \quad ; \quad V \quad (3.30)$$

$$\Delta\Phi_{3n} = \sum_{k=1}^n \Delta\Phi_{3n,k} \quad ; \quad Wb \quad (3.31)$$

Où :

$\Delta\Phi_{3n,k}$: est la part du flux dû au conducteur K ce qui nous donne pour le contour $ABCD$:

$$-\frac{d\Delta\Phi_{3n}}{dt} = R'_3 \Delta x i_3 + U_{3n} + U'_{3n} \Delta x - R'_n \Delta x i_n - U_{3n} \quad ; \quad Wb \quad (3.32)$$

R'_3 et R'_n : sont les résistances linéiques des conducteurs 3 et n définie par (3.33) où S_i est la section du conducteur i .

$$R'_i = \rho_i / S_i \quad ; \quad \Omega/m \quad (3.33)$$

$U'_{3n} = \frac{\partial U_{3n}}{\partial X}$: est l'accroissement linéique de tension.

3.3.6 Matrice des résistances et des inductances longitudinales linéiques

En exprimant les équations fondamentales (3.32) de la tension induite, on obtient l'équation matricielle des accroissements linéiques de tension U'_{in} le long du circuit formé par les conducteurs i et n dûs à la somme des résistances des conducteurs, ainsi qu'aux flux d'inductions mutuelles ou propres créés par l'ensemble des n courants : [22]

$$\begin{pmatrix} -U'_{1n} \\ -U'_{2n} \\ -U'_{(n-1)n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R'_1 + R'_n + SM'_{11}) & (R'_n + SM'_{12}) & \dots \\ (R'_n + SM'_{21}) & (R'_2 + R'_n + SM'_{22}) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Z'

Où :

$S = \frac{\partial}{\partial t}$: est l'opérateur de dérivation par rapport au temps, avec :

➤ L'inductance linéique mutuelle : $M'_{ji} = M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{jn} r_{in}}{r_{ij} r_{nn}}$; H/m (3.35)

➤ L'inductance linéique propre : $M'_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{in}^2}{r_{ii} r_{nn}}$; H/m (3.36)

➤ La tension linéique : $U'_{in} = \frac{\delta U_{in}}{\delta x}$; V/m (3.37)

Il faut tenir compte de la correction à apporter aux deux valeurs de l'inductance si le conducteur est plein (voir la remarque précédente).

3.3.7 Extension à système triphasé équilibré

Dans l'hypothèse d'un réseau « triphasé parfaitement équilibré » c.à.d $\sum_{k=1}^3 i_k = 0$, $I_n = 0$

Nous avons donc trois phases variant sinusoïdalement.

La relation matricielle (3.34) devient :

$$\begin{pmatrix} -U'_{1n} \\ -U'_{2n} \\ -U'_{3n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R'_1 + sM'_{11}) & sM'_{12} & sM'_{13} \\ sM'_{21} & (R'_2 + sM'_{22}) & sM'_{23} \\ sM'_{31} & sM'_{32} & (R'_3 + sM'_{33}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

Où :

$S = j\omega$; en tenant compte d'un réseau équilibré : $(i_1 + i_2 + i_3) = 0$

Nous avons donc :

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{mn}} \cdot (i_1 + i_2 + i_3) = 0 \quad (3.39)$$

Ce qui nous amène aux nouvelles expressions des inductances linéiques :

$$M'_{ij} = M'_{ji} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{jn} r_{in}}{r_{ij}} \quad ; \quad H/m \quad (3.40)$$

$$M'_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{in}^2}{r_{ii}} \quad ; \quad H/m \quad (3.41)$$

Elles sont maintenant indépendantes du rayon du conducteur de retour r_{mn} .

Les relations (3.40) et (3.41) nous permettent de découpler la matrice (3.38) en trois sous systèmes :

$$- U' = (R'_1 + S(M_{11} + aM_{12} + a^2M_{13})). I \quad (3.42)$$

De même pour les autres phases mais déphasée de 120° .

Dans le cas particulier d'une matrice d'impédance à symétrie complète telle que :

$$M'_{12} = M'_{13} = M'_{23} = M$$

$$M'_{11} = M'_{22} = M'_{33} = L$$

$$R'_1 = R'_2 = R'_3 = R'$$

Nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} -U' \\ -U' \\ -U' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R' + S(L - M) & 0 & 0 \\ 0 & R' + S(L - M) & 0 \\ 0 & 0 & R' + S(L - M) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ I \\ I \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

De même le cas d'une disposition non systématique, nous pouvons effectuer une transposition telle que :

$$\text{➤ L'inductance mutuelle équivalente : } M = \sum_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^3 \frac{M'_{ij}}{3} ; H \quad (3.44)$$

$$\text{➤ L'inductance propre équivalente : } L = \sum_{i=1}^3 \frac{M'_{ii}}{3} ; H \quad (3.45)$$

$$\text{➤ La résistance équivalente : } R' = \sum_{j=1}^3 \frac{R'_j}{3} ; \Omega \quad (3.46)$$

De ces transformations, nous obtiendrons trois relations identiques. Au lieu d'analyser tout le système, nous pouvons étudier uniquement le comportement d'une seule phase. [28]

$$U' = Z.I = (R + j.X) . I \quad (3.47)$$

Où :

Z : est l'impédance effectif ; (Ω/m)

$X = \omega(L-M)$: la réactance effective ; (Ω/m)

R : est la résistance linéique du conducteur ; (Ω/m)

L : est la self-inductance linéique ; (H/m)

M : est l'inductance linéique mutuelle linéique ; (H/m)

3.4 Caractéristiques transversales

3.4.1 Introduction

Dans l'établissement des caractéristiques longitudinales, on s'est occupé des phénomènes liés aux courants dans les conducteurs et aux champs magnétiques que ces courants créent, ce qui a permis de définir les caractéristiques longitudinales : R, M, L .

Lorsque il n'y a pas de courant dans le sol (c'est le cas d'un réseau équilibré), on peut complètement ignorer la présence du sol ce que l'on a pas le droit de faire pour l'étude des caractéristiques transversales.

Les caractéristiques transversales rendent compte des effets des charges superficielles des conducteurs de phase et de sol. Ces charges superficielles provoquent un champ électrique perpendiculaire à la surface des conducteurs qui engendre des courants capacitifs lorsqu'il varie.

Les phénomènes capacitifs liant les charges superficielles ou champ électrique transversal, donc au tension, sont représentés par des capacités linéiques C' .

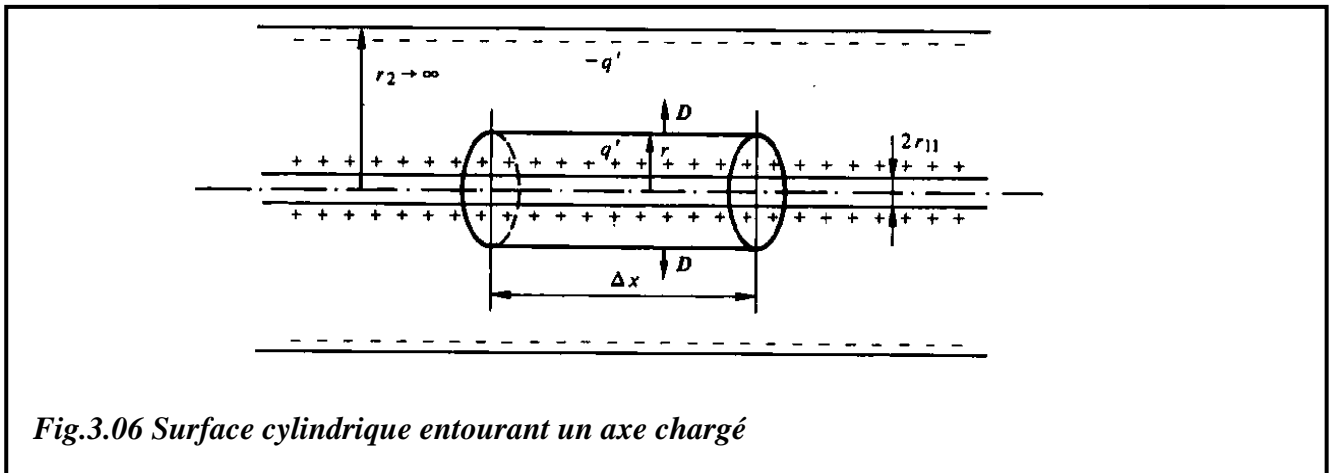
Pour le calcul des capacités linéiques transversales, le fait qu'un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre à la périphérie (loi de FARADAY).

3.4.2 Champ électrique d'un axe chargé

Soit un cylindre de longueur infinie (conducteur métallique fin et très long) dont la charge linéique est q' , la permittivité du milieu environnant étant $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

L'espace entourant le conducteur est limité par un second cylindre coaxial de rayon infini et pourtant la charge $-q'$. Pour trouver l'intensité du champ électrique en point situé à la distance r de l'axe (**Fig.3.06**), on fait passer par ce point une surface cylindrique de longueur Δx dont l'axe coïncide avec l'axe chargé.

On applique le théorème de GAUSSE qui exprime que le flux du vecteur \vec{D} (vecteur de déplacement électrique) à travers une surface fermée qui renferme un volume V est égale à la somme des charges qui se trouve à l'intérieur de ce volume. La surface fermée, dans (**Fig.3.06**), est constituée par la surface du cylindre et par les deux bases. La somme des charges situées à l'intérieur du cylindre est $(q' \Delta x)$.



Le flux du vecteur \vec{D} ne traverse que la surface latérale car le champ électrique d'un axe chargé est radial ($\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E}$).

On obtient alors :

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = q' \cdot \Delta x \quad ; \quad C \tag{3.48}$$

Or,

$$\text{L'intégrale vaut : } 2\pi r \cdot \Delta x \cdot D(r) \text{ donc : } D(r) = \frac{q'}{2\pi r} \quad ; \quad C/m^2 \tag{3.49}$$

Ou encore :

$$E(r) = \frac{q'}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot r} \quad ; \quad V/m \tag{3.50}$$

Pour connaître le potentiel scalaire par rapport au conducteur d'un point quelconque situé à la distance r de l'axe, il faut intégrer (3.50) de r_{11} à r , on trouve :

$$V(r) = - \int_{r_{11}}^r E \cdot dr = \frac{-q'}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{r_{11}} \quad ; V \tag{3.51}$$

Par la suite, nous remplaçons ϵ par ϵ_0 car le milieu ambiant est l'air.

Cette intégrale n'est pas convergente pour :

$$r \longrightarrow \infty, \text{ ni pour } r_{11} \longrightarrow 0.$$

3.4.3 Champ électrique d'une ligne au voisinage du sol (méthode des images)

Soit un système de $(n-1)$ conducteurs très longs soumis à des tensions électriques continues ou à basse fréquence. On peut considérer que les n conducteurs sont échangés chacun par une charge linéique q'_i (l'indice de la charge correspond au numéro du conducteur). Les $(n-1)$ conducteurs métalliques sont tendus parallèlement à la surface du sol. Le $n^{ième}$ conducteur et le sol ; il est considéré comme un conducteur parfait et on peut le remplacer par les images $-q'_i$ des $(n-1)$ conducteurs (Fig.3.07), sans modifier le champ au-dessus du sol.

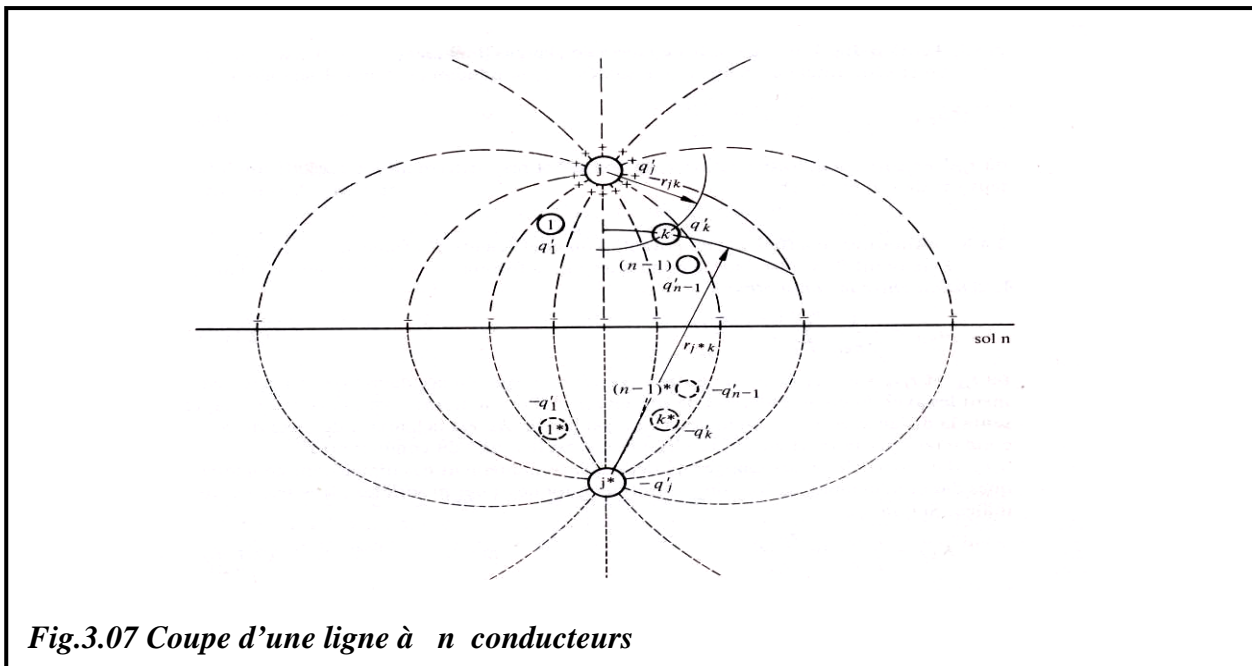


Fig.3.07 Coupe d'une ligne à n conducteurs

Dans le plus de la coupe (Fig.3.07), qui n'est traversée par aucun flux d'induction magnétique variable, les tensions dérivent d'un potentiel fixé par les charges situées à la surface du sol et des conducteurs. Inversement, on peut dire que, pour faire apparaître les tensions entre les conducteurs, il faut amener des charges à leur surface ces modifications de charges de surface engendrent à leur tour des courants capacitifs dans les conducteurs.

3.4.4 Champ électrique de deux axes parallèle dans l'air

Soit une paire d'axes parallèle j et j^* de longueur infini éloignés de tout autre conducteur (*Fig.3.08*). Soit $(-q')$ et $(+q')$ les charges linéique de l'un de l'autre. En un point P la résultante de l'intensité du champ E_j est égale à la somme vectorielle des champs dus à chacune des charges avec :

$$E = \frac{q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi r_{jp}} ; v/m \quad (3.52)$$

$$E^* = \frac{-q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi r_{j^*p}} ; v/m \quad (3.53)$$

Où :

ϵ_0 : $8,85 \text{ pF/m}$; est la constante électrique du vide. r_{jp} et r_{j^*p} : sont les distance respective du point P au conducteur j et j^* .

Le potentiel (par rapport à une référence) est lié aux champs électriques par la relation :

$$\vec{E} = -\text{grad } V ; V/m \quad (3.54)$$

Dans le cas bidimensionnel, cette relation devient :

$$E = -\frac{\partial V}{\partial r} ; V/m \quad (3.55)$$

Et le potentiel est déterminé par :

$$V = -\int_{r_0}^{r_1} E dr ; V \quad (3.56)$$

Où :

r_0 : localise la référence ;

r_1 : localise la valeur du potentiel par rapport à la référence.

Nous sommions les contributions de chaque charge donc le potentiel du point P dû à la paire des charges $(-q'_j)$ et $(+q'_j)$ par rapport au plan médian sera, en séparant les influences de $(-q'_j)$ et $(+q'_j)$:

$$V_p = \int_{r_{jp}}^{hj} \frac{q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi} dr - \int_{hj}^{r_{j^*p}} \frac{-q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi} dr^* ; V \quad (3.57)$$

$$= \frac{q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi} \ln \frac{hj}{r_{jp}} + \frac{q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi} \ln \frac{r_{jp}}{hj} ; V \quad (3.58)$$

$$= \frac{q'_j}{\epsilon_0 \cdot 2\pi} \ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} ; V \quad (3.59)$$

Dans la formule (3.57), la première intégrale a été calculée en suivant le chemin **PBA** et la seconde intégrale en suivant **ACP** (Fig.3.08).

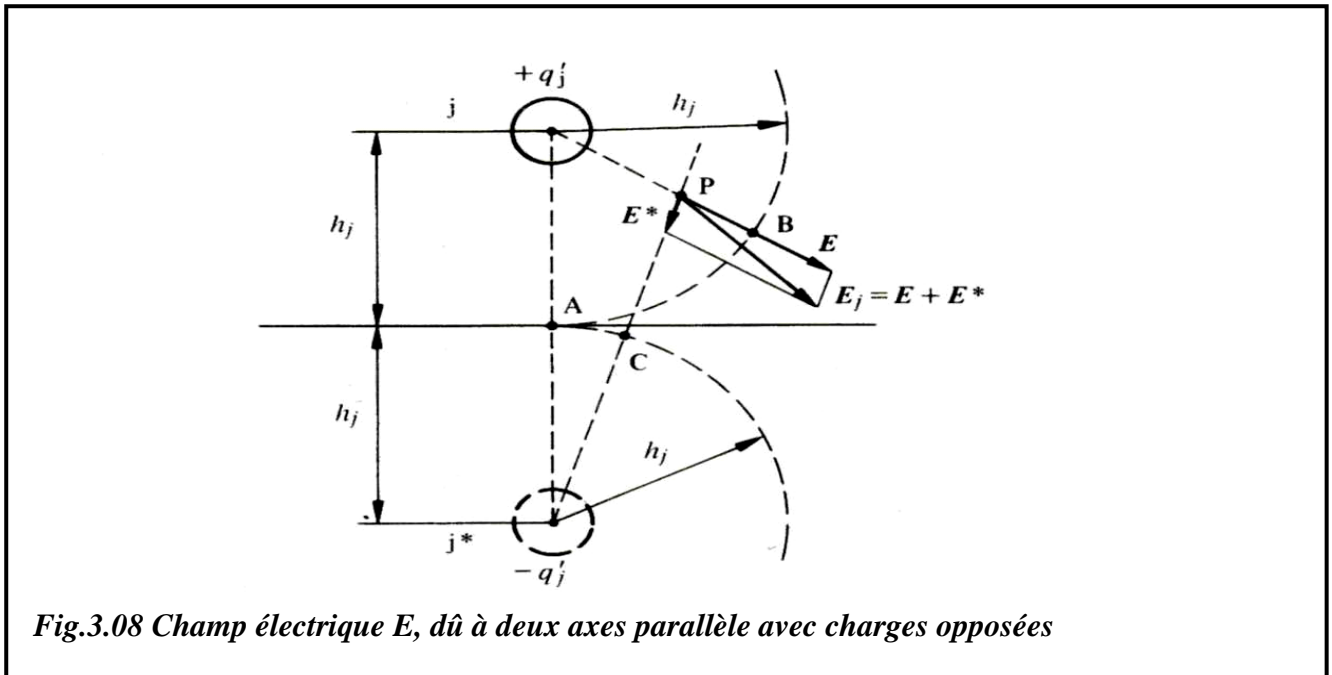


Fig.3.08 Champ électrique E , dû à deux axes parallèle avec charges opposées

Pour un ensemble de $(n-1)$ conducteurs, l'expression de la tension vaut :

$$U_{pn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} \quad ; \quad V \tag{3.60}$$

Si le point P est placé sur le conducteur λ , la formule (3.61) permet de calculer la tension entre le conducteur λ et la terre :

$$U_{\lambda n} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*\lambda}}{r_{j\lambda}} \quad ; \quad V \tag{3.61}$$

Où :

$r_{j\lambda}$: la distance entre l'axe géométrique du conducteur λ et l'axe du conducteur j ;

$r_{j^*\lambda}$: la distance entre l'axe géométrique du conducteur λ et l'axe du conducteur j^* (j^* est l'image du conducteur j).

Pour le terme $j=\lambda$, $r_{\lambda^*\lambda} = 2h_\lambda$ représente la distance du conducteur par rapport au sol, tandis que $r_{\lambda\lambda}$ est le rayon du conducteur λ .

$$\text{Si l'on pose : } \lambda_{\lambda j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{j^*\lambda}}{r_{j\lambda}} \tag{3.62}$$

La tension $U_{\lambda n}$ s'écrit :

$$U_{\lambda n} = \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{\lambda j} q'_j \quad ; \quad V \tag{3.63}$$

Puisque $r_{j*\lambda} = r_{\lambda j*}$ et $r_{j\lambda} = r_{\lambda j}$, on a $\lambda_{j\lambda} = \lambda_{\lambda j}$

Où :

$\lambda_{j\lambda}$: sont des coefficients qui s'appellent les coefficients de potentiel ou les coefficients d'influence.[22]

3.4.5 Matrice des coefficients de potentiel

A partir de la formule (3.63), on peut obtenir un système d'équations qui permet de calculer les tensions $U_{1n} \dots U_{2n} \dots U_{(n-1)n}$ par rapport a la terre lorsqu'on connaît les charge linéiques $q'_1 \dots q'_j \dots q'_{(n-1)}$

Donc on aura :

$$\begin{pmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ \vdots \\ U_{(n-1)n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1(n-1)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \dots & \lambda_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{(n-1)1} & \lambda_{(n-1)2} & \dots & \lambda_{(n-1)(n-1)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ \vdots \\ q'_{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (3.64)$$

La matrice λ est la matrice des coefficient de potentiel et c'est une matrice symétrique car :

$$\lambda_{j\lambda} = \lambda_{\lambda j} \quad (3.65)$$

Les tensions entre les conducteurs sont :

$$U_{j\lambda} = U_{jn} - U_{\lambda n} \quad ; \quad V \quad (3.66)$$

3.4.6 Matrice des capacités linéiques nodales

En générale on connaît plutôt les tensions que les charges linéiques, il est utile de résoudre le système d'équation (3.64) par rapport aux charges.

On peut écrire alors :

$$[q'] = [\lambda]^{-1} \cdot [U] \quad (3.67)$$

$$\text{En posant } [C'] = [\lambda]^{-1} \quad (3.68)$$

On obtient en notation matricielle :

$$\begin{pmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ \vdots \\ q'_{(n-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C'_{11} & C'_{12} & \dots & C'_{1(n-1)} \\ \vdots & C'_{21} & C'_{22} & \dots & C'_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C'_{(n-1)1} & C'_{(n-1)2} & \dots & C'_{(n-1)(n-1)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ \vdots \\ U_{(n-1)n} \end{pmatrix} \quad (3.69)$$

La matrice C est une matrice symétrique appelée matrice des capacités linéiques nodales.

Les coefficients C'_{ij} ont la dimension d'une capacité par unité de longueur en (F/m) ;

$$C' \equiv (\lambda)^{-1} = \frac{1}{\det(\lambda)} (A)^T \quad ; \quad F/m \quad (3.70)$$

Où :

$\det(\lambda)$: est le déterminant de la matrice λ ;

$(A)^T$: la matrice transposée des cofacteurs (mineur avec signe) de la matrice λ . [30]

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a définie et calculé les différents paramètres (longitudinales et transversales) d'une ligne aérienne.

En utilisant les résultats d'analyse de ces paramètres on a établi le modèle mathématique de cette ligne électrique.

A partir de ce modèle, on peut établir le modèle réel de notre ligne et par conséquent, la facilité de détermination de n'importe quel paramètre de la ligne.

Pour notre cas ; on a besoin de calculer le courant de chaque ligne, pour cette raison, on fait un programme en langage MATLAB 5.3.

Pour déterminer les paramètres électriques de la boucle en question, nous avons utilisé le modèle mathématique développé, avec l'élaboration d'un programme informatique en utilisant le logiciel MATLAB 5.3.

Chapitre

4

Pertes dans la ligne électrique aérienne

4.1 Pertes par effet de couronne

4.1.1 Introduction

L'effet couronne, phénomène aujourd'hui bien connu, se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse bleuâtre qui apparaît autour d'un fil mince.

De point de vue physique et électrique, ce phénomène est dû à l'ionisation de l'air, dès que le champ électrique régnant au voisinage immédiat du conducteur devient suffisant.

Lorsque l'on utilise des conducteurs de plus gros diamètre, comme ceux qui équipent les lignes aériennes, on constate que la gaine lumineuse évolue en décharges discrètes que les spécialistes ont coutume d'appeler « aigrettes » ou « effluves ».

Ce phénomène se manifeste aussi dans des conditions naturelles, en particulier à l'approche d'un orage : sous l'effet de l'intense du champ électrique généré par les charges électriques du nuage orageux.

L'énergie dissipée lors de ce phénomène est à l'origine de pertes électriques et les impulsions électriques associées aux aigrettes entraînent des perturbations radioélectriques.

4.1.2 Nature du phénomène de l'effet couronne dans les lignes H.T

L'effet couronne désigne de l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porte à haute tension (*Fig.4.01*).



Fig.4.01 Phénomène de l'effet couronne dans les lignes HT. [32]

Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation, qu'est basé sur l'existence dans l'air d'un certain nombre de paires ions positifs – électrons libres, créés par rayonnement cosmique.

Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'il acquièrent devient suffisante pour provoquée l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc).

Il se crée de nouveau électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécule et ainsi de suite : le processus prend une allure d'avalanche, dite avalanche de TOWNSEND. Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante au voisinage des conducteurs.

Dans les conditions normales de l'air, cette valeur est très proche de **30 KV/cm**. [31]

4.1.3 Calcul du champ critique (Formule de PEEK)

Pour déterminer le champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur cylindrique, on emploie généralement la formule de PEEK, qu'est la plus connue [31] Elle a pour expression :

$$E_c = 31 \cdot D_{s,l} \cdot (1 + 0,308 / \sqrt{D_{s,l} \cdot r}) \quad ; \quad KV/Cm \quad (4.01)$$

Avec E_c : en (KV/Cm), valeur de crête du champ critique (en champ alternatif) ;

r : en (Cm) rayon du conducteur ;

$$D_{s,t} = \frac{3,92 \cdot P}{273 + t^\circ}, \text{ densité relative de l'air ;}$$

($D_{s,t} = 1$ pour $P = 76 \text{ Cm Hg}$ et $t^\circ = 25 \text{ C}^\circ$).

L'état de surface de conducteur est très important : la relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies.

La rugosité superficielle diminue le champ critique ; on tien compte de cette influence en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m \leq 1$, appelé coefficient d'état de surface.

Le champ critique E_0 d'un conducteur poli s'exprime alors sous la forme suivante :

$$E_0 = mE_c \quad ; \quad \text{KV/Cm} \quad (4.02)$$

Ainsi, le toronnage d'un conducteur de ligne aérienne introduit un coefficient d'état de surface de l'ordre de **0,9**.

4.1.4 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs

Le paramètre caractéristique le plus évident auquel on a coutume de rattacher l'intensité de l'effet couronne ; est le champ électrique à la surface du conducteur ou gradient superficiel.

En raison de la grande sensibilité de phénomène couronne à la valeur de ce champ, il est nécessaire d'employer une méthode de calcul fournissant le champ avec une précision de l'ordre de **1%**. [31]

De la façon la plus générale, le champ superficiel se calcule par le théorème de GAUSSE :

$$E_s = q / 2\pi\epsilon_0 r \quad ; \quad \text{V/Cm} \quad (4.03)$$

Avec :

E_s : en (V/Cm), champ superficiel ;

q : en (C/Cm), charge superficiel par unité de longueur ;

r : en (Cm), rayon du conducteur lisse équivalent ;

ϵ_0 : $1/36\pi \cdot 10^9$, est la permittivité du vide (ou de l'air), en (F/m).

4.1.5 Mécanisme de formation des pertes couronne

Le phénomène est toujours la dissociation des atomes en électrons et en ions positifs.

Les charges de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirées vers celui-ci et neutralisées. Alors que les charges de même signe sont entraînées vers l'extérieur par le champ électrique.

Comme les électrons s'attachent très rapidement à des atomes neutres pour former des ions négatifs dans l'espace.

La migration des ions lourds de même polarité que le conducteur ; est la cause physique des pertes couronne, l'énergie étant dissipée par frottement des ions contre les molécules neutres de l'air.

Le mouvement des ions appelle dans les conducteurs par induction électrostatique un courant qui comporte une composante fondamentale en phase avec la tension, donc un transfert d'énergie électrique se passe. [31]

4.1.6 Différents facteurs influant sur les pertes couronne

Les pertes par effet couronne sont variées d'un endroit à un autre, la cause de cette variation est l'influence des différents facteurs suivants :

- 1- Le climat (conditions météorologiques : la pluie, l'humidité et le temps sec) ;
- 2- L'altitude ;
- 3- La fréquence du réseau ;
- 4- Le sable.

4.1.6.1 Le climat

4.1.6.1.1. L'influence de la pluie

L'influence de la pluie est la plus étudiée, puisque les pertes varient avec l'intensité de la pluie et l'état de surface des conducteurs, c'est-à-dire :

A/ Pendant une faible pluie ; où les conducteurs sont propres, il se forme une grande quantité de gouttelette représente autant de sources possible d'aigrettes, comme résultat on aura des pertes relativement plus élevées.

Dans le cas d'un vieux conducteur, il se forme un dépôt de poussière plus au moins carbonisé, ce dépôt de poussière absorbe de l'eau de pluie qui s'établi et fini pour former un fil mince qui à pour effet d'améliorer l'état de surface du conducteur.

Ces pertes sous faible pluie sont exprimées par la formule suivante : [33]

$$P_{Pl.Fai} = 0,05 \cdot 10^{6,66(E_s^* - 0,475)} ; \quad W/m \quad (4.04) \quad \text{pour } E_s^* \leq 0,69$$

$$P_{Pl.Fai} = 2 \cdot 10^{2,74(E_s^* - 0,765)} ; \quad W/m \quad (4.05) \quad \text{pour } E_s^* > 0,69$$

Avec :

$P_{Pl.Fai}$: en (W/m), perte réduite.

$E_s^* = E_{max} / E_c$; C'est le champ superficiel relatif.

Mais les pertes réelles sont égales à :

$$P_{r.Pl.Fai} = P_{Pl.Fai} K \quad ; \quad W/m \quad (4.06)$$

Avec :

K : le coefficient de réduction qu'est égale à :

$$K = (n \cdot r \cdot B)^2 \cdot (2,52 - \log r_{eq}) \cdot (\log \rho - \log r_{eq}) / (2,52 - \log \rho) \quad (4.07)$$

Avec :

$$B = D_{sl} (1 + 0,308 / \sqrt{\delta \cdot r}) \quad (4.08)$$

$$\rho = 25 \sqrt{n \cdot r} \quad (4.09)$$

Où :

r : Rayon d'un conducteur en (Cm) ;

r_{eq} : Rayon équivalent d'un conducteur en (Cm) ;

ρ : Rayon de la charge d'espace en (m) ;

B : Facteur de PEEK ;

n : Nombre de conducteurs par phase.

B/ Pendant une forte pluie ; les grosses gouttes se forment un masque sur les conducteurs.

Les pertes sous pluie forte sont exprimées par :

$$P_{Pl.For} = 0,2 \cdot 10^{4,83(E_s^* - 0,47)} \quad ; \quad W/m \quad (4.10) \quad \text{pour } E_s^* \leq 0,82$$

$$P_{Pl.For} = 2 \cdot 10^{2,65(E_s^* - 0,70)} \quad ; \quad W/m \quad (4.11) \quad \text{pour } E_s^* > 0,82$$

Les pertes réelles sont égales à :

$$P_{r.Pl.For} = P_{Pl.For} K \quad ; \quad W/m \quad (4.12). [33]$$

4.1.6.1.2 L'influence de l'humidité

La variation de l'humidité de l'air provoque une variation du domaine de l'existence de la couronne. Elle sera intense au point non homogène et qui élargie la zone du couronne.

Les pertes en temps humide sont exprimées par la formule suivante :

$$P_{t.hum} = 0,1 \cdot 10^{6,35(E_s^* - 0,6)} \quad ; \quad W/m \quad (4.13) \quad \text{pour } E_s^* \leq 0,775$$

$$P_{t.hum} = 1,5 \cdot 10^{3(E_s^* - 0,8)} \quad ; \quad W/m \quad (4.14) \quad \text{pour } E_s^* > 0,775$$

4.1.6.1.3 L'influence du temps sec

Dans ce cas, les pertes dépendent de l'état de surface du conducteur qui dépend des détails de réalisation et des conditions d'ambiance locale (graisse, pollution, insectes) ainsi que le facteur de vieillissement du conducteur. Tous ces défauts conduisent à des concentrations locales du champ électrique et par conséquent une tension critique faible.

Les pertes en temps sec sont exprimées par la formule suivante :

$$P_{t,sec} = P_0 \cdot r^{1,8} \cdot (n + 6)^2 \cdot 10^7 (E_s^* - 0,7) \quad ; \quad W/m \quad (4.15)$$

Où :

$$P_0 = 1,5 \cdot 10^{-2} \quad ; \quad W/m \quad (4.16) \quad \text{pour des conducteurs neuf ou sales ;}$$

$$P_0 = 1,5 \cdot 10^{-3} \quad ; \quad W/m \quad (4.17) \quad \text{pour des conducteurs vieillis.}$$

L'abaque de (Fig.4.02) permet de déterminer instantanément le domaine de pertes possibles d'un faisceau de conducteur. La zone grisée délimitée par deux droites intermédiaires, correspond à des conducteurs normalement vieillis, la droite supérieure correspond à des conducteurs neufs ou normalement pollués, enfin la droite inférieure correspond à des conducteurs très bien vieillis dans des régions sans pollution industrielle.

L'abaque donne :

$$P_{t,sec} = P_0 \cdot r^{1,8} \cdot (n + 6)^2 \cdot 10^7 (E_s^* - 0,7) \quad ; \quad W/m, \text{ en fonction de } E_s^*, \text{ pour divers états de surface des conducteurs.}$$

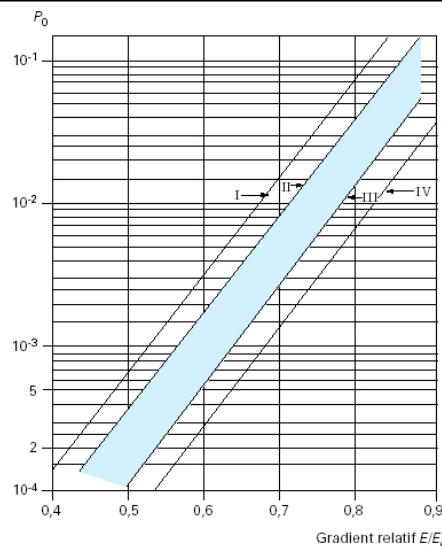


Fig. 4.02 Abaque de prédétermination des pertes des conducteurs secs. [33]

- I conducteurs sales ou gras ;
- Zone tramée entre II et III : état de surface moyen ;
- IV conducteurs propre et vieillis.

4.1.6.2 L'influence du sable

Avec la présence du sable, les pertes par effet couronne sont relativement plus grandes à cause de déformation du champ électrique dû à l'augmentation de son intensité à coté de chaque particule de sable. (Fig.4.03)

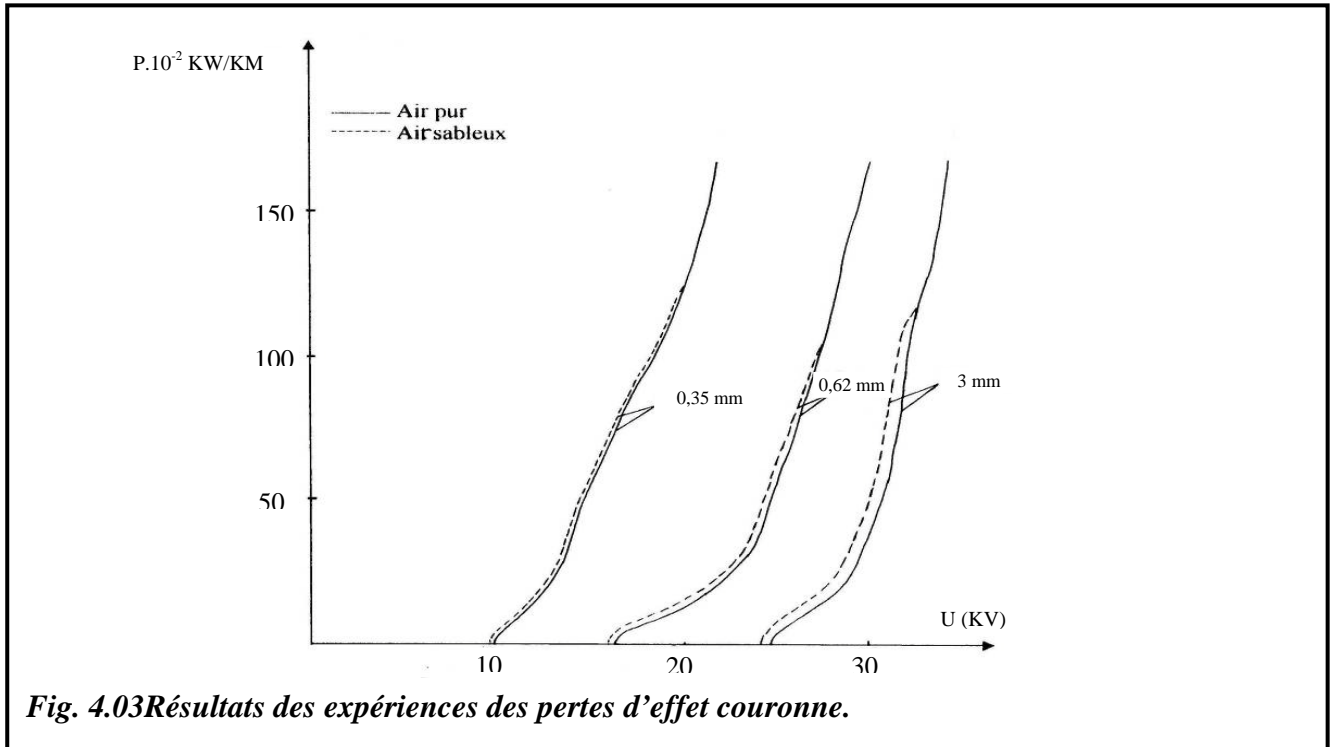


Fig. 4.03 Résultats des expériences des pertes d'effet couronne.

4.1.6.3 L'influence de l'altitude :

Lorsque une ligne traverse une région montagneuse de haute altitude, la pression de l'air diminue, ainsi que la diminution de la densité de l'air.

Donc la diminution du champ critique est déterminée d'après la formule de PEEK :

$$D_{s,l} = \frac{3,92 \cdot P}{273 + t^\circ} \quad (4.18)$$

Avec :

$$\log P = \log P_0 - (H_{alt} / 18450) \quad ; \quad cm \ Hg \quad (4.19)$$

$D_{s,l}$: La densité relative de l'air ;

P : La pression de l'air en (cm Hg) à l'altitude H_{alt} ;

t° : La température ambiante en C° ;

$P_0 = 76 \text{ cm}$ de mercure au niveau de la mer ;

H_{alt} : Altitude au niveau de la mer en (cm).

4.1.6.4 L'influence de la fréquence du réseau

D'après la formule suivante en remarque que la puissance dissipée par effet de couronne [33] est proportionnelle à la fréquence du réseau :

$$P = f \cdot W \quad ; \quad W/S \quad (4.20)$$

Avec :

P : L'énergie dissipée par seconde;

f : La fréquence du réseau;

W : L'énergie dissipée par période.

4.1.7 Calcul des pertes par effet couronne

Pour déterminer les pertes par effet couronne dans une ligne électrique aérienne, il est impératif tout d'abord de calculer les paramètres suivants :

4.1.7.1 Rayon équivalent du faisceau

Pour les lignes électrique hautes tension dont les phases sont constituées de plusieurs conducteur élémentaires, le rayon équivalent du faisceau r_{eq} est donné par l'expression suivante : [34]

$$r_{eq} = r_f \cdot \sqrt[n]{\frac{n \cdot r_c}{r_f}} \quad ; \quad mm \quad (4.21)$$

r_f : rayon du cercle circonscrit au faisceau (cercle passant par les centres de tous les conducteurs).

n : nombre de conducteur élémentaires;

r_c : rayon des conducteurs élémentaires.

Dans le cas, où la phase est constituée d'un seul conducteur, le rayon équivalent est égal à :

$$r_{eq} = r_c \quad ; \quad mm \quad (4.22)$$

4.1.7.2 Matrice des coefficients de potentiel

4.1.7.2.1 Calcul des coefficients de potentiel propres

Ces coefficients sont exprimé par : [34]

$$\lambda_{ii} = (1 / 2\pi\epsilon_0) \cdot \ln(2h_i / r_i) \quad ; \quad (4.23)$$

Avec :

$\epsilon_0 = 1 / 36\pi \cdot 10^9$ en (F/m); étant la permittivité du vide ;

h_i : hauteur moyenne du conducteur par rapport au sol en (m) ;

Où :

$$h_i = H - (2/3) \cdot F$$

H : hauteur d'ancrage en (m);

F : la flèche en (m) ;

r_i : rayon du conducteur ou rayon équivalent pour les conducteurs en faisceau en (m).

4.1.7.2.1 Calcul des coefficients de potentiel mutuels

Ils sont calculés par:

$$\lambda_{ij} = (1 / 2\pi\epsilon_0) \cdot \ln \left[\frac{((h_i + h_j)^2 + d_{ij}^2)}{((h_i - h_j)^2 + d_{ij}^2)} \right]^{0,5} \quad (4.24)$$

Avec :

$d_{ij} = d_{ji}$: distance entre phases ; [34]

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$$

$$h_i = h_j$$

4.1.7.3 Matrice des capacités

Pratiquement ; la matrice des capacités [C] on l'a obtenue par l'inversion de la matrice des coefficients de potentiel [λ] ;

$$\text{Donc } [C] = [\lambda]^{-1} \quad (4.25)$$

4.1.7.4 Charges linéiques

La relation générale que l'on emploie pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle suivante : [31]

$$[q] = [C] \cdot [V] \quad ; \quad C/m \quad (4.26)$$

[q] : matrice uni colonne des charges des conducteur;

[V] : matrice uni colonne des potentiels des conducteurs.

Alors on a la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} ; C/m \quad (4.27)$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ -1/2 + j\sqrt{3}/2 \\ -1/2 - j\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \end{bmatrix}, \quad \text{où } a = \exp(j2\pi/3)$$

$$|Q_i| = \left| V \cdot \left[\left(C_{i1} - \frac{1}{2}(C_{i2} + C_{i3}) \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(C_{i2} - C_{i3}) \right] \right|$$

Nous obtenons donc pour la première et la troisième phase :

$$q_1 = q_3 = V \cdot \left[\left(C_{11} - \frac{1}{2}(C_{12} + C_{13}) \right)^2 + \frac{3}{4}(C_{12} - C_{13})^2 \right]^{0,5} ; C/m \quad (4.28)$$

Et la charge linéique pour la deuxième phase est :

$$q_2 = V \cdot (C_{22} - C_{23}) \quad ; C/m \quad (4.29)$$

Avec :

$$V = V_L / \sqrt{3} \quad ; \quad V \quad (4.30)$$

Où :

V_L : La tension de la ligne en (V);

V : La tension simple de la ligne en (V).

4.1.7.5 Champs électriques superficiels moyens

Connaissant les charges linéiques q des conducteurs, on en déduit facilement les gradients superficiels moyens de tension par application du théorème de Gauss [31] :

➤ Dans le cas d'un conducteur de rayon r_c , le champ électrique superficiel moyen est :

$$E_{s.moy} = q / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_c \quad ; \quad V/cm \quad (4.31)$$

Où :

$$E_{s.moy1} = E_{s.moy3} = q_1 / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_c \quad ; \quad V/cm \quad (4.32)$$

$$E_{s.moy2} = q_2 / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_c \quad ; \quad V/cm \quad (4.33)$$

Avec :

q : charge linéique (C/m) ;

r_c : rayon du conducteur en (cm).

➤ Dans le cas d'un faisceau de n conducteurs; le champ électrique superficiel est :

$$E_{s.moy} = (1/n) \cdot (q / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_{eq}) ; \quad V/cm \quad (4.34)$$

Où :

$$E_{s.moy1} = E_{s.moy3} = (1/n) \cdot (q_1 / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_{eq}) ; V/cm \quad (4.35)$$

$$E_{s.moy2} = (1/n) \cdot (q_2 / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_{eq}) ; \quad V/cm \quad (4.36)$$

Avec :

n : Nombre de conducteurs du faisceau ;

r_{eq} : Rayon équivalent du faisceau .

4.1.7.6 Champs électriques superficiels maximaux

L'interaction des différents conducteurs se traduit en fait par une non uniformité du champ (il est plus grand à l'extérieur du faisceau qu'à l'intérieur). [31]

Le champ est alors donné par :

$$E_{s,max} = E_{s,moy} \left[1 + (n-1) \cdot \left(r_c / r_{eq} \right) \right] ; \quad V/cm \quad (4.37)$$

$$E_{s,max1} = E_{s,max3} = E_{s,moy1} \left[1 + (n-1) \cdot \left(r_c / r_{eq} \right) \right] ; \quad V/cm \quad (4.38)$$

$$E_{s,max2} = E_{s,moy2} \left[1 + (n-1) \cdot \left(r_c / r_{eq} \right) \right] ; \quad V/cm \quad (4.39)$$

Dans le cas d'un seul conducteur, le champ électrique superficiel maximal est :

$$E_{s,max} = E_{s,moy} ; \quad V/cm \quad (4.40)$$

$$E_{s,max1} = E_{s,max3} = E_{s,moy1} = E_{s,moy3} ; \quad V/cm \quad (4.41)$$

$$E_{s,max2} = E_{s,moy2} ; \quad V/cm \quad (4.42)$$

4.1.7.7 Champ électrique critique

Il est calculé d'après la formule (4.01) de Peek :

$$E_c = 31 D_{s,l} \cdot \left(1 + 0,308 / \sqrt{D_{s,l} \cdot r} \right) ; \quad KV/cm$$

4.1.7.8 Champ électrique relatif

Le champ électrique superficiel relatif est donné par : [31]

$$E_s^* = E_{max} / E_c \quad (4.43)$$

4.1.7.9 Pertes sous les conditions climatiques :

L'énergie dissipée annuellement, par effet de couronne des conducteurs d'une ligne, dépend évidemment du type de climat moyen de la région traversée par cette ligne.

En effet, il est aisé de connaître, par les renseignements météorologiques, les données pluviométriques régionales suivantes :

- Temps de la pluie forte : $T_{pl,for}$;
- Temps de la pluie faible : $T_{pl,fai}$;
- Temps de Temps sec (beau temps) : $T_{T.sec}$;

- Temps de Temps humide (temps de givre) : $T_{T.hum}$;
- Temps de Tempête de sable : $T_{Tem.sab}$;
- Altitude en niveau de la mer : H_{alt} ;
- Température ambiante : t° .

4.1.7.9.1 Pertes sous la pluie

On distingue deux cas :

4.1.7.9.1.1 Pertes sous pluie forte

Ces pertes se calculent d'après la formule (4.10) ou bien (4.11).

- ❖ Les pertes réelles sous une forte pluie se déterminent d'après la formule (4.12).

4.1.7.9.1.2 Pertes sous pluie faible

Elles se déterminent par la formule (4.04) ou bien (4.05).

- ❖ Les pertes réelles sous une faible pluie sont données par la formule (4.06).

4.1.7.9.2 Pertes en temps humide

Ce type de pertes est déterminé par formule (4.13) ou bien (4.14).

4.1.7.9.3 Pertes en Temps sec

Les pertes en temps sec (beau temps) sont données par la formule (4.15).

4.1.7.9.4 Pertes en Temps de tempête de sable

On peut déterminer ces pertes avec l'utilisation des abaques tel que (Fig.4.03).

4.1.7.9.5 Pertes d'énergie active annuelle par effet de couronne

Après la détermination de toutes les pertes citées précédemment, et avec le nombre d'heurs annuel de chaque temps des temps : $T_{pl.for}$, $T_{pl.fai}$, $T_{t.sec}$, $T_{t.hum}$, $T_{tem.sab}$, on peut déterminer les pertes annuelles par effet de couronne d'après l'expression suivante : [33]

$$W_{ef.co} = (P_{pl.for} \cdot Nh_{pl.for}) + (P_{pl.fai} \cdot Nh_{pl.fai}) + (P_{t.sec} \cdot Nh_{t.sec}) + (P_{t.hum} \cdot Nh_{t.hum}) + (P_{tem.sab} \cdot Nh_{tem.sab}) ; \quad KWh/km \quad (4.44)$$

Avec :

$P_{pl.for}$: les pertes sous pluie forte pendant le nombre d'heurs $Nh_{pl.for}$;

$P_{pl.fai}$: les pertes sous pluie faible pendant le nombre d'heurs $Nh_{pl.fai}$;

$P_{t.sec}$: pertes en temps sec pendant le nombre d'heurs $Nh_{t.sec}$;

$P_{t.hum}$: pertes en temps humide pendant le nombre d'heurs $Nh_{t.hum}$;

$P_{tem.sab}$: pertes en temps de tempête de sable pendant le nombre d'heurs $Nh_{tem.sab}$.

4.1.7.9.6 Pertes d'énergie active dans la ligne

Les pertes actives annuelles par effet de couronne dans une ligne électrique de transport d'électricité d'une longueur L en (km) sont données par la formule suivante :

$$W_{ef.cor.L} = W_{ef.cor.} \cdot L \quad ; \text{ KWh} \quad (4.45)$$

4.1.7.9.7 Pertes réactives annuelles dans la ligne

Ce type de pertes s'exprime par :

$$V_{ef.cor.L} = W_{ef.cor.L} \cdot \text{tg} \varphi \quad ; \text{ KVARh} \quad (4.46)$$

Avec :

$\text{tg} \varphi$:corresponde au $\cos \varphi$ qu'est le facteur de puissance.

4.1.8 Résultats de calcul

Pour faire le calcul des pertes par effet de couronne de toutes les lignes de la zone étudiée on fait un programme en langage MATLAB 5.3.

Les résultats de ce programme sont représentés sur (**Tableau.4.01**).

L'organigramme de calcul est motionné dans l'annexe de notre document.

Paramètres Lignes	V (KV)	S (mm ²)	L (km)	h _i (m)	d _{ij} (m)	n	r _f (mm)	L'état des conducteurs	W _{ef.co} (kwh/km)	W _{ef.co.L} (kwh)	V _{ef.co.L} (KVARh)
EHR-EKB	220	288	125,34	13,5	8,5	1	—	Vieillis	6998,00	877 129,32	315 766,55
EKB-SKD	220	288	76,90	14,5	8,5	1	—	Vieillis	6943,90	533 985,91	192 234,92
SKD-RDL	220	288	17,90	14,0	8,5	1	—	Vieillis	6969,50	124 754,05	44 911,45
RDL-EHR	220	288	76,27	14,0	8,5	1	—	Vieillis	6969,50	531 563,76	191 362,95
RDL-EHR	220	411	76,95	15,0	9,5	2	211,44	Neufs	55,52	4 272,26	1 538,01
RDL-EHR	400	411	76,95	15,0	9,5	2	211,44	Neufs	450,44	34 661,35	12 478,08
RDL-EHR	400	411	76,95	15,0	9,5	3	240,04	Neufs	339,17	26 099,13	9 395,68

Tableau.4.01 Résultats de calcul des pertes par effet de couronne dans les lignes de transport.

Avec :

$P_c = 76 \text{ cm Hg}$; au niveau de la mer ;

$t^\bullet = 24^\circ \text{C}$: Température ambiante ;

$H_{alt} = 23 \text{ m}$: Altitude au niveau de la mer ;

$m = 0,9$: Coefficient de l'état de surface ;

$Nh_{pl,for} = 821 \text{ heures}$; [35]

$Nh_{pl,fai} = 1337 \text{ heures}$;

$$Nh_{t.sec} = 6240 \text{ heures ;}$$

$$Nh_{t.hum} = 196 \text{ heures ;}$$

$$Nh_{tem.sab} = 0 ;$$

$$\cos \theta = 0,94 \Rightarrow \text{Tg } \theta = 0,36.$$

4.2 Pertes de puissance dans la ligne électrique

4.2.1 Calcul des pertes actives

La somme des puissances actives sortant des accès du réseau est toujours négative. Elle correspond à la somme de toutes les pertes de puissance active dans les lignes, changée de signe.

$$W_{act.} = 3R_l \cdot I_{l(r)}^2 + 3G_p \cdot U_p^2 ; \quad W \quad (4.47)$$

Où :

R_l : Résistance longitudinale de la ligne en (Ω) ;

$I_{l(r)}$: Courant longitudinal au milieu de la ligne, on prend la partie réelle, en (A) ;

G_p : Conductance résultant de toutes les conductances transversales des demi lignes en (S) ;

U_p : Tension simple de la phase en (V).

4.2.2 Calcul des pertes réactives

La somme des puissances réactives sortant des accès du réseau est en général positive en période de faible charge et négative en période de forte charge. Elle est égale à la somme des puissances réactives produites par les capacités linéiques transversales des lignes moins la somme des puissances réactives absorbées par les inductances linéiques longitudinales. [22]

$$W_{réa.} = 3B_p \cdot U_p^2 - 3X_l \cdot I_{l(im)}^2 ; \quad VAR \quad (4.48)$$

Où :

B_p : Susceptance résultant de l'ensemble des susceptances transversales des demi-lignes incidentes au nœud p , en (S) ;

X_l : Réactance longitudinale de la ligne considérée en (Ω) ;

$I_{l(im)}^2$: Courant longitudinale au milieu de la ligne, en prend la partie imaginaire, en (A).

4.2.3 Résultats de calcul

Pour calculer les pertes actives et réactive dans les lignes de la zone considérée. On fait un programme en langage MATLAB 5.3.

Les résultats de ce programme sont résumés sur (*Tableau.4.02*).

L'organigramme de calcul est mentionné dans l'annexe de notre document.

Lignes	Paramètres								
	$U_l(KV)$	$S(mm^2)$	$U_p(KV)$	$R_L(\Omega)$	$B_p(s)$	$G_p(s)$	$X_L(\Omega)$	$W_{act}(KW)$	$V_{réa}(KVAR)$
EHR-EKB	220	288	127,16	17,503	$1,6571.10^{-4}$	$0,5368.10^{-4}$	54,641	$2,774.10^6$	$8,038.10^3$
EKB-SKD	220	288	127,16	10,495	$0,9823.10^{-4}$	$0,4862.10^{-4}$	32,572	$4,640.10^6$	$4,765.10^3$
SKD-RDL	220	288	127,16	1,858	$0,1726.10^{-4}$	$0,0809.10^{-4}$	5,688	$2,610.10^7$	$8,338.10^2$
RDL-EHR	220	288	127,16	10,153	$0,9433.10^{-4}$	$0,4630.10^{-4}$	31,072	$4,780.10^6$	$4,575.10^3$
RDL-EHR	220	411	127,16	3,928	$1,3831.10^{-4}$	$0,2932.10^{-4}$	25,832	$1,235.10^7$	$6,708.10^3$
RDL-EHR	400	411	231,21	3,928	$1,3831.10^{-4}$	$0,2932.10^{-4}$	25,832	$4,083.10^7$	$2,217.10^4$
RDL-EHR	400	411	231,21	1,139	$1,5209.10^{-4}$	$0,1392.10^{-4}$	16,1061	$1,4080.10^8$	$2,4163.10^4$

Tableau.4.02 résultats de calcul de pertes actives et réactives dans chaque ligne de la boucle étudiée.

4.3 Estimation des pertes dans les lignes de transport d'électricité

Après le calcul de pertes par effet couronne et les pertes actives réactives dans les lignes, on estime ces pertes en DA par année pour voire le gain d'argent par année.

L'estimation de ces pertes est résumée sur (Tableau.4.03).

Paramètre des lignes			Pertes par effet de couronne			Pertes de puissance de la ligne		
			Actives (DA/an)	Réactives (DA/an)	Gain (DA/an)	Actives (DA/an)	Réactives (DA/an)	Gain (DA/an)
U (kv)	S (mm)	n	2301411,91	12978,00	2303117,15	599895136800,00	2893969,36	316037188800,00
			11209,55	63,21		283858426800,00	2415121,48	
400	411	2	90944,45	512,85	22592,25	938456645000,00	7981998,12	2257796990000,00
		3	68478,89	386,16		3236252913000,00	8703783,22	

Tableau.4.03 Estimation des pertes dans les lignes en DA.

4.4 Conclusion

➤ Concernant les pertes par effet de couronne, on a remarqué que les pertes augmentent avec l'existence d'un seul conducteur par phase, et diminuent avec l'augmentation de nombre des conducteurs par phase, et avec aussi l'accroissement de la tension de la ligne. On a un gain d'argent entre le premier cas ($U = 220 \text{ kv}$, $S = 288 \text{ mm}^2$, $n = 1$) et le deuxième cas ($U = 220 \text{ kv}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$); qui est égale à : **2303117,15 DA par année.**

On a aussi pour ($U = 400 \text{ kv}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$) et ($U = 400 \text{ kv}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 3$); un gain de **22592,25 DA par année.**

➤ Pour les pertes actives et réactives dans les lignes de ($U = 220 \text{ kv}$, $S = 288 \text{ mm}^2$, $n = 1$), et les lignes de ($U = 220 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$), on a un gain d'argent de **316037188800,00 DA par année.**

Pour les lignes de ($U = 400 \text{ kv}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$), et les lignes de ($U = 400 \text{ kv}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 3$); on a un gain d'argent de **2257796990000,00 DA par année.**

<i>Paramètres lignes</i>	<i>V (KV)</i>	<i>S (mm²)</i>	<i>L (km)</i>	<i>h_i (m)</i>	<i>d_{ij} (m)</i>	<i>n</i>	<i>r_f (mm)</i>	<i>L'état des conducteurs</i>	<i>W_{ef.co} (kwh/km)</i>	<i>W_{ef.co.L} (kwh)</i>	<i>V_{EF.CO.L} (KVARh)</i>
EHR-EKB	220	288	125,34	13,5	8,5	1	—	Vieillis	6998,00	877 129,32	315 766,55
EKB-SKD	220	288	76,90	14,5	8,5	1	—	Vieillis	6943,90	533 985,91	192 234,92
SKD-RDL	220	288	17,90	14,0	8,5	1	—	Vieillis	6969,50	124 754,05	44 911,45
RDL-EHR	220	288	76,27	14,0	8,5	1	—	Vieillis	6969,50	531 563,76	191 362,95
RDL-EHR	220	411	76,95	15,0	9,5	2	211,44	Neufs	55,52	4 272,26	1 538,01
RDL-EHR	400	411	76,95	15,0	9,5	2	211,44	Neufs	450,44	34 661,35	12 478,08
RDL-EHR	400	411	76,95	15,0	9,5	3	240,04	Neufs	339,17	26 099,13	9 395,68

Tableau.4.01 Résultats de calcul des pertes par effet de couronne dans les lignes de transport.

Avec :

$P_c = 76 \text{ cm Hg}$; au niveau de la mer ;

$t^\bullet = 240^\bullet$: Température ambiante ;

$H_{alt} = 23 \text{ m}$: Altitude au niveau de la mer ;

$m = 0,9$: Coefficient de l'état de surface ;

$Nh_{pl, far} = 821 \text{ heures}$;

$Nh_{pl, fai} = 1337 \text{ heures}$;

$Nh_{t, hum} = 196 \text{ heures}$;

$Nh_{tm, sab} = 0$;

$\text{Cos } \theta = 0,94 \Rightarrow \text{Tg } \theta = 0,36.$

$$W_{ef.j} = 3R_e \cdot I_{l(r)}^2 + 3G_p \cdot U_p^2 \quad ; W \quad (4.47)$$

Où :

R_e : Résistance longitudinale de la ligne en (Ω) ;

$I_{l(r)}$: Courant longitudinal au milieu de la ligne, on prend la partie réelle, en (A) ;

G_p : Conductance résultant de toutes les conductances transversales des demi-lignes en (S) ;

U_p : Tension simple de la phase en (V).

4.2.2 Calcul des pertes réactives par effet de Joule

La somme des puissances réactives sortant des accès du réseau est en général positive en période de faible charge et négative en période de forte charge. Elle est égale à la somme des puissances réactives produites par les capacités linéiques transversales des lignes moins la somme des puissances réactives absorbées par les inductances linéiques longitudinales. [04]

$$W_{eff} = 3B_p \cdot U_p^2 - 3X_l \cdot I_{l(im)}^2 \quad ; \quad VAR \quad (4.48)$$

Où :

B_p : Susceptance résultant de l'ensemble des susceptances transversales des demi-lignes incidentes au nœud p , en (S) ;

X_l : Réactance longitudinale de la ligne considérée en (Ω) ;

$I_{l(im)}^2$: Courant longitudinale au milieu de la ligne, on prend la partie imaginaire, en (A).

4.2.3 Résultats de calcul

Pour calculer les pertes par effet de joule actives et réactive dans les lignes de la zone considérée. On fait un programme par le langage MATLAB 5.3.

Les résultats de ce programme sont résumés sur (tableau 4.01).

Le programme de calcul est mentionné dans l'annexe de notre document.

4.2.4 Conclusion

4.3 Bibliographie

- [01] C.GARY « effet couronne sur les réseaux électriques » France, 2002
- [02] C.GARY « effet couronne en tension alternative ». Collection des études et recherches d'EDF. N° 24 éditions EYROLLES, 1976.
- [03] T.DEBU « ligne aérienne, paramètres électriques » France, 2002.
- [04] M.AGUET, J.J.MORF « traité d'électricité » Vol.12, énergie électrique, suisse, 1978.

<i>Paramètres</i> <i>Lignes</i>	$U_L (KV)$	$S (mm^2)$	$U_p (KV)$	$R_L (\Omega)$	$B_p (s)$	$G_p (s)$	$X_L (\Omega)$	$W_{act} (KW)$	$V_{réa} (KVAR)$
<i>EHR-EKB</i>	220	288	127,16	17,503	$1,657.10^{-4}$	$0,5368.10^{-4}$	54,641	$2,774.10^6$	$8,038.10^3$
<i>EKB-SKD</i>	220	288	127,16	10,495	$0,9823.10^{-4}$	$0,4862.10^{-4}$	32,572	$4,640.10^6$	$4,765.10^3$
<i>SKD-RDL</i>	220	288	127,16	1,858	$0,1726.10^{-4}$	$0,0809.10^{-4}$	5,688	$2,610.10^7$	$8,338.10^2$
<i>RDL-EHR</i>	220	288	127,16	10,153	$0,9433.10^{-4}$	$0,4630.10^{-4}$	31,072	$4,780.10^6$	$4,575.10^3$
<i>RDL-EHR</i>	220	411	127,16	3,928	$1,3831.10^{-4}$	$0,2932.10^{-4}$	25,832	$1,235.10^7$	$6,708.10^3$
<i>RDL-EHR</i>	400	411	231,21	3,928	$1,3831.10^{-4}$	$0,2932.10^{-4}$	25,832	$4,083.10^7$	$2,217.10^4$
<i>RDL-EHR</i>	400	411	231,21						

Chapitre

5

Choix des moyens de protection contre la foudre

5.1 Introduction

En cas de choc de foudre, du fait des phénomènes de propagation, deux points d'un même conducteur peuvent ne pas être au même potentiel. Il est donc illusoire d'imaginer une protection globale d'un réseau électrique, en installant quelques dispositifs anti-foudres tel que parafoudres, éclateurs, câbles de garde et paratonnerres ainsi que les cages maillés en certains nœuds du réseau.

La protection offerte par ces anti-foudres est très locale. Ainsi, il ne suffit pas de connaître les paramètres de ces dispositifs pour connaître la surtension effectivement appliquée au matériel à protéger.

La ligne électrique EL HADJAR (EHR)- EL KHROUB (EKB)- SKIKDA (SKD)- RAMDANE DJAMEL (RDL)- EL HADJAR (EHR) à haute tension **220 KV** a besoin de ces anti-foudres, parce que on a remarqué l'existence de deux parafoudres uniquement au niveau des postes : RAMDANE DJAMEL coté **220 KV**; et SKIKDA coté **60KV** .Concernant les éclateurs ; trois postes seulement sont équipés par ce type de protection, il s'agit des postes: EL HADJAR , EL KHROUB et SKIKDA, en plus l'équipement de toutes les chaînes d'isolateurs sur toutes les lignes de transport électrique .

Alors la protection par fil de garde s'étale uniquement sur une longueur de **2KM** en amont et en aval des postes ; et s'étale sur toute la longueur de la ligne pour :La ligne EHR- EKB et la nouvelle ligne RDL- EHR .

L'objet essentiel de notre travail; l'amélioration de la protection de la boucle : EHR- EKB- SKD- RDL- EHR contre les surcharges externes. Pour cette raison on fait le choix des anti-foudres suivants :

Avant d'introduire au choix des anti-foudres, il est nécessaire de calculer les paramètres qui lient au choix de ces dispositifs.

5.2 Niveau kéraunique (N_K)

D'après (*Fig.2.01*) des coudes isokérauniques mondiales on a remarqué que, le nombre de jours orageux par année, où on entend le tonnerre au Nord d'ALGÉRIE est égal à **20**. Alors pour la région de ANNABA $N_K = 20$ (jours orageux/année). [35]

5.3 Densité de coup de foudre au sol (N_S)

Elle est égale à :

$$N_S = N_K / 7 = 20 / 7 = 2,86$$

$$N_S = 2,86 \text{ (1Km}^2 \text{ année)}$$

5.4 Nombres de coup de foudres (N_I) touchant la ligne

Ce nombre est calculé selon la formule empirique suivante :

$$N_i = N_K \sqrt{hp / 1m} / (400Km); (\text{coups} / \text{année.Km})$$

A- La ligne EHR- EKB :

$$N_{i1} = 20 \sqrt{21 / 1m} / (400Km) = 0,229 (\text{coups} / \text{année.Km})$$

$$= 28,72 \text{ (coups/année)}$$

B- La ligne EKB- SKD :

$$N_{i2} = 20 \sqrt{24 / 1m} / (400Km) = 0,245 (\text{coups} / \text{année.Km})$$

$$= 18,83 \text{ (coups/année)}$$

C- La ligne SKD- RDL :

$$N_{i3} = 20 \sqrt{22 / 1m} / (400Km) = 0,234 (\text{coups} / \text{année.Km})$$

$$= 4,19 \text{ (coups/année)}$$

D- L'ancienne ligne RDL- EHR :

$$N_{I4} = 20\sqrt{22/1m} / (400Km) = 0,234(\text{coups} / \text{année.Km}) = \mathbf{17,88 (\text{coups/année})}$$

E- La nouvelle ligne RDL- EHR :

$$N_{I5} = 20 / \sqrt{28/1m} / (400Km) = 0,264(\text{coups} / \text{année.Km}) \\ = \mathbf{20,36 (\text{coups} / \text{année})}$$

F- Nombre de coups de foudre touchant la boucle en question est égale à :

$$N_l = \frac{N_{li}}{ni} = \frac{89,98}{5} 17,99 \cong 18$$

$$N_l = \mathbf{18 (\text{coups/année})}$$

5.5 Choix des parafoudres

Le problème du choix d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateur ou d'un parafoudre à oxyde de Zinc se pose à peine car, très rapidement, les parafoudres à oxyde de Zinc ont remplacés leurs homologues au carbure de silicium et à éclateur, surtout pour les hautes et très hautes tensions.

Les parafoudres à oxyde de Zinc sont en effet, usuellement considérés comme plus fiables et plus économiques.

- Le parafoudre à oxyde de Zinc à enveloppe métallique ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique à isolation gazeuse (généralement en zone très polluée).
- Le parafoudre à oxyde de Zinc à enveloppe synthétique fait maintenant pleinement partie de l'offre industrielle, tout du moins en ce qui concerne les parafoudres pour réseau de distribution.
- Le parafoudre à oxyde de Zinc intégré, rare en haute et très haute tension, présente les même possibilités d'utilisation que les parafoudre à enveloppe métallique pour un coût qui devrait être moindre. Toutefois, en cas de défaillance du parafoudre, il faut intervenir aussi sur l'appareil à protéger. [26]

5.5.1 Paramètres de choix des parafoudres

On peut choisir un parafoudre selon les paramètres suivants :

5.5.1.1 Tension maximale de régime permanent « U_c »

C'est la valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliquée de façon continue entre les bornes du parafoudre sans affecter son fonctionnement. La valeur de U_c est fonction du régime de neutre du réseau.

Pour les protections entre conducteurs actifs et terre, il convient de choisir : [36]

- Pour les réseaux **IT**, $U_c \geq 1,732 U_o$;
- Pour les réseaux **TT** et **TN**, $U_c \geq 1,5 U_o$.

Avec : U_o ; tension simple du réseau en (volts).

Pour les protections entre phase et neutre, il convient de choisir $U_c \geq 1,1$ quelque soit le type de réseau.

On a $V = 220.000$ volts pour le réseau actuel, et $V = 400.000$ volts pour le réseau en voie de réalisation.

Alors :

- Pour $V = 220.000$; on a $U_c \geq 1,1 \cdot 220000 / \sqrt{3} \geq 139884,40V$

D'après le catalogue et pour un réseau de **220 Kv**; on prend $U_c = (416 \text{ à } 527) \text{ Kv}$.

- Pour $V = 400.000$; on a $U_c \geq 1,1 \cdot 400000 / \sqrt{3} \geq 254335,26 V$

Donc pour un réseau de **400 Kv** on prend $U_c = (718 \text{ à } 914) \text{ Kv}$.

5.5.1.2 courant de court-circuit admissible « I_{cc} »

Qu'est la valeur maximale du courant de court-circuit externe admissible définie pour constructeur, qui peut traverser le parafoudre lors d'un défaut sur la charge entre les bornes d'entrée et de sortie.

Le parafoudre et son dispositif de protection contre les courts-circuits doivent choisir de telle façon que le courant de court-circuit admissible I_{cc} soit supérieur au courant de défaut **50Hz** au droit du parafoudre.

Pour un réseau de **220 Kv**; $I_{cc} = 25000 \text{ KA}$, pour le réseau de **400 Kv**; I_{cc} on a $I_{cc} = 32000 \text{ KA}$

5.5.1.3. Niveau de protection « U_p »

Le niveau de protection U_p est la tension aux bornes du parafoudre lors du passage du courant maximal I_{\max} . Le niveau de protection U_p est un paramètre qui caractérise les performances de protection du parafoudre.

Alors on prend U_p pour un réseau de **220 Kv** ; la valeur $U_p = 475 \text{ Kv}$ et pour un réseau de **400 Kv**; la valeur $U_p = 850 \text{ Kv}$.

5.5.1.4. Courant maximal de décharge

I_{\max} est la valeur maximale du courant de forme d'onde $8/20 \mu s$ que peut subir un parafoudre. Cette valeur est donnée par le constructeur du parafoudre.

Une méthode empirique est proposée, qu'est valable en mode commun et en mode différentiel pour le choix de I_{\max} [03] en fonction de l'estimation du risque F , La valeur de I_{\max} est la suivante :

- Si $F \leq 2 \rightarrow I_{\max} < 10 \text{ KA}$
- Si $2 < F \leq 4 \rightarrow I_{\max} \geq 10 \text{ KA}$
- Si $F > 4 \rightarrow I_{\max} \geq 40 \text{ KA}$

Le niveau d'exposition aux surtensions de foudre F est évalué par la formule suivant :

$$F = N_l(1 + 2L + T_{HT} + \delta); \quad (5.01)$$

Avec :

N_l : la densité de foudroiement local en (*coup/année*);

L : la longueur de la ligne aérienne en (*Km*);

T_{HT} : est un coefficient qu'est égale à 1 pour les lignes aériennes;

δ : tient compte de la situation de la ligne aérienne et de l'installation.

Pour notre réseau qui situé dans un site montagneux et plan ; $\delta = 1$

Donc on fait le calcul de F pour toutes les lignes de notre réseau :

- La ligne EHR- EKB :

$$F = 18(1 + 2.125,34 + 1 + 0,75) = 4561,74 > 4$$

- La ligne EKB- SKD :

$$F = 18(1 + 2.76,90 + 1 + 0,75) = 2817,90 > 4$$

- La ligne SKD- RDL :

$$F = 18(1 + 2.17,90 + 1 + 0,75) = 693,90 > 4$$

- La ligne RDL- EHR (288mm^2) :

$$F = 18(1 + 2.76,27 + 1 + 0,75) = 2795,22 > 4$$

- La ligne RDL- EHR (411mm^2) :

$$F = 18(1 + 2.76,95 + 1 + 0,75) = 2869,20 > 4$$

On constate que toutes les valeurs du risque F sont supérieures de la valeur 4

Alors :

$$I_{\max} \geq 40 \text{ KA.}$$

Suite au calcul fait ; nous proposons les deux types des parafoudres suivant (*tableau.5.01*) :

<i>Paramètres</i>	<i>Réseau actuel (220 Kv)</i>	<i>Réseau en voie de réalisation (400 Kv)</i>
U_c (Kv)	416 à 527	718 à 914
I_{cc} (KA)	25 000	32 000
U_p (Kv)	475	850
I_{max} (KA)	≥ 40	≥ 40

Tableau 5.01 caractéristiques des parafoudres proposés. (DGA Indelec)

5.6 Choix des éclateurs

On a remarqué sur terrain que notre boucle est bien équipée avec les éclateurs, dont le premier type pour la protection des chaînes d'isolateurs sur chaque pylône de la ligne. Le deuxième type pour la protection des postes tel que : EHR, EKB, SKD.

5.7 Choix des paratonnerres

La protection contre les risques directs de la foudre; des constructions des postes de transformation, les sites industriels, les bâtiments administratifs et tous les sites ouverts se fait par les paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA). [37]

Le Pulsar est pourvu d'une électronique qui lui permet d'émettre un signal haute tension de fréquence et d'amplitude déterminées et contrôlées permettant la formation anticipée du traceur ascendant à sa pointe et la propagation de celui-ci de façon continue vers le traceur descendant. Il puise l'énergie dont il a besoin dans le champ électrique existant lors de l'orage.

Après avoir capté la foudre, le pulsar la conduit vers la descente de paratonnerre et vers la terre où elle va disperser (**Fig.5.01**).

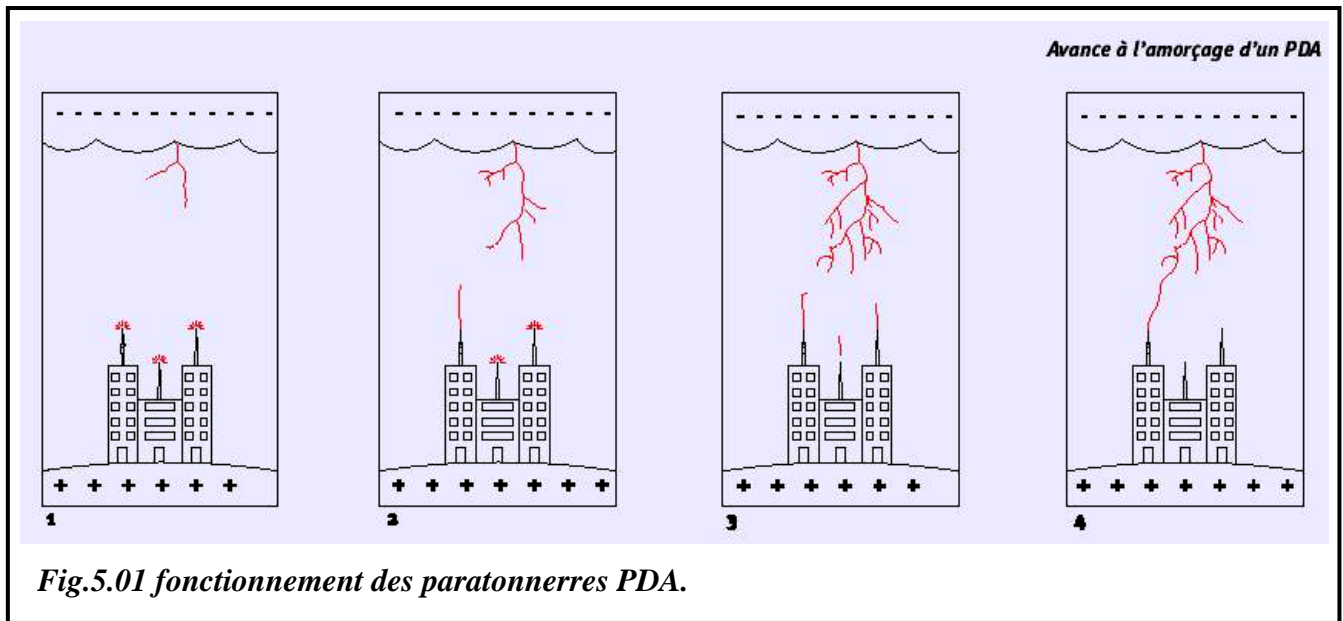


Fig.5.01 fonctionnement des paratonnerres PDA.

Concept de l'avance à l'amorçage

Au cours d'un orage, lorsque les conditions de champ de propagation sont réunies, le Pulsar crée le premier traceur ascendant. Le traceur ascendant issu de la pointe du paratonnerre se propage vers le traceur descendant du nuage à la vitesse moyenne de $1 \text{ m}/\mu\text{s}$.

L'avance à l'amorçage ΔT (μs), est définie comme le gain moyen en instant d'amorçage (instant de propagation continue du traceur ascendant) du traceur ascendant du paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA).

Où : ΔT est mesurée en laboratoire haute tension [38].

Au gain en instant d'amorçage ΔT correspond un gain en distance d'amorçage appelé ΔL .

$$\Delta L = v_{\text{moy}} \cdot \Delta T \quad ; \quad (5.02)$$

Avec : ΔL : Gain en distance d'initiation ou gain en distance d'amorçage en (m) ;

v_{moy} : Vitesse moyenne du traceur descendant ($1 \text{ m}/\mu\text{s}$) ;

ΔT : Gain en temps d'initiation du traceur ascendant mesuré en laboratoire en (μs).

Par l'application de la formule (5.02), on calcul le gain en distance d'amorçage du paratonnerre ΔL en (m), il y a plusieurs résultats de ΔT sont obtenus en laboratoire de INDELEC (FLORIDA) [38], on utilise ces résultats pour calculer les rayons de protection et par conséquent le choix propice des paratonnerres qui protègent les postes de la zone étudiée. Pour cette raison on a besoin de surface de chaque poste.

La surface de tous les postes : EHR, EKB, SKB et RDL est de $(100 \times 60) \text{ m}^2$. [39]

Alors le rayon de protection de chaque poste est le rayon du cercle centré sur le milieu du diagonal du rectangle qui représente la surface de chaque poste $(100 \times 60) \text{ m}^2$. Le rayon de protection

dans ce cas est égal à **58 m**, le rayon admissible est de **60 m**. Donc on choisit le paratonnerre propice pour protéger chaque poste dont le type est : **PREVECTRON[®] 2 6.60**.

5.8 Choix des fils de garde

On a vu sur le réseau étudié que le câble de garde s'étale comme suit :

- 1- La ligne EHR – EKB : Sur toute la longueur avec une section de **94 mm²**.
- 2- La ligne EKB – SKD : Sur **2 km** à la sortie de chaque poste, avec une section de **94 mm²**.
- 3- La ligne SKD – RDL : Sur **2 km** à la sortie de chaque poste, avec une section de **94 mm²** coté SKD et **116 mm²** coté RDL.
- 4- L'ancienne ligne RDL – EHR : Sur **2 km** à la sortie de chaque poste, avec une section de **116 mm²** coté RDL et **94 mm²** coté EHR.
- 5- La nouvelle ligne RDL – EHR : Sur toute la ligne, avec une section de **116 mm²**. [39]

5.8.1 Vérification des sections des câbles de gardes

On fait la vérification d'après la tenue thermique qui est donnée d'après l'expression suivante : [40]

$$S = I_{cc} / C \cdot (T_{cc})^{0,5} \quad ; \quad mm^2 \quad (5.03)$$

Avec: S : Section du conducteur en (mm^2) ;

I_{cc} : Le courant de court-circuit dans la ligne en (A) ;

C : Constante qui tient compte de la nature du métal de fabrication du conducteur (pour l'aluminium $C=90$) ;

T_{cc} : Temps du passage du courant de court-circuit en (S) (limité par appareils).

➤ Pour la ligne de la section **288 mm²** ;

$$I_{cc} = 24 \text{ KA}, T_{cc} = 1 \text{ S. [35]}$$

Donc :

$$S = 24 \cdot 10^3 / 90 \cdot (1)^{0,5} = 266,66 \text{ mm}^2$$

Alors la section admissible est de **288 mm²**

➤ Pour la ligne de la section **411 mm²** ;

$$I_{cc} = 32 \text{ KA}, T_{cc} = 1 \text{ S. [35]}$$

$$S = 32 \cdot 10^3 / 90 \cdot (1)^{0,5} = 355,55 \text{ mm}^2$$

Alors la section admissible est de **411 mm²**

5.8.2 Optimisation de positionnement du câble de garde

On peut calculer le positionnement optimal du câble de garde par rapport aux conducteurs de phase d'après la formule suivante : [22]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{d-h}{d}\right) - \arcsin\left(\frac{n_{d.op}}{2d}\right) \quad ; \quad \text{rad} \quad (5.04)$$

Avec:

d: Distance d'amorçage sûr d'arc lors d'un coup de foudre, entre la tête du traceur par bond et le sol en (m) ;

h : la hauteur de phase par rapport au sol en (m) ;

$n_{d.op}$: Distance entre la câble de garde et la phase en (m) ;

θ : Angle de protection optimale ($\theta = 30^\circ$).

Après les calculs, toutes les distances optimal $n_{d.op}$ sont représentées sur (**Tableau.5.02**)

<i>Paramètres postes</i>	<i>V (KV)</i>	<i>S (mm²)</i>	<i>I_c (KA)</i>	<i>d (m)</i>	<i>h (m)</i>	<i>n_{d.op} (m)</i>
EHR – EKB	220	288	6,95	31,60	13,5	5,5
EKB – SKD	220	288	6,95	31,60	14,5	3,0
SKD – RDL	220	288	6,95	31,60	14,0	4,5
RDL – EHR	220	288	6,95	31,60	14,0	4,5
RDL – EHR	220	411	6,95	31,60	15,0	2,0
RDL – EHR	400	411	8,20	36,00	15,0	7,0
RDL – EHR	400	411	8,20	36,00	15,0	7,0

Tableau.5.02 Résultats de calcul des distances (positionnement) optimales des câbles de garde.

5.9 Conclusion

Dans cette partie de notre travail on a fait le choix adéquat des moyens de protection contre la foudre de la boucle considérée. Ces moyens sont :

- Deux types de parafoudres (**DGA indelec**) avec des caractéristiques mentionnées sur (**Tableau.5.01**), d'où un parafoudre pour chaque poste.
- Câble de garde avec des sections équivalentes aux sections des lignes de transport et doivent être s'étaler sur toute la longueur de la ligne de transport de l'électricité et avec des positionnements optimaux déterminés.
- Quatre paratonnerres ; d'où un paratonnerre pour chaque poste dont le type est : **PREVECTRON[®]2 6.60**.

Chapitre

5

Choix des moyens de protection contre la foudre

5.1 Introduction

En cas de choc de foudre, du fait des phénomènes de propagation, deux points d'un même conducteur peuvent ne pas être au même potentiel. Il est donc illusoire d'imaginer une protection globale d'un réseau électrique, en installant quelques dispositifs anti-foudres tel que parafoudres, éclateurs, câbles de garde et paratonnerres ainsi que les cages maillés en certains nœuds du réseau.

La protection offerte par ces anti-foudres est très locale. Ainsi, il ne suffit pas de connaître les paramètres de ces dispositifs pour connaître la surtension effectivement appliquée au matériel à protéger.

La ligne électrique EL HADJAR (EHR)- EL KHROUB (EKB)- SKIKDA (SKD)- RAMDANE DJAMEL (RDL)- EL HADJAR (EHR) à haute tension **220 KV** a besoin de ces anti-foudres, parce que on a remarqué l'existence de ces dispositifs uniquement au niveau des postes : RAMDANE DJAMEL et SKIKDA. Concernant les éclateurs ; deux postes seulement sont équipés par ce type de protection, il en l'occupe du poste EL HADJAR et EL KHROUB.

Alors la protection par fil de garde s'étale uniquement sur une longueur de **1KM** en amont et en aval des postes.

L'objet essentiel de notre travail l'amélioration de la protection de la boucle :

EHR- EKB- SKD- RDL- EHR contre les surcharges externes. Pour cette raison on fait le choix des anti-foudres suivants :

Avant d'introduire au choix des anti-foudres, il est nécessaire de calculer les paramètres qui lient au choix de ces derniers.

5.2 Niveau kéraunique (N_K)

D'après (Fig.2.01) des coudes isokérauniques mondiales on a remarqué que, le nombre de jours orageux par année, où on entend le tonnerre au Nord d'ALGÉRIE est égal à 20. Alors pour la région de ANNABA $N_K = 20$ (jours orageux/année). [35]

5.3 Densité de coup de foudre au sol (N_S)

Elle est égale à :

$$N_S = N_K / 7 = 20 / 7 = 2,86$$

$$N_S = 2,86 \text{ (1Km}^2 \text{ année)}$$

5.4 Nombres de coup de foudres (N_L) touchant la ligne

Ce nombre est calculé selon la formule empirique suivante :

$$N_L = N_K \sqrt{hp / 1m} / (400Km); (\text{coups} / \text{année} \cdot Km)$$

A- La ligne EHR- EKB :

$$N_{L1} = 20 \sqrt{21 / 1m} / (400Km) = 0,229 (\text{coups} / \text{année} \cdot Km)$$

$$= 28,72 \text{ (coups/année)}$$

B- La ligne EKB- SKD :

$$N_{L2} = 20 \sqrt{24 / 1m} / (400Km) = 0,245 (\text{coups} / \text{année} \cdot Km)$$

$$= 18,83 \text{ (coups/année)}$$

C- La ligne SKD- RDL :

$$N_{L3} = 20 \sqrt{22 / 1m} / (400Km) = 0,234 (\text{coups} / \text{année} \cdot Km)$$

$$= 4,19 \text{ (coups/année)}$$

D- L'ancienne ligne RDL- EHR :

$$N_{L4} = 20 \sqrt{22 / 1m} / (400Km) = 0,234 (\text{coups} / \text{année} \cdot Km) = 17,88 \text{ (coups/année)}$$

E- La nouvelle ligne RDL- EHR :

$$N_{L5} = 20 / \sqrt{28 / 1m} / (400 Km) = 0,264 (\text{coups} / \text{année} \cdot Km)$$

$$= 20,36 (\text{coups} / \text{année})$$

F- Nombre de coups de foudre touchant la boucle en question est égale à :

$$N_L = \frac{N_{ii}}{ni} = \frac{89,98}{5} 17,99 \cong 18$$

$$N_L = 18 (\text{coups/année})$$

5.5 Choix des parafoudres

Le problème du choix d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateur ou d'un parafoudre à oxyde de Zinc se pose à peine car, très rapidement, les parafoudres à oxyde de Zinc ont remplacés leurs homologues au carbure de silicium et à éclateur et très hautes tensions.

Les parafoudres à oxyde de Zinc sont en effet, usuellement considérés comme plus fiable et plus économiques.

- Le parafoudre à oxyde de Zinc à enveloppe métallique ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique à isolation gazeuse (généralement en zone très polluée).
- Le parafoudre à oxyde de Zinc à enveloppe synthétique fait maintenant pleinement partie de l'offre industrielle, tout du moins en ce qui concerne les parafoudres pour réseau de distribution.
- Le parafoudre à oxyde de Zinc intégré, rare en haute et très haute tension, présente les mêmes possibilités d'utilisation que les parafoudre à enveloppe métallique pour un coût qui devrait être moindre. Toutefois, en cas de défaillance du parafoudre, il faut intervenir aussi sur l'appareil à protéger. [26]

5.5.1 Paramètres de choix des parafoudres

On peut choisir un parafoudre selon les paramètres suivants :

5.5.1.1 Tension maximale de régime permanent « U_c »

C'est la valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliqué de façon continu entre les borne du parafoudre sans affecte son fonctionnement. La valeur de U_c est fonction du régime de neutre du réseau.

Pour les protections entre conducteur actifs et terre, il convient de choisir : [36]

- Pour les réseaux **IT**, $U_c \geq 1,732 U_o$;
- Pour les réseaux **TT** et **TN**, $U_c \geq 1,5 U_o$.

Avec : U_o ; tension simple du réseau en (volts).

Pour les protections entre phase et neutre, il convient de choisir $U_c \geq 1,1$ quelque soit le type de réseau.

On a $V = 220.000$ volts pour le réseau actuel, et $V = 400.000$ volts pour le réseau de futur.

Alors :

- Pour $V = 220.000$ on a $U_c \geq 1,1.220000 / \sqrt{3} \geq 139884,40$

Donc d'après le catalogue et pour un réseau de **220 Kv**.

- Pour $V = 400.000$ on a $U_c \geq 1,1.400000 / \sqrt{3} \geq 254335,26$

Pour un réseau de **400 Kv** on prend $U_c = (718 \text{ à } 914) \text{ Kv}$.

5.5.1.2 courant de court-circuit admissible « I_{cc} »

Qu'est la valeur maximale du court-circuit externe admissible définie pour constructeur, qui peut traverser le parafoudre lors d'un défaut sur la charge entre les bornes d'entrée et de sortie.

Le parafoudre et son dispositif de protection contre les courts-circuits doivent choisis de telle façon que le courant de court-circuit admissible I_{cc} soit supérieur au courant de défaut **50Hz** au droit du parafoudre.

Pour un réseau de **220 Kv** ou bien de **400 Kv** on a $I_{cc} = 25000 \text{ KA}$

5.5.1.3. Niveau de protection « U_p »

Le niveau de protection U_p est la tension au borne du parafoudre lors du passage du courant I_{max} . Le niveau de protection U_p est un paramètre qui caractérise les performances de protection du parafoudre.

Alors on prend U_p pour un réseau de **220 Kv**, la valeur $U_p = 475 \text{ Kv}$ et pour un réseau de **400 Kv**, la valeur $U_p = 850 \text{ Kv}$.

5.5.1.4. Courant maximal de décharge

I_{max} est la valeur maximale du courant de forme d'onde **8/20 μ_s** que peut subir un parafoudre. Cette valeur est donnée par le constructeur du parafoudre.

Une méthode empirique est proposée, qu'est valable en mode commun et en mode différentiel pour le choix de I_{max} [03] en fonction de l'estimation du risque **F**, La valeur de I_{max} est la suivante :

- Si $F \geq 2 \rightarrow I_{max} < 10 \text{ KA}$
- Si $2 < F \leq 4 \rightarrow I_{max} \geq 10 \text{ KA}$

➤ Si $F > 4 \rightarrow I_{\max} \geq 40KA$

Le niveau d'exposition aux surtensions de foudre F est évalué par la formule suivant :

$$F = N_L(1 + 2L + T_{HT} + \delta); \quad (5.01)$$

Avec :

N_L : la densité de foudroiement local en (*coup/année*)

L : la longueur de la ligne aérienne en (*Km*)

T_{HT} : est un coefficient qu'est égale à 1 pour les lignes aériennes.

δ : tient compte de la situation de la ligne aérienne et de l'installation.

Pour notre réseau qui situé dans site montagneux et plan ; $\delta = 1$

Donc on fait le calcul de F pour toutes les lignes de notre réseau :

➤ La ligne EHR- EKB :

$$F = 18(1 + 2.125,34 + 1 + 0,75) = 4561,74 > 4$$

➤ La ligne EKB- SKD :

$$F = 18(1 + 2.76,90 + 1 + 0,75) = 2817,90 > 4$$

➤ La ligne SKD- RDL :

$$F = 18(1 + 2.17,90 + 1 + 0,75) = 693,90 > 4$$

➤ La ligne RDL- EHR (288mm²) :

$$F = 18(1 + 2.76,27 + 1 + 0,75) = 2795,22 > 4$$

➤ La ligne RDL- EHR (411mm²) :

$$F = 18(1 + 2.76,95 + 1 + 0,75) = 2869,20 > 4$$

On constate que toutes les valeurs du risque F sont supérieures de la valeur 4

Alors :

$$I_{\max} \geq 40 KA.$$

Suite au calcul fait ; nous proposons les deux types des parafoudres suivant (*tableau.5.01*) :

Paramètres	Réseau actuel (220 Kv)	Réseau en voie de réalisation (400 Kv)
U_c (Kv)	416 à 527	718 à 914
I_{cc} (KA)	25 000	32 000
U_p (Kv)	475	850
I_{\max} (KA)	≥ 40	≥ 40

Tableau 5.01 caractéristiques des parafoudres proposés. (DJA Indelec)

5.6 Choix des éclateurs

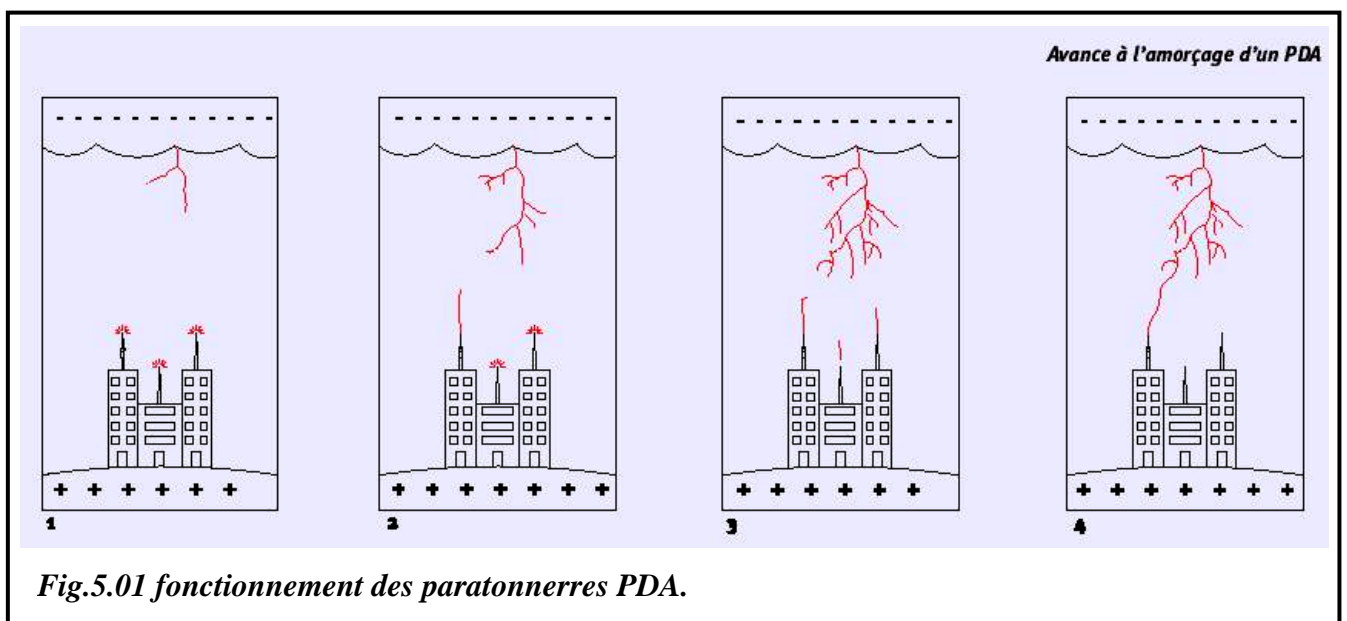
On a remarqué sur terrain que notre boucle est bien équipée avec les éclateurs, dont le premier type pour la protection des chaînes d'isolateurs sur chaque pylône de la ligne. Le deuxième type pour la protection des postes tel que : EHR, EKB, SKD.

5.7 Choix des paratonnerres

La protection contre les risques directs de la foudre des constructions des postes de transformation, les sites industriels, les bâtiments administratifs et tous les sites ouverts se fait par les paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA). [37]

Le Pulsar est pourvu d'une électronique qui lui permet d'émettre un signal haute tension de fréquence et d'amplitude déterminées et contrôlées permettant la formation anticipée du traceur ascendant à sa pointe et la propagation de celui-ci de façon continue vers le traceur descendant. Il puise l'énergie dont il a besoin dans le champ électrique existant lors de l'orage.

Après avoir capté la foudre, le pulsar la conduit vers la descente de paratonnerre et vers la terre où elle va disperser (*Fig.5.01*).



Concept de l'avance à l'amorçage

Au cours d'un orage, lorsque les conditions de champ de propagation sont réunies, le Pulsar crée le premier traceur ascendant. Le traceur ascendant issu de la pointe du paratonnerre se propage vers le traceur descendant du nuage à la vitesse moyenne de $1 \text{ m}/\mu\text{s}$.

L'avance à l'amorçage ΔT (μs), est définie comme le gain moyen en instant d'amorçage (instant de propagation continue du traceur ascendant) du traceur ascendant du paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA).

Où : ΔT est mesurée en laboratoire haute tension [38].

Au gain en instant d'amorçage ΔT correspond un gain en distance d'amorçage appelé ΔL .

$$\Delta L = v_{moy} \Delta T \quad ; \quad (5.02)$$

Avec : ΔL : Gain en distance d'initiation ou gain en distance d'amorçage en (m) ;

v_{moy} : Vitesse moyenne du traceur descendant (1 m/ μ s) ;

ΔT : Gain en temps d'initiation du traceur ascendant mesuré en laboratoire en (μ s).

Par l'application de la formule (5.02), on calcul le gain en distance d'amorçage du paratonnerre ΔT en (m), il y a plusieurs résultats de ΔT sont obtenus en laboratoire de INDELEC (FLORIDA) [38], on utilise ces résultats pour calculer les rayons de protection et par conséquent le choix propice des paratonnerres qui protègent les postes de la zone étudiée. Pour cette raison on a besoin de surface de chaque poste.

La surface de tous les postes : EHR, EKB, SKB et RDL est de (100 × 60) m². [39]

Alors le rayon de protection de chaque poste est le rayon du cercle centré sur le milieu du diagonal du rectangle qui représente la surface de chaque poste (100 × 60) m². Le rayon de protection dans ce cas est égal à 58 m, le rayon admissible est de 60 m. Donc on choisit le paratonnerre propice pour protéger chaque poste dont le type est : **PREVECTRON**® 2 S 6.60.

5.8 Choix des fils de garde

On a vu sur le réseau étudié que le câble de garde s'étale comme suit :

- 1- La ligne EHR – EKB : Sur toute la longueur avec une section de 94 mm².
- 2- La ligne EKB – SKD : Sur 2 km à la sortie de chaque poste, avec une section de 94 mm².
- 3- La ligne SKD – RDL : Sur 2 km à la sortie de chaque poste, avec une section de 94 mm² coté SKD et 116 mm² coté RDL.
- 4- L'ancienne ligne RDL – EHR : Sur 2 km à la sortie de chaque poste, avec une section de 116 mm² coté RDL et 94 mm² coté EHR.
- 5- La nouvelle ligne RDL – EHR : Sur toute la ligne, avec une section de 116 mm². [39]

5.8.1 Vérification des sections des câbles de gardes

On fait la vérification d'après la tenue thermique qui est donnée d'après l'expression suivante : [40]

$$S = I_{cc} / C \cdot (T_{cc})^{0,5} \quad ; \quad mm^2 \quad (5.01)$$

Avec: S : Section du conducteur en (mm²) ;

I_{cc} : Le courant de court-circuit dans la ligne en (A) ;

C : Constante qui tient compte de la nature du métal de fabrication du conducteur (pour l'aluminium $C=90$) ;

T_{cc} : Temps du passage du courant de court-circuit en (S) (limité par appareils).

➤ Pour la ligne de la section 288 mm^2 ;

$$I_{cc} = 24 \text{ KA}, T_{cc} = 1 \text{ S. [35]}$$

Donc :

$$S = 24 \cdot 10^3 / 9 \cdot (1)^{0,5} = 266,66 \text{ mm}^2$$

Alors la section admissible est de 288 mm^2

➤ Pour la ligne de la section 411 mm^2 ;

$$I_{cc} = 32 \text{ KA}, T_{cc} = 1 \text{ S. [35]}$$

$$S = 32 \cdot 10^3 / 90 \cdot (1)^{0,5} = 355,55 \text{ mm}^2$$

Alors la section admissible est de 411 mm^2

5.8.2 Optimisation de positionnement du câble de garde

On peut calculer le positionnement optimal du câble de garde par rapport aux conducteurs de phase d'après la formule suivante : [22]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{d-h}{d}\right) - \arcsin\left(\frac{n}{2d}\right) \quad ; \quad \text{rad} \quad (5.02)$$

Avec:

D : Distance d'amorçage sûr d'arc lors d'un coup de foudre, entre la tête du traceur par bond et le sol en (m) ;

h : la hauteur de phase par rapport au sol en (m) ;

n : Distance entre la câble de garde et la phase en (m) ;

θ : Angle de protection optimale ($\theta = 30^\circ$).

Après les calculs, toutes les distances optimal n sont représentées sur (*Tableau.5.03*)

<i>Paramètres postes</i>	<i>V (KV)</i>	<i>S (mm²)</i>	<i>I_c (KA)</i>	<i>d (m)</i>	<i>h (m)</i>	<i>n (m)</i>
<i>EHR – EKB</i>	220	288	6,95	31,60	13,5	5,5
<i>EKB – SKD</i>	220	288	6,95	31,60	14,5	3,0
<i>SKD – RDL</i>	220	288	6,95	31,60	14,0	4,5
<i>RDL – EHR</i>	220	288	6,95	31,60	14,0	4,5
<i>RDL – EHR</i>	220	411	6,95	31,60	15,0	2,0
<i>RDL – EHR</i>	400	411	8,20	36,00	15,0	7,0
<i>RDL – EHR</i>	400	411	8,20	36,00	15,0	7,0

Tableau.5.03 Résultats de calcul des distances (positionnement) optimales des câbles de garde

5.9 Conclusion

Dans cette partie de notre travail on a fait le choix adéquat des moyens de protection contre la foudre de la boucle considérée. Ces moyens sont :

- Deux types de parafoudres (*DGA indelec*) avec des caractéristiques mentionnées sur (*Tableau.5.0*), d'où un parafoudre pour chaque poste.
- Câble de garde avec des sections équivalents aux sections des lignes de transport et doivent être s'étaler sur toute la longueur de la ligne de transport de l'électricité et avec des positionnements optimales.
- Quatre paratonnerres ; d'où un paratonnerre pour chaque poste dont le type est : *PREVECTRON^{®2} S 6.60*.

Conclusion générale

Rappelons brièvement notre objectif dans ce travail : « La contribution à l'amélioration de la protection contre les surcharges atmosphériques ».

Nous tenons à souligner les difficultés rencontrées lors de la réalisation de tel projet. Les difficultés sont dus surtout au manque de données et l'impossibilité de faire des expériences sur site à cause de la très haute tension (moyens inexistantes et onéreux en plus du danger). Néanmoins nous avons achevé ce mémoire par les moyens de bord.

Dans notre étude nous avons commencé par l'étude détaillée du phénomène de la foudre dans le but d'éclaircir l'origine d'apparition aussi que les conséquences et les dégâts indésirables qu'il provoque.

Vu les effets néfastes et destructeurs de la foudre sur les lignes de transport de haute tension et ses différents éléments ; il est très important de se pencher sur les moyens de protection.

Une bonne partie de notre travail a été consacré aux moyens de protection contre les surtensions atmosphériques. Cela demande une vaste connaissance sur les différents moyens de protection, en plus les critères de choix ainsi que la destination de chaque moyen. Pour cette raison on a fait une analyse détaillée des différents moyens de protection contre la foudre et on a les classés en trois niveaux de protection qui sont :

- 1^{er} niveau ; consiste les paratonnerres, les câbles de garde et les cages maillées ;
- 2^{ème} niveau ; concernant les éclateurs et les parafoudres ;
- 3^{ème} niveau ; destiné spécialement pour les basses tensions.

Le modèle établis pour la ligne de transport d'énergie électrique de la boucle (EL HADJAR - EL KHROUB - SKIKDA - RAMDANE DJAMEL - EL HADJAR), nous a permis de faire une analyse complète du niveau de sécurité existant et la proposition des moyens adéquats de lutte contre la foudre. Ce modèle nous a permis aussi de déterminer les différentes pertes de puissance subies par la dite ligne en proposant un programme spécifique en langage MATLAB 5.3.

La détermination des pertes a donné les résultats suivants :

- Pertes actives et réactives dans les lignes ($U = 220 \text{ KV}$, $S = 288 \text{ mm}^2$, $n = 1$) et les lignes ($U = 220 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$), on a un gain économique annuel de **316 037 188 800,00 DA/année.**

Pour les lignes ($U = 400 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$) et les lignes ($U = 400 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 3$), on a un gain économique annuel qui s'élève à **2 257 796 990 000,00 DA/année.**

- Pertes effet couronne pour les lignes ($U = 400 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$) et les lignes ($U = 400 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 3$) on a un gain économique annuel de **22 592,25 DA/année.**
Pour les lignes ($U = 220 \text{ KV}$, $S = 288 \text{ mm}^2$, $n = 1$) et les lignes ($U = 220 \text{ KV}$, $S = 411 \text{ mm}^2$, $n = 2$), on a un gain économique annuel qui s'élève à **2 303 117,15 DA/année.**

Concernant les moyens de protection, nous constatons que les normes internationales ne sont pas entièrement respectées. Pour améliorer la protection et augmenter la fiabilité de la ligne ainsi que la continuité de service ; nous avons proposé les moyens de protection suivants :

- Deux types de parafoudre, le premier type est pour le réseau réel de **220 KV** et le deuxième type est pour le réseau en voie de réalisation, ces deux types sont de la marque parafoudre **DGA indelec.**
- Pour les éclateurs, on a remarqué sur terrain que notre réseau est bien équipé par ce moyen de protection.
- Pour les câbles de garde, on a proposé des câbles de garde avec des sections équivalentes à celles des phases (**288 mm²**, **411 mm²**) et avec un allongement sur toute la longueur de la ligne et avec des positionnements optimales.
- Pour les paratonnerres, on les a choisis pour protéger les postes de la boucle, dont le type est de : **PREVECTRON[®] 2 6 .60.**

Et n'oublions pas que l'effet couronne générée par la foudre possède un effet bénéfique puisqu'il contribue efficacement à l'atténuation de l'onde de choc.

[01] C. SERAVDIE « Surtensions et parafoudres, coordination de l'isolement », France, 1995.

[02] B.DE METZ – NOBLAT « La foudre et les installations électriques H .T », France, 1993.

[03] P.GRUET « Le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement, INERIS », France, Septembre 2001.

[04] A. BONAMY « lightning simulation testes in laboratory: a tool to validate modelling, IHS », Japan, August 1993.

[05] <http://www.google.fr/> formation des orages.

[06] M. Hulin « Electromagnétisme : équations de Maxwell » 1971.

[07] G. LE ROY, C. GARY, B. HUTZLER, J. LALOT, C. DUBANTON « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions » Paris, 1984.

[08] J. J MORF, M. IANOVICI, J. F ZURCHER « Compatibilité électromagnétique », Paris 1983.

Bibliographie

[01] O.HOUEY, Dimensionnement d'une jonction triphasée, LIÈGE, 1998.

[02] C.KATEZ, AL, Progress in the determination of the AC/DC resistance ratios of type-type

cable systems, IEEE paper, F78035-8

[03] M.AGUET, J-J.MORF, Traité d'électricité, vol 12, Energie électrique, Suisse, 1990.[04] T.GONENE, Modern power system analysis edition John Wiley and Sons, 1998.

4.5 Bibliographie

- [01] C.GARY « effet couronne sur les réseaux électriques » France, 2002
- [02] C.GARY « effet couronne en tension alternative ». Collection des études et recherches d'EDF. N° 24 éditions EYROLLES, 1976.
- [03] T.DEBU « ligne aérienne, paramètres électriques » France, 2002.
- M.AGUET, J.J.MORF « traité d'électricité » Vol.12, énergie électrique, [04]
1978.suisse,

Z_l	Impédance effective longitudinale	Ω/m
R_l	Résistance linéique	Ω/m
X_l	Réactance linéique	Ω/m
Y	Impédance effective transversale	S/m
Z_t	Impédance effective transversale	S/m
B_l	Suscéptance linéique	S/m
W	Pulsation du courant	Rad/s
C	Capacité	H
J	Densité de courant	A/m^2
τ	Conductivité électrique	$\Omega^{-1}.^{-1}$
E	Champ électrique	r/m
l	Longueur du conducteur	m
ρ	Résistivité du conteur	$(\Omega.m)$
ρ_0	Résistivité du conducteur	$\Omega.m$
α	Coefficient de température	$c^{\bullet-1}$
θ	Température	c^{\bullet}
μ_0	Profondeur de pénétration de l'effet pelliculaire	M
M_0	Perméabilité du vide	H/m
M_r	Perméabilité relative du conducteur	1
L_2	Réactance longitudinale (inductance)	H
\emptyset	Flux induit par le courant	Wb
i	Courant circulant dans le conducteur	A
C	Réactance transversale (capacité)	F
q	Charge électrique	C
I	Courant dans la phase	Ka
a	Opérateur de dérivation	1
U_p	Tension de phase	Kv
B	Induction magnétique	T
r	Rayon du conducteur	mm
M_{ii}, M_{ii}	Inductance propre linéique	H
M_{ij}, M_{ij}	Inductance mutuelle linéique	H
$M'_{ii,corr}$	Inductance propre linéique corrigée	H

$M'_{ij,corr}$	Inductance mutuelle linéique corrigée	H
$\mu_{rn}'\mu_{ri}$	Perméabilité relative du conducteur commun n et conducteur i	H/m
K_n, K_i	Facteurs correspondant au type des conducteur	1
$R_{ij}= r_{ji}$	Distance entre axes de conducteur i et j	m
r_{ii}	Rayon du conducteur	mm
e_i	Epaisseur du tube i	mm
ρ_i	Résistivité du conducteur i	Ω
i_i	Courant dans le conducteur i	A
i_n	Courant dans le conducteur n	A
v_{ij}	Tension entre les conducteur i et j	V
v'_{in}	Accroissement linéique de la tension U_n	V
U'_{ij}	Accroissement linéique de la tension U_{ij}	V
$\Delta\Phi_{3n}$	Flux ombragé par deux conducteur 3 et n	Wb
E	Tension induite entre deux conducteurs.....	V
$s = \frac{a}{at}$	Opérateur de dérivation par rapport au temps	1
ϵ_o	Constante électrique du vide	f/m
ϵ_r	Constante électrique relative	1
r_{jp}	Distance du point p au conducteur j	m
R_{j^*p}	Distance du point p au conducteur j*	m
E	Champ électrique	V/m
V_p	Potentiel du point p	V
E_c	Champ électrique critique	Kv/cm
$D_{s,l}$	Densité relative de l'air	1
E_o	Champ critique en fonction de l'état de surface	Kv/cm
m	Coefficient qui tient compte de l'état de surface	1
E_s	Champ électrique superficiel	Km/cm
E_{s^*}	Champ électrique superficiel relatif	1
$P_{pl,fai}$	Pertes sous pluie faible	w/m
$E_{s,max}$	Champ électrique maximal	Kv/cm
$E_{s,moy}$	Camp électrique moyen	Kv/cm
K	Coefficient de réduction	1
$r_{ep}r_{eq}$	Rayon électrique des conducteurs	mm

ρ	Rayon de charge d'espace	<i>m</i>
B	Facteur de peek	<i>l</i>
n	Nombre de conducteur par phase	<i>l</i>
$P_{pl,for}$	Pertes sens pluie forte	<i>w/m</i>
$P_{t,hum}$	Pertes en temps humide	<i>w/m</i>
$P_{t,sec}$	Pertes en temps sec	<i>w/m</i>
P_o	Pertes en fonction de l'état des conducteurs	<i>w/m</i>
P	Pression de l'air	<i>cm Hg</i>
t_o	Température ambiante	<i>c°</i>
H_{alt}	Altitude au niveau de la mer	<i>cm</i>
f	Fréquence	<i>HZ</i>
r_i, r_c	Rayon du conducteur	<i>l</i>
r_f	Rayon du cercle circonscrit un faisceau	<i>mm</i>
λ_{ii}	Coefficient de potentiel propre	<i>l</i>
h_i, h_j	Hauteur moyenne du conducteur par rapport an sol	<i>m</i>
H	Hauteur d'ancrage	<i>m</i>
F	Flèche	<i>m</i>
d_{cj}	Distance entre phases	<i>m</i>
V_L	Tension de la ligne	<i>V</i>
V	Tension simple de la ligne	<i>V</i>
q	Charge linéique	<i>c/m</i>
$T_{pl,for}$	Temps de la pluie forte	<i>h</i>
$T_{pl,fai}$	Temps de la pluie faible	<i>h</i>
$T_{T,sec}$	Temps du temps sec	<i>h</i>
$T_{T,hum}$	Temps du temps humide	<i>h</i>
$T_{Tem,sab}$	Temps du tempête de sable	<i>h</i>
$W_{ef,co}$	Perte d'énergie active par effet couronne	<i>Kwh/km</i>
$N.R$	Nombre d'heures	<i>H</i>
$\mu_{ef,co}$	Perte d'énergie réactive par effet couronne	<i>kvarh/k_m</i>
$Tg\ ce$	Correspondant au facteur de puissance	<i>l</i>
$W_{act.}$	Pertes actives dans la ligne	<i>W</i>
R_l	Résistance longitudinale de la ligne	Ω

$I_{l(r)}$	Courant longitudinal au milieu de la ligne (partie réelle)	A
G_p	Conductance résultant de toutes les conductances	<i>s</i>
U_p	Tension simple de phase	V
$V_{réa.}$	Pertes réactives dans la ligne	VAR
B_p	Susceptance résultant de l'ensemble des susceptances	<i>s</i>
X_l	Réactance longitudinale de la ligne	Ω
V_c	Tension maximale de régime permanent	<i>v</i>
V_o	Tension simple du réseau	<i>v</i>
I_{cc}	Courant de court-circuit	KA
U_p	Niveau de protection	KV
I_{max}	Courant maximal de décharge	KA
F	Niveau d'exposition de la foudre	l
$T_{H.T}$	Coefficient qui tient compte de type des lignes	l
δ	Coefficient qui tient compte de la situation des lignes	l
ΔL	Gain en distance d'amorçage	m
ΔT	Gain en temps d'initiation du traceur ascendant	μs
v_{moy}	Vitesse moyenne du traceur descendant	$m/\mu s$
C	Constante qui tient compte de la nature du métal de fabrication des conducteurs	l
s	Section des conducteurs	mm^2
T_{cc}	Temps de passage du courant de court-circuit	s

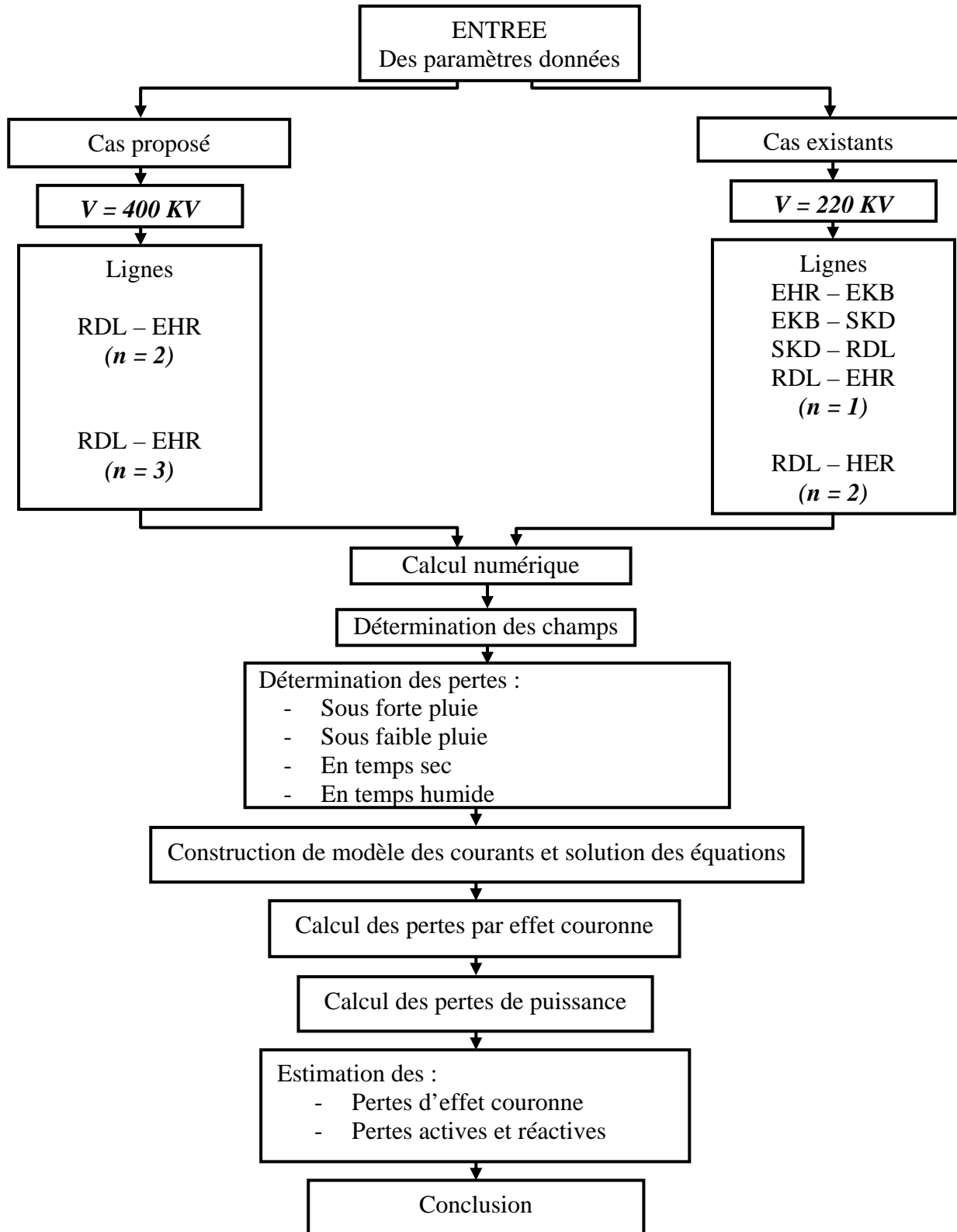
Bibliographie

- [01] C. SERAURDIE « Surtensions et parafoudres, Coordination de l'isolement » France, 1995.
- [02] B. DE METZ-NOBLAT « la foudre et les installations électriques HT » France, 1993.
- [03] P. GRUET « Le risque Foudre et les installations classés pour la protection de l'environnement, INERIS » France, Septembre 2001.
- [04] A. BONAMY « Lightning Simulation Testes in Laboratory: a tool to validate modelling, IHS » Japan, August 1993.
- [05] <http://www.google.fr/> formation des orages.
- [06] M. HULIN « Electromagnétisme : équations de Maxwell » Japon, 1971.
- [07] G. LE ROY, C. GARY, B. HETZLER, J. LALOT, C. DUBANTON « les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions » Paris, 1984.
- [08] J-J. MORF, M. IANOVICI, J-F. ZURCHER « Compatibilité électromagnétique » Paris, 1983.
- [09] <http://www.ffme.fr/index.htm>.
- [10] M. AGUET, M. IANOVICI « Traité d'électricité, volume 22, Haute tension » Suisse, 1982.
- [11] S.A. PRENTICE « compteur de coup de foudre, Electro. CIGRE N° 22, Paris, 1972.
- [12] K-S. KREIEL SHEIMER, D. LODGE – OSBORN « A lightning counter to distinguish between ground and cloud flashes, Planetary electroynamics, Gordon and Breach, New York, volume 2, 1996.
- [13] R-H. GOLDE, E. ARNOLD « Lightning protection » London, 1973.
- [14] R-B. ANDERSON, H-R. VAN NIEKERK, S-A. PRENTICE, D. MACKERRAS « Compteurs des coups de foudre perfectionnés, Electro. CIGRE, N° 66, 1973.
- [15] J-R. GUMBY, M. I-E AUST « Lightning prediction techniques », Electro. Eng. Trans. 1973.
- [16] C. GARY, A. CIMADOR, R. FIEUX « Connaissance actuelle de la foudre et méthode de calcul de la protection des lignes de transport », Tome 89, N° 1, 1975.
- [17] « Recommandation pour les installations de protection contre la foudre », publ. ASE, ZÜRICH, 1967.
- [18] M. AGUET, ph. BLECH, M. IANOVICI, B. SCHAEDELI « Influence des prises de terre durant un choc de foudre » Suisse, 1978.
- [19] P. GRANEAU « Underground power transmission » New York, 1979.

- [20] M. AGUET, ph. BLECH, M. IANOVICI « Coordination probabilistique de l'isolement des réseaux à haute tension », Tome 68, N° 24, 1977.
- [21] M. AGUET, U. CAVALLI « Méthode de calcul de l'influence des câbles à haute tension sur les lignes de transmission », BII, ASE – UCS, Tome 67, N° 16, 1976.
- [22] M. AGUET, J-J. MORF « Traité d'électricité, volume 12, Energie électrique » Suisse, 1990.
- [23] « Vocabulaire Electrotechnique international » publication CEI, N° 50-05, GENEVE.
- [24] M. GRACIET, J. PINEL « Protection contre les perturbations, Composants de protection » Paris, 1998.
- [25] « Parafoudres » publication CEI, N° 99-1, GENEVE, 1970.
- [26] F. MACIELA « Parafoudres », D4755, Paris, 1998.
- [27] I. HENNEBIQUE, A. ROUSSEAU, A. VICAUD « Connaissance et application des parafoudres à oxyde de zinc », CIGRE, article 33-10, 1986.
- [28] O. HOUET « Dimensionnement d'une jonction triphasée », LIEGE, 1998.
- [29] C. KATZ, AL « Progress in the determination of the AC/DC resistance ratios of type-type cable systems », IEEE paper, F 78035-8.
- [30] T. GÖNENE « Modern power system analysis » édition John Wiley and sons, 1998.
- [31] C. GARY « Effet couronne sur les réseau électriques » Paris, 2002.
- [32] « Mechanisms of development of the discharge of the towsend and of the Corona discharge » ULG, ELAP, SEA, Liège, 01/06/2003.
- [33] C. GARY, M. MOREAU « L'effet couronne en tension alternative, collection des études et recherches d'EDF, N° 24, édition Exrolles, 1976.
- [34] T. DEBU « Lignes aériennes, paramètres électriques » Paris, 2002.
- [35] « Document SONELGAZ, DTE, DSG », Annaba, 03/08/2003.
- [36] Association Protection Foudre, Nouvelle C 15-100, Janvier 2004.
- [37] « mécanisme et localisation de la foudre » NF C 17-102, Octobre 2003.
- [38] « Testes de qualification en laboratoire HT des paratonnerres » NF C 17-102, Juin, 1995, INDELEC.
- [39] « Document SONELGAZ, DTE, DSG » Annaba 02/06/2002.
- [40] « Installation d'éclairage public, guide pratique, dispositifs de déconnection automatique pour l'éclairage public » UTE C 17-210, Août 2003.

Annexe

L'organigramme de tous les calculs est le suivant:



<i>Paramètres lignes</i>	<i>V (KV)</i>	<i>S (mm²)</i>	<i>L (km)</i>	<i>h_i (m)</i>	<i>d_{ij} (m)</i>	<i>n</i>	<i>r_f (mm)</i>	<i>L'état des conducteurs</i>	<i>W_{ef.co} (kwh/km)</i>	<i>W_{ef.co.L} (kwh)</i>	<i>V_{EF.CO.L} (KVARh)</i>
EHR-EKB	220	288	125,34	13,5	8,5	1		Vieillis	6998,00	877 129,32	315 766,55
EKB-SKD	220	288	76,90	14,5	8,5	1		Vieillis	6943,90	533 985,91	192 234,92
SKD-RDL	220	288	17,90	14,0	8,5	1		Vieillis	6969,50	124 754,05	44 911,45
RDL-EHR	220	288	76,27	14,0	8,5	1		Vieillis	6969,50	531 563,76	191 362,95
RDL-EHR	220	411	76,95	15,0	9,5	2	211,44	Neufs	55,52	4 272,26	1 538,01
RDL-EHR	400	411	76,95	15,0	9,5	2	211,44	Neufs	450,44	34 661,35	12 478,08
RDL-EHR	400	411	76,95	15,0	9,5	3	240,04	Neufs	339,17	26 099,13	9 395,68

Tableau.4.01 Résultats de calcul des pertes par effet de couronne dans les lignes de transport.

Avec :

$P_c = 76 \text{ cm Hg}$; au niveau de la mer ;

$t^\bullet = 240^\bullet$: Température ambiante ;

$H_{alt} = 23 \text{ m}$: Altitude au niveau de la mer ;

$m = 0,9$: Coefficient de l'état de surface ;

$Nh_{pl, far} = 821 \text{ heures}$;

$Nh_{pl, fai} = 1337 \text{ heures}$;

$Nh_{t, hum} = 196 \text{ heures}$;

$Nh_{tm, sab} = 0$;

$\text{Cos } \theta = 0,94 \Rightarrow \text{Tg } \theta = 0,36.$

Matrices des différents modèles réels de transport d'énergie électrique :
tt =1

$$\text{aa1} = \begin{matrix} 17.5030 & 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 17.5030 & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i & 17.5030 \end{matrix}$$

tt =2

$$\text{aa2} = \begin{matrix} 10.4590 & 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 10.4590 & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i & 10.4590 \end{matrix}$$

tt =3

$$\text{aa3} = \begin{matrix} 1.8580 & 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 1.8580 & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i & 1.8580 \end{matrix}$$

tt =4

$$\text{aa4} = \begin{matrix} 10.1530 & 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 10.1530 & 0 + 0.0002i \\ 0 + 0.0002i & 0 + 0.0002i & 10.1530 \end{matrix}$$

tt = 5

$$\begin{array}{l}
 \text{aa5} = \quad 3.9280 \qquad 0 + 0.0002i \qquad 0 + 0.0002i \\
 \qquad \quad 0 + 0.0002i \qquad 3.9280 \qquad 0 + 0.0002i \\
 \qquad \quad 0 + 0.0002i \qquad 0 + 0.0002i \qquad 3.9280
 \end{array}$$

tt = 6

$$\begin{array}{l}
 \text{aa6} = \quad 3.9280 \qquad 0 + 0.0002i \qquad 0 + 0.0002i \\
 \qquad \quad 0 + 0.0002i \qquad 3.9280 \qquad 0 + 0.0002i \\
 \qquad \quad 0 + 0.0002i \qquad 0 + 0.0002i \qquad 3.9280
 \end{array}$$

tt = 7

$$\begin{array}{l}
 \text{aa7} = \quad 3.9280 \qquad 0 + 0.0002i \qquad 0 + 0.0002i \\
 \qquad \quad 0 + 0.0002i \qquad 3.9280 \qquad 0 + 0.0002i \\
 \qquad \quad 0 + 0.0002i \qquad 0 + 0.0002i \qquad 3.9280
 \end{array}$$

Perspectives

Nous souhaitons de tenir compte les recommandations et les propositions suivantes :

- Chaque ligne de transport d'électricité doit être en faisceau pour le but d'atténuer les pertes de l'effet de couronne.
- Pour diminuer les pertes de puissances actives et réactives, on utilise des conducteurs de phase de faible résistivité, on diminue la longueur des lignes de transport (création des centrales de production d'énergie), on augmente la section des lignes on respectant les normes internationales, réaliser rapidement le projet de **400 KV** qui sera le premier projet de très haute tension en Algérie.
- Installer les parafoudres choisis.
- Installer les paratonnerres choisis.
- Placer (mise en place) les câbles de gardes choisis sur toute la longueur de la ligne en respectant les positionnements optimaux déterminés.

Enfin, avec l'application de ces recommandations ; la boucle étudiée deviendra bien protégée contre les risques de la foudre, ainsi que les pertes seront très faibles.

Conclusion générale

Rappelons brièvement notre objectif dans ce travail : « La contribution à l'amélioration de la protection contre les surcharges atmosphériques ».

Cette étude a été très difficile puisque elle s'est accompagnée avec beaucoup plus des problèmes et des obstacles qui nous ont donné le sens et la procédure de la recherche scientifique, malgré pour notre cas est une initiation de recherche, elle donne les horizons de futur pour différentes et hautes recherches de l'avenir.

Pour notre objet on a commencé par une étude détaillée de la phénoménologie de la foudre. Cette étude nous a donné la vérité de la foudre, cette dernière est un phénomène trop dangereux et s'accompagne toujours les lignes de haute tension de transport d'énergie électrique. Ce phénomène influe directement sur l'apparition de l'effet couronne.

Alors on exige une haute protection des installations électriques contre les risques de foudre. Cela demande une vaste connaissance sur les différents moyens de protection, en plus les critères de choix ainsi que la destination de chaque moyen. Pour cette raison on a fait une analyse détaillée des différents moyens de protection contre la foudre et on a les classés en trois niveaux de protection qui sont :

- 1^{er} niveau ; consiste les paratonnerres, les câble de garde et les cages maillées ;
- 2^{ème} niveau ; concernant les éclateurs et les parafoudres ;
- 3^{ème} niveau ; destiné spécialement pour les basses tensions.

Pour confirmer ce qui est cité précédemment on a pris le réseau de l'Est d'Algérie de haute tension **220 KV** : EL HADJAR - EL KHROUB - SKIKDA - RAMDANE DJAMEL - EL HADJAR.

On a calculé tout d'abord les pertes par effet de couronne active et réactive de chaque ligne de notre boucle étudiée, dans ce cas on a conclu que ces pertes sont beaucoup plus élevées dans les lignes avec un seul conducteur par phase ($U = 220 \text{ KV}$, $S = 288 \text{ mm}^2$, $n = 1$). Mais pour une ligne de deux conducteurs par phase (en faisceau) les pertes couronnes sont diminuées avec une grande valeur, cette diminution continue pour trois conducteurs par phase. Le calcul de ces pertes a été fait par la réalisation d'un programme en langage MATLAB 5.3.

Ces pertes augmentent avec les conditions climatiques défavorables (la température, la pluie, la pression, ...etc.)

On a calculé aussi les pertes de puissance active et réactive dans chaque ligne, cela a exigé l'établissement d'un modèle mathématique de chaque ligne électrique. On a fait aussi une estimation de ces pertes en DA/année pour voir le gain entre les lignes avec un conducteur et les lignes en faisceau et qui a été très grand.

Dans la dernière partie on a fait le choix adéquat et propice des moyens de protection de notre boucle contre les foudres qui sont :

- Deux types de parafoudre, le premier type est pour le réseau réel de **220 KV** et le deuxième type est pour le réseau en voie de réalisation, ces deux types sont de la marque **parafoudre DGA indelec**.
- Pour les éclateurs, on a remarqué sur terrain que notre réseau est bien équipé avec ce moyen de protection.
- Pour les câbles de garde, on a proposé des câbles de garde avec des sections équivalentes à celles des phases (**288 mm², 411 mm²**) et avec un allongement sur toute la longueur de la ligne et avec des positionnements optimales.
- Pour les paratonnerre, on les a choisis pour protéger les postes de la boucle, dont le type est de : **PREVECTRON[®] 2 6 .60**.

Et n'oublions pas que l'effet couronne généré par la foudre et avec ses pertes, on peut dire que celui-ci possède un effet bénéfique puisqu'il contribue efficacement à l'atténuation de l'onde de choc.

Perspectives

Nous souhaitons de tenir compte les recommandations et les propositions suivantes :

- Chaque ligne de transport d'électricité doit être en faisceau pour le but d'atténuer les pertes de l'effet de couronne.
- Pour diminuer les pertes de puissances actives et réactives, on utilise des conducteurs de phase de faible résistivité, on diminue la longueur des lignes de transport (création des centrales de production d'énergie), on augmente la section des lignes on respectant les normes internationales, réaliser rapidement le projet de **400 KV** qui sera le premier projet de très haute tension en Algérie.
- Installer les parafoudres choisis.
- Installer les paratonnerres choisis.
- Placer (mise en place) les câbles de gardes choisis sur toute la longueur de la ligne en respectant les positionnements optimaux déterminés.

Enfin, avec l'application de ces recommandations ; la boucle étudiée deviendra bien protégée contre les risques de la foudre, ainsi que les pertes seront très faibles.

PREMIER SEMINAIRE NATIONAL :
LA MAINTENANCE, UN OUTIL DE L'EXCELLENCE INDUSTRIEL

Organisé par :

Département de la maintenance industrielle

Centre universitaire de Souk Ahras

Du 18 au 19 Mai 2004

DAAS ABDELHAKIM , HADDOUCHE ALI

Université Badji Mokhtar Annaba

Faculté des Sciences de L'ingénieur

Département d'Electromécanique

E -mail : unidtrhakim@yahoo.fr

**MODELISATION D'UNE LIGNE ELECTRIQUE ET CALCUL DES PERTES DANS
CETTE LIGNE**

1 Introduction

Le modèle mathématique d'une ligne électrique doit être adapté au problème étudié (posé) et sera différent suivant qu'il existe ou non un courant dans le sol et suivant la rapidité du phénomène étudié.

Pour rendre compte des effets produits par la résistivité des métaux, qui constituent les conducteurs d'une ligne électrique, et par la résistivité du sol, considéré comme $n^{ième}$ conducteur, on va introduire les notions de résistances rapportées à l'unité de longueur ou résistance linéiques R'_1, R'_2, \dots, R'_n .

Pour rendre compte des effets des flux d'induction magnétique circulant autour et entre les conducteurs, voire à l'intérieur même de ceux-ci, on introduit les notions de l'inductance linéiques propres et mutuelles (M'_{ii}, M'_{ij}) ; (H/m).

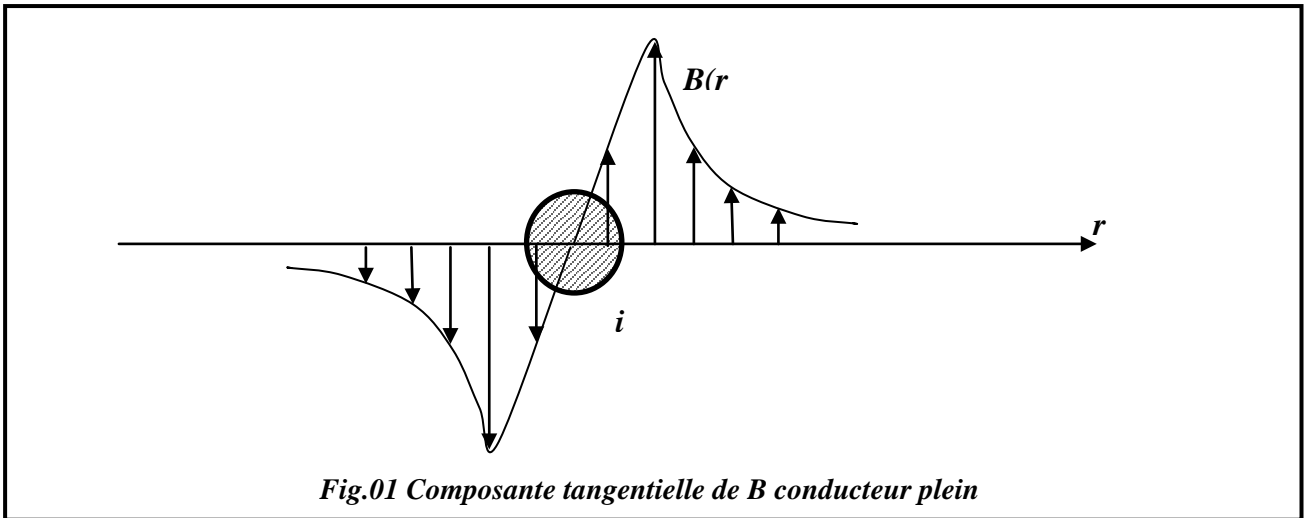
Pour établir un modèle mathématique complet ; il est nécessaire de connaître les paramètres suivants :

2 Induction magnétique créée par un conducteur seul

Le passage d'un courant électrique i , dans un conducteur cylindrique de longueur supposée infinie, crée un champ d'induction magnétique circulaire dont la composante tangentielle à l'extérieur du conducteur est donnée par le théorème d'AMPÈRE :

$$B = \mu_0 i / 2\pi r \quad ; T \quad (01)$$

Le schéma (Fig. 01) représente $B = f(r)$ pour un conducteur plein, pour un courant continu $i = I$



3 Géométrie du système à n conducteurs

Soit un ensemble de n conducteurs cylindriques et creux parcourus par les courants i_1, i_2, \dots, i_n . Le sol est assimilé à un conducteur de propriété différente (l'indice n sera attribué à ce conducteur). [01]. Pour un conducteur plein il faut faire une correction :

$$M'_{ij,corr} = M'_{ij} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rn} \cdot K_n}{8 \cdot \pi} ; H \quad (02)$$

$$M'_{ii,corr} = M'_{ii} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{ri} \cdot K_i}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rn} \cdot K_n}{8 \pi} ; H \quad (03)$$

Avec : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (H/m)$

M'_{ij}, M'_{ii} : Les inductances linéiques mutuelles et propres.

$\mu_{rn}, \mu_{ri} = 1 \quad (H/m)$, où elles sont les perméabilités relatives du conducteur commun n et du conducteur i .

K_n et K_i : sont des facteurs nuls si les conducteurs correspondants sont creux, ils prennent la valeur 1 s'ils sont pleins ou encore une valeur comprise entre 0 et 1 si le tube conducteur est non négligeable.

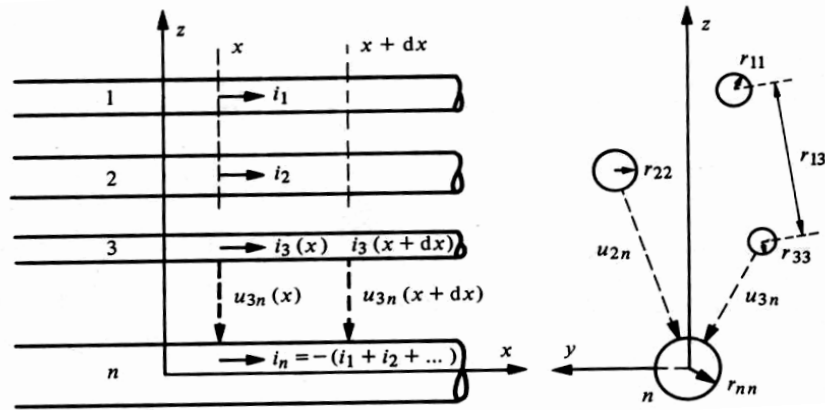


Fig.02 Géométrie des n conducteurs

Nous définissons les grandeurs suivantes qui se rapportent à la (Fig.02) :

$r_{ij}=r_{ji}$: la distance entre axes de conducteurs i et j ;

r_{ij} : le rayon du conducteur i ;

e_i : l'épaisseur du tube i où ($e_i \ll r_{ii}$) ;

ρ_i : la résistivité du conducteur i ;

i_i : le courant dans le conducteur i , compté positivement dans le sens des X croissant.

i_n : le courant dans le conducteur de référence n ;

U_{ij} : la tension entre le conducteur i et le conducteur j ;

U_{in} : la tension transverse entre le conducteur i et le conducteur de référence n à l'abscisse X

$U'_{in} = \frac{\delta U_{in}}{\delta X}$: l'accroissement linéique de la tension U_{in} ;

$U'_{ij} = \frac{\delta U_{ij}}{\delta X}$: l'accroissement linéique de la tension U_{ij} .

4 Flux embrassé par deux conducteurs dans un système à conducteurs

Comme la somme des courants doit être nulle, on peut toujours choisir l'un de conducteurs comme conducteur de retour et comme conducteur de référence (c'est le cas pour le sol qui sera considéré comme le conducteur n). [03]

On désignera par n le conducteur de référence et de retour avec :

$$i_n = - (i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1}) \quad ; \quad A \quad (04)$$

On obtient de cette manière un ensemble de $(n-1)$ dispositions similaires formées par des paires de conducteurs 1 et n , 2 et n , ..., $(n-1)$ et n . On peut donc limiter à l'étude d'une seule paire formée par un conducteur d'aller et le conducteur de retour n , les phénomènes restant

semblables pour les autres paires. Par exemple pour la paire 3 et n (Fig.03), le flux élémentaire $\Delta\Phi_{3n}$ embrassé par ces conducteurs sur la longueur Δx est :

$$\Delta\Phi_{3n} = \Delta\Phi_{3n,1} + \Delta\Phi_{3n,2} + \Delta\Phi_{3n,3} + \Delta\Phi_{3n,n} \quad ; Wb \quad (05)$$

Où :

$\Delta\Phi_{3n}$: est le flux d'induction embrassé par un rectangle ABCDA dont les cotés AB et CD sont situés respectivement dans les conducteurs 3 et n à des endroits quelconques à l'intérieur de ces derniers.

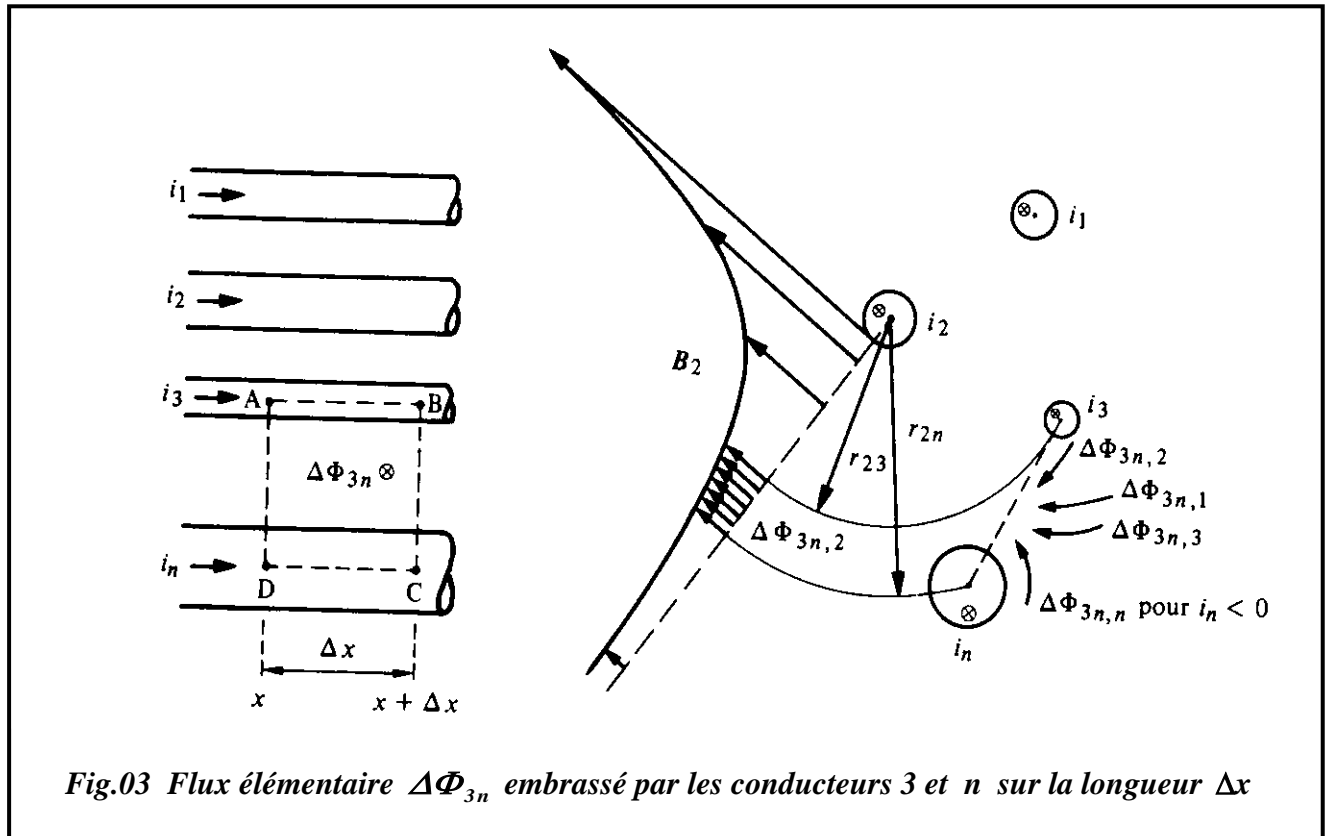


Fig.03 Flux élémentaire $\Delta\Phi_{3n}$ embrassé par les conducteurs 3 et n sur la longueur Δx

La liaison entre le flux embrassé et l'induction est donnée par le théorème de GAUSSE :

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds \quad ; \quad Wb \quad (06)$$

En précisant les limites de l'intégration dans les expressions des $\Delta\Phi_{3n,k}$ et tenant compte de l'équation (01), nous trouvons :

$$\Delta\Phi_{3n,1} = \Delta x \int_{r_{13}}^{r_{1n}} \mu_0 \cdot \frac{i_1}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{1n}}{r_{13}}\right) \cdot i_1 ; Wb \quad (07)$$

$$\Delta\Phi_{3n,3} = \Delta x \int_{r_{33}}^{r_{3n}} \mu_0 \cdot \frac{i_3}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{3n}}{r_{33}}\right) \cdot i_3 ; Wb \quad (08)$$

5 Tension induite entre deux conducteurs

Choisissons un contour $ABCD$ qui passe à l'intérieur des conducteurs 3 et n et aux abscisses X et $X+\Delta X$ (*Fig. 03*). La tension induite par la variation du flux embrassé dû à tous les courants voisins, y compris le courant propre (loi de LENZ) :

$$\oint E \cdot dI = -\frac{d\Delta\Phi_{3n}}{dt} ; V \quad (09)$$

On peut exprimer ces deux grandeurs en remontant aux définitions de la (*Fig.03*) :

$$\int_A^B E \cdot dI = R'_3 \cdot \Delta x \cdot i_3 ; V \quad (10)$$

Où :

$$R'_3 = \rho_3 / S_3 ; \Omega/m \quad (11)$$

$$\int_B^C E \cdot dI = U_{3n} + \frac{\delta U_{3n}}{\delta X} \Delta X ; V \quad (12)$$

$$\int_C^D E \cdot dI = R'_n \cdot \Delta x \cdot i_n ; V \quad (13)$$

$$\int_D^A E \cdot dI = -U_{3n} ; V \quad (14)$$

$$\Delta\Phi_{3n} = \sum_{k=1}^n \Delta\Phi_{3n,k} ; Wb \quad (15)$$

Où :

$\Delta\Phi_{3n,k}$: est la part du flux dû au conducteur K ce qui nous donne pour le contour $ABCD$:

$$-\frac{d\Delta\Phi_{3n}}{dt} = R'_3 \Delta x i_3 + U_{3n} + U'_{3n} \Delta x - R'_n \Delta x i_n - U_{3n} ; Wb \quad (16)$$

R'_3 et R'_n : sont les résistances linéiques des conducteurs 3 et n définie par (17) où S_i est la section du conducteur i .

$$R'_i = \rho_i / S_i ; \Omega/m \quad (17)$$

$$U'_{3n} = \frac{\delta U_{3n}}{\delta X} : \text{est l'accroissement linéique de tension.}$$

6 Matrice des résistances et des inductances longitudinales linéiques

En exprimant les équations fondamentales de la tension induite la relation (16), on obtient l'équation matricielle des accroissements linéiques de tension U'_{in} le long du circuit formé par

les conducteurs i et n dus à la somme des résistances des conducteurs, ainsi qu'aux flux d'inductions mutuelles ou propres créés par l'ensemble des n courants : [02]

$$\begin{pmatrix} -U'_{1n} \\ -U'_{2n} \\ -U'_{(n-1)n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R'_1 + R'_n + SM'_{11}) & (R'_n + SM'_{12}) & \dots \\ (R'_n + SM'_{21}) & (R'_2 + R'_n + SM'_{22}) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Où : $\overbrace{\hspace{15em}}^{Z'}$

$S = \frac{\delta}{\delta t}$: est l'opérateur de dérivation par rapport au temps, avec

➤ L'inductance linéique mutuelle : $M'_{ji} = M'_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{jn} r_{in}}{r_{ij} r_{nn}}$; H/m (19)

➤ L'inductance linéique propre : $M'_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{in}^2}{r_{ii} r_{nn}}$; H/m (20)

➤ La tension linéique : $U'_{in} = \frac{\delta U_{in}}{\delta x}$; V/m (21)

Il faut tenir compte de la correction à apporter aux deux valeurs de l'inductance si le conducteur est plein (voir la remarque précédente).

7 Extension à système triphasé équilibré

Dans l'hypothèse d'un réseau « triphasé parfaitement équilibré » c.à.d $\sum_{k=1}^3 i_k = 0$, $I_n = 0$

Nous avons donc trois phases variant sinusoïdalement.

La relation matricielle (18) devient :

$$\begin{pmatrix} -U'_{1n} \\ -U'_{2n} \\ -U'_{3n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R'_1 + sM'_{11}) & sM'_{12} & sM'_{13} \\ sM'_{21} & (R'_2 + sM'_{22}) & sM'_{23} \\ sM'_{31} & sM'_{32} & (R'_3 + sM'_{33}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Où :

$S = j\omega$; en tenant compte d'un réseau équilibré : $(i_1 + i_2 + i_3) = 0$

Nous avons donc :

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{nn}} \cdot (i_1 + i_2 + i_3) = 0 \quad (23)$$

Ce qui nous amène aux nouvelles expressions des inductances linéiques :

$$M'_{ij} = M'_{ji} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{jn} r_{in}}{r_{ij}} \quad ; H/m \quad (24)$$

$$M'_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{in}^2}{r_{ii}} \quad ; \quad H/m \quad (25)$$

Elles sont maintenant indépendantes du rayon du conducteur de retour r_{nn} .

8 Perte dans la ligne électrique

8.1 Calcul des pertes actives

La somme des puissances actives sortant des accès du réseau est toujours négative. Elle correspond à la somme de toutes les pertes de puissance active dans les lignes, changée de signe.

$$W_{act.} = 3R_l \cdot I_{l(r)}^2 + 3G_p \cdot U_p^2 ; W \quad (26)$$

Où :

R_l : Résistance longitudinale de la ligne en (Ω) ;

$I_{l(r)}$: Courant longitudinal au milieu de la ligne, on prend la partie réelle, en (A) ;

G_p : Conductance résultant de toutes les conductances transversales des demi lignes en (S) ;

U_p : Tension simple de la phase en (V).

8.2 Calcul des pertes réactives

La somme des puissances réactives sortant des accès du réseau est en général positive en période de faible charge et négative en période de forte charge. Elle est égale à la somme des puissances réactives produites par les capacités linéiques transversales des lignes moins la somme des puissances réactives absorbées par les inductances linéiques longitudinales. [02]

$$V_{réa.} = 3B_p \cdot U_p^2 - 3X_l \cdot I_{l(im)}^2 ; VAR \quad (27)$$

Où :

B_p : Susceptance résultant de l'ensemble des susceptances transversales des demi-lignes incidentes au nœud p , en (S) ;

X_l : Réactance longitudinale de la ligne considérée en (Ω) ;

$I_{l(im)}^2$: Courant longitudinale au milieu de la ligne, on prend la partie imaginaire, en (A).

Application

Comme un exemple pour appliquer notre modèle ; on prend la boucle électrique :

ELHADJAR – ELKHROUB – SIKKDA – RAMDAME DJAMEL – ELHADJAR, de haute tension 220KV, et 400KV pour le projet en voie de réalisation.

Alors à partir de ce modèle général on établit le modèle réel de chaque ligne de la boucle considérée afin de calculer les pertes actives et réactives de chaque ligne. Pour cette raison, on fait un programme par le langage MATLAB 5.3 qui gère cette situation et qui fait ressortir les paramètres de charge (I).

D'où le modèle réel de chaque ligne est :

Les résultats du programme sont résumés sur le tableau en annexe et nous confirme les conclusions et recommandations suivantes :

On a conclu que les pertes sont plus grandes lors de transmission de l'énergie, alors on peut les atténuer avec :

- Augmentation de la section des conducteurs ;
- Utilisation des conducteurs dont le matériau de fabrication est de faible résistivité ;

- Diminution de la longueur de la ligne de transport (création des centrales électriques).

Bibliographie

- [01] O.HOUET, Dimensionnement d'une jonction triphasée, LIÈGE, 1998.
- [02] M.AGUET, J-J.MORF, Traité d'électricité, vol 12, Energie électrique, Suisse, 1990.
- [03] T.GONENE, Modern power system analysis edition John Wiley and Sons, 1998

Annexe

Ligne	U_l (Kv)	S (mm ²)	R_l (Ω)	B_p (S)	G_p (S)	X_l (Ω)	W_{act} (W)	$V_{réc}$ (var)
EHR-EKB	220	288	17,503	$1,6571. 10^{-4}$	$0,5368. 10^{-4}$	54,641	$2,774. 10^9$	$8,038. 10^6$
EKB-SKD	220	288	10,459	$0,9823. 10^{-4}$	$0,4862. 10^{-4}$	32,572	$4,640. 10^9$	$4,765. 10^6$
SKD-RDL	220	288	1,858	$0,1726. 10^{-4}$	$0,0809. 10^{-4}$	5,688	$2,610. 10^{10}$	$8,338. 10^5$
RDL-EHR	220	288	10,153	$0,9433. 10^{-4}$	$0,4630. 10^{-4}$	31,072	$4,780. 10^9$	$4,575. 10^6$
RDL-EHR	220	411	3,928	$1,3831. 10^{-4}$	$0,2932. 10^{-4}$	25,832	$1,235. 10^{10}$	$6,708. 10^6$
RDL-EHR	400	411	3,928	$1,3831. 10^{-4}$	$0,2932. 10^{-4}$	25,832	$4,083. 10^{10}$	$2,217. 10^7$

Tableau des résultats de calcul