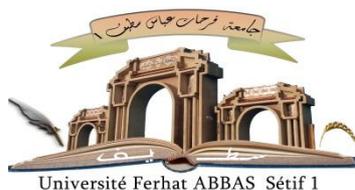


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THESE

Présentée au Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option: Réseaux Electriques

Par

Samir BEDOUI

THÈME

***Contribution à l'étude de la coordination des
isolements des postes de transformation haute tension
basée sur l'emploi de parafoudres ZnO***

Soutenue le 18/12/2018 devant le Jury:

GHERBI Ahmed	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
BAYADI Abdelhafid	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
HAMOU Nouri	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
MOULAI Hocine	Professeur	Univ. des Sciences et Technologies, Alger	Examineur
TEGUAR Madjid	Professeur	Ecole nationale polytechnique, Alger	Examineur
MEKHALDI Abdelouahab	Professeur	Ecole nationale polytechnique, Alger	Examineur

Dédicaces

Je Dédie en premier lieu cette thèse à mes chers parents.

*A ma chère femme pour son soutien et son apport moral durant ces
longues années d'efforts et de patience illimitée.*

A mon cher fils :

Abderrahim

*A mes chères sœurs et leurs maries, mes chers frères et leurs femmes
ainsi que leurs enfants.*

*A tous mes amis sans exception notamment qui m'ont souhaité la
réussite dans ma vie.*

Samir BEDOUI

Remerciements

J'ai eu le plaisir de travailler avec mon encadreur de thèse,

M. Abdelhafid BAYADI

*qui m'a guidé à réaliser de cette recherche tout en me faisant profiter
ses compétences.*

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury :

➤ ***Pr. Ahmed GHERBI***, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

➤ ***Pr. Nouri HAMOU, Pr. Hocine MOULAI, Pr. Madjid TEGUAR
et Pr. Abdelouahab MEKHALDI***, qui m'ont fait l'honneur
d'accepter d'examiner et d'évaluer ce travail.

*Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de
loin à réaliser cette thèse notamment :*

***Pr. Juan A. Martínez-Velasco, Dr. M. Javier A. Corea-Araujo
et Dr. Mabrouk Boubezoula.***

Ainsi tout ceux qui m'ont souhaité la réussite.

Samir BEDOUI

DECLARATIONS

Déclaration 1

Ce travail n'a pas été déjà accepté et n'est pas soumis en considération pour un diplôme quelconque.

Signé (Samir BEDOUI)

Déclaration 2

Cette thèse est soumise pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT Science.

Signé (Samir BEDOUI)

Déclaration 3

Cette thèse est le résultat de mes propres investigations, sauf indication contraire. D'autres sources sont reconnues par des références explicites. Une bibliographie est jointe en annexe.

Signé (Samir BEDOUI)

LISTE DES TRAVAUX

1. **Bedoui S**, Bayadi A, “ Influence des modèles du pylône sur les performances des lignes de transmission sous choc de foudre ”, 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering, **ICEEE’08**, Laghouat, 2008.

 2. **Bedoui S**, Bayadi A, Haddad A, ”Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: case of an HV 220kV double circuit line”, 45th International universities’ power engineering Conference, **UPEC 2010**, Cardiff, Wales, UK, September 2010. Proceeding CDROM ISBN 978-0-9565570-0-1; Print ISBN: 978-1-4244-7667-1;
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5649192

 3. **Bedoui S**, Bayadi A, “ Lightning protection of substation using new surge arrester model with lead wires connection effect ”, International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, **ICEEAC’2013**, Setif, 2013.
<http://iceeac.univ-setif.dz/>

 4. **Bedoui S**, Bayadi A , “Probabilistic evaluation of the substation performance under incoming lightning surges”, Electric Power Systems Research, Vol. 162, 2018, pp. 125–133, doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.011.

 5. Juan A. Martínez-Velasco, Javier A. Corea-Araujo, **S.Bedoui**, “Insulation Coordination Studies of Air-Insulated Substations Using a Parallel MATLAB-ATP Environment”, EEUG 2017, Kiel, Germany, 2017.

 6. Juan A. Martínez-Velasco, Javier A. Corea-Araujo, **S.Bedoui**, “Lightning performance analysis of transmission lines using the Monte Carlo method and parallel computing”, Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 26, N°. 3, pp. 398-409, 2018.

 7. J.A. Martínez-Velasco, J.A. Corea-Araujo, and **S. Bedoui**, “Lightning performance analysis of transmission lines using parallel computing”, EEUG 2016, Birmingham (UK), September 2016.
-

ملخص

يُعرّف تنسيق العزل بأنه تحديد قوة عزل المعدات بالنسبة إلى الجهد الذي قد يظهر في النظام أين يتم تعيين الجهاز بالأخذ بعين الاعتبار بيئة الخدمة ومراعاة خصائص الأجهزة الوقائية المتوفرة. في دراسة تنسيق العزل، يتم تحديد مستويات التوتر لمعدات نظام الطاقة من أجل ضمان حماية هذه المعدات ضد التوتر الزائد. في هذه الأطروحة، تم إجراء دراسة تنسيقية للعزل من أجل التوتر الزائد للصواعق في محطة تحويل للجهد العالي 400 كيلوفولت في شرق الجزائر.

اقترحت عدة طرق لدراسة التوتر الزائد الناتج عن ضربات الصواعق على خطوط النقل المتصلة بمحطة تحويل الكهرباء. نظرا للطبيعة العشوائية لظاهرة البرق، يجب أن تكون الدراسة إحصائية، وعموماً يتم استخدام طريقة مونتني كارلو كحل لهذا النوع من الدراسات.

في الجزء الأول، تم تقديم طريقة إحصائية تعتمد على تقنية مونتني كارلو لتقييم أثر الصاعقة على محطة تحويل كاملة ذات عزل هوائي اعتمادا على قدرة أدوات المحاكاة. تم ترميز هذه التقنية في MATLAB وربطها ببرنامج EMTP/ATP لتنفيذ محاكاة الشبكة. بتنفيذ عمليات المحاكاة بفرض العديد من سيناريوهات الوقاية، تبين أن تركيب أجهزة الوقاية من الصواعق بأكسيد الزنك عند مدخل خط التحويل وعلى مقربة من محولات الطاقة يعطي وقت متوسط مقبول بين الأعطال (MTBF) عند نقاط مختلفة على مستوى محطة التحويل ومن ثم توفير حماية كافية.

بما أن الدراسات المقدمة في الجزء الثاني تهدف إلى تقدير الوقت المتوسط بين الأعطال لمعدات محطة التحويل، يمكن أيضاً استخدام الطريقة المقترحة لتحديد أجهزة الوقاية ضد الصواعق أو مستوى العزل القاعدي (BIL)، بمجرد تحديد الوقت المتوسط المطلوب بين الأعطال و اختيار مواقع أجهزة الوقاية ضد الصواعق، يمكن الأخذ بعين الاعتبار فقط صنف أجهزة الوقاية ضد الصواعق التي يتجاوز عندها الوقت المتوسط بين الأعطال القيمة المرجعية.

سمحت ميزة الحوسبة المتوازية في MATLAB بتنبؤات أكثر دقة حول التوتر الزائد عند نقاط مختلفة في محطة التحويل وتقليل وقت تشغيل وحدة المعالجة المركزية لطريقة الحل.

الكلمات المفتاحية : تنسيق العزل، الصواعق، التوتر الزائد، مونتني كارلو، MTBF، BIL، MATLAB، EMTP/ATP، الحوسبة المتوازية.

Résumé

La coordination des isolements est définie comme la sélection de la rigidité diélectrique de l'équipement par rapport aux tensions qui peuvent apparaître sur le système auquel l'équipement est destiné, et en tenant compte de l'environnement de service et des caractéristiques des dispositifs de protection disponibles. Dans une étude de coordination des isolements, les niveaux de tension de l'équipement du système de puissance sont déterminés afin d'assurer la protection de l'équipement contre les surtensions. Dans cette thèse, une étude de coordination des isolements est réalisée pour des surtensions de foudre dans le poste haute tension de 400 kV dans l'EST de l'Algérie.

Plusieurs approches ont été proposées pour étudier les surtensions causées par les coups de foudre qui impactent une ligne connectée à un poste. En ce qui concerne le caractère aléatoire du phénomène de foudre, la procédure doit être statistique et la méthode de Monte Carlo est généralement utilisée comme solution pour ce type d'études.

Dans la première partie, une méthode statistique basée sur la technique de Monte Carlo pour évaluer la performance de la foudre d'un poste complet avec une isolation par l'air (AIS) en utilisant la capacité des outils de simulation est présentée. Cette technique a été codée dans MATLAB et liée au programme EMTP / ATP pour effectuer les simulations de réseau.

Les simulations sont réalisées en considérant plusieurs scénarios de protection. Il est corroboré que l'installation des parafoudres ZnO à l'entrée de la ligne et à proximité de l'autotransformateur donne un temps moyen entre défaillances (MTBF) acceptable à différents points dans le poste et assure ensuite une protection adéquate.

Bien que les études présentées dans la deuxième partie visent à estimer l'MTBF de l'équipement du poste, la procédure peut également être utilisée pour sélectionner les parafoudres ou les BIL adéquats, une fois que l'MTBF désiré est fixé et que les emplacements des parafoudres ont été sélectionnés; seuls les parafoudres avec lesquels l'MTBF dépasse la valeur spécifiée doivent être pris en compte.

La fonction de calcul parallèle de MATLAB a permis une prédiction plus précise des surtensions à différents points dans le poste et réduit d'une manière significative le temps d'exécution du processus global de la solution.

Mots-clés - Coordination des isolements, foudre, surtension, Monte Carlo, MTBF, BIL, poste, EMTP / ATP, Calcul Parallèle, MATLAB.

Abstract

Insulation coordination is defined as the selection of the dielectric strength of equipment in relation to the voltages which can appear on the system for which the equipment is intended and taking into account the service environment and the characteristics of the available protective devices. In an insulation coordination study, the voltage levels of power system equipment are determined in order to ensure the protection of equipment against overvoltages. In this thesis, an insulation coordination study is performed for lightning overvoltages in 400 kV substations in Algeria High Voltage Electricity System.

Several approaches have been proposed to study the overvoltages caused by lightning strokes that impact a line connected to a substation. Regarding the random nature of the lightning phenomenon, the procedure must be statistical and generally the Monte Carlo method is used as the solution for this type of studies.

In the first part, a statistical method based on Monte Carlo technique for evaluating lightning performance of a complete air insulation substation (AIS) using the capability of simulation tools is presented. This technique has been coded in MATLAB and linked to EMTP/ATP program to perform the network simulations.

The simulations are carried out considering several protection scenarios. It is corroborated that the installation of ZnO arresters at line input and in the vicinity of the autotransformer gives an acceptable mean time between failures (MTBF) at different points in the substation and then provides an adequate protection.

Although the studies presented in the second part were aimed at estimating substation equipment MTBF, the procedure can also be used to select surge arresters or substation BILs, once the desired MTBF is fixed and arrester locations have been selected, the surge arrester ratings can be selected by following the detailed procedure; only those surge arresters with which the MTBF exceeds the specified value should be considered.

The parallel computing feature of MATLAB has permitted a more accurate prediction of the overvoltages at different points in the substation and significantly reduces the CPU run time of the overall solution process.

Keywords – Insulation coordination, lightning, overvoltage, Monte Carlo, MTBF, substation, EMTP/ATP, Parallel Computing, MATLAB.

Sommaire

Sommaire

Dédicaces.....	i
Remerciements	
Résumé.....	
Sommaire.....	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Listes des Acronymes et Symboles.....	viii

Chapitre 01

INTRODUCTION GENERALE

1.1. Introduction	1.1
1.2. Problématique	1.2
1.3. Motivation	1.3
1.4. Objectif de la thèse.....	1.3
1.5. Organisation de la thèse	1.4

Chapitre 02

CONCEPTS DE BASE ET GENERALITES

2.1. Introduction	2.1
2.2. Définitions	2.1
2.3. Paramètres électriques de la foudre.....	2.6
2.3.1. Forme du courant d'arc.....	2.6
2.3.2. Forme réelle du courant de foudre.....	2.7
2.3.3. Amplitude des coups de foudre.....	2.7
2.4. Origines des surtensions	2.9
2.4.1. Coup de foudre sur un conducteur de phase.....	2.9
2.4.2. Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône.....	2.12
2.4.3. Surtensions induites par un coup de foudre tombant sur le sol à proximité de la ligne.....	2.13

2.4.4. Propagation des surtensions de foudre vers les postes	2.14
2.5. Types d'isolations	2.15
2.6. Dispositifs de protection.....	2.15
2.6.1. Eclateurs à air.....	2.15
2.6.2. Parafoudre au carbure de Silicium.....	2.17
2.6.3. Parafoudre à Oxyde de Zinc.....	2.18
2.6.3.1. Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO.....	2.19
2.6.3.2. Caractéristiques des parafoudres ZnO	2.21
2.6.3.3. Comportement dynamiques des parafoudres ZnO.....	2.22
2.7. Conclusion.....	2.23

Chapitre 03

COORDINATION DES ISOLEMENTS

3.1. Introduction	3.1
3.2. Procédure de la coordination des isolements	3.1
3.3. Coordination des isolements d'un équipement.....	3.2
3.4. Coordination des isolements d'une installation.....	3.3
3.4.1. Coordination des isolements d'une ligne aériennes	3.4
3.4.2. Coordination des isolements d'un poste.....	3.5
3.4.3. Critères généraux de la coordination des isolements d'un poste.....	3.6
3.5. Méthodes de la coordination des isolements.....	3.7
3.5.1. Méthode de la coordination statistique.....	3.7
3.5.2. Méthode de la coordination déterministe.....	3.8
3.6. Conclusion.....	3.10

Chapitre 04

LES MODELES POUR LA COORDINATION DES ISOLEMENTS

4.1. Introduction	4.1
4.2. Modélisation des éléments du système étudié.....	4.2
4.2.1. Modélisation des éléments de la ligne de transmission.....	4.2
4.2.1.1. Les conducteurs électriques.....	4.2
4.2.1.2. Les pylônes.....	4.4

4.2.1.3. Les prises de terre.....	4.5
4.2.1.4. Les isolateurs.....	4.7
4.2.1.5. Effet couronne	4.9
4.2.2. Modélisation des éléments du poste de transformation	4.10
4.2.3. Le modèle électro-géométrique.....	4.12
4.3. Conclusion.....	4.20

Chapitre 05

METHODE DE MONTE CARLO

5.1. Introduction	5.1
5.2. Estimation d'une valeur inconnue.....	5.2
5.3. Événements aléatoires et probabilité	5.2
5.4. Fiabilité du système et analyse des risques par simulation de Monte Carlo	5.3
5.5. Domaines d'application de la méthode Monte Carlo	5.4
5.6. Distribution des variables aléatoires.....	5.5
5.7. Distributions disponibles dans MATLAB	5.6
5.8. Langages de programmation	5.8
5.9. Application de la méthode Monte Carlo	5.8
5.9.1. Création des valeurs aléatoires	5.9
5.9.2. Types de distribution adoptés	5.10
5.9.3. Influence du coefficient de corrélation.....	5.12
5.9.4. Calcul statistique des surtensions de foudre en utilisant le calcul parallèle	5.14
5.10. Conclusion.....	5.17

Chapitre 06

RESULTATS DE SIMULATION

6.1. Introduction	6.1
6.2. Présentation du système étudié.....	6.1
6.3. Etude et analyse des performances du système étudié	6.3
6.4. Coordination des isolements	6.14
6.4.1. Scénario_a.....	6.18
6.4.2. Scénario_b.....	6.21

6.4.3. Scénario_c.....	6.23
6.5. Influence de l'effet couronne	6.26
6.6. Conclusion.....	6.27

Chapitre 07

CONCLUSION GENERALE

7.1. Introduction	7.1
7.2. Résumé des Résultats.....	7.1
7.3. Recommandations de recherche futures	7.3
ANNEXE A.	A1
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	R1

Liste des figures

Figure 2.1 Répartition du Niveau Kéraunique sur le globe terrestre [2.3]	2.2
Figure 2.2 Représentation schématique des types de coup de foudre.....	2.4
Figure 2.3 Phases de l'évolution d'un coup de foudre.....	2.5
Figure 2.4 Ondes typiques dans le canal de la foudre[2.3].....	2.6
Figure 2.5 Oscillogramme d'un courant de foudre [1.10]	2.7
Figure 2.6 Distribution statistique et expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE [1.10].....	2.8
Figure 2.7 Distributions statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE [1.10].....	2.8
Figure 2.8 Coup de foudre sur le conducteur de phase.....	2.11
Figure 2.9 Coup de foudre sur le câble de garde	2.12
Figure 2.10 Schéma d'un éclateur [2.5].....	2.16
Figure 2.11 Constitution d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs [2. 5]	2.18
Figure 2.12 Structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine [2. 5]	2.19
Figure 2.13 Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO [2.7]	2.21
Figure 2.14 Schéma représentatif des amplitudes des tensions en fonction de leur durée, tensions de tenue de l'équipement et des niveaux de protection des parafoudres [2.8]	2.23
Figure 3.1 Schéma général de coordination de l'isolation individuelle [3.3].....	3.2
Figure 3.2 Schéma général de la coordination des isolements pour un poste [3.3].....	3.6
Figure 3.3 Procédure de détermination des niveaux d'isolation standard. [1.1]	3.9
Figure 4.1 Modèle multi-étages du pylône	4.3
Figure 4.2 Concaténation des conducteurs.....	4.3
Figure 4.3 Modèle de la prise de terre des pieds de pylône.....	4.6
Figure 4.4 Caractéristique non-linéaire de la prise de terre	4.6
Figure 4.5 Implémentation ATP-EMTP du modèle de l'isolateur	4.9
Figure 4.6 Modèle représentant l'effet couronne.....	4.10
Figure 4.7 Modèle IEEE modifié du parafoudre	4.11
Figure 4.8 Caractéristique tension-courant du parafoudre.....	4.12
Figure 4.9 Modèle Electro-géométrique - Vue en coupe	4.14

Figure 4.10 Vue de profil du modèle électro-géométrique (cas 1).....	4.16
Figure 4.11 Vue de profil du modèle électro-géométrique (cas 2).....	4.16
Figure 4.12 Vue de profil du modèle électro-géométrique (cas 3).....	4.16
Figure 4.13 Plan de décision finale du coup de foudre.....	4.19
Figure 4.14 Zone d'attraction à considérer.....	4.20
Figure 5.1 Zone de distribution des points d'impact des coups de foudre.....	5.9
Figure 5.2 Paramètres du courant de foudre.....	5.10
Figure 5.3 Influence du coefficient de corrélation [1.9].....	5.13
Figure 5.4 Organigramme de l'étude statistique de l'analyse de la performance de la foudre.....	5.16
Figure 6.1 Vue de satellite du système étudié.....	6.2
Figure 6.2 Schéma unifilaire du système étudié.....	6.3
Figure 6.3 Modèle complet du poste et les lignes connectées implanté dans ATPDraw.....	6.4
Figure 6.4 Distribution des coups de foudre qui tombent sur le câble de garde.....	6.5
Figure 6.5 Distribution des coups de foudre qui tombent sur le conducteur de phase.....	6.5
Figure 6.6 Distribution des coups de foudre sur le câble de garde qui ont causé un contournement.....	6.6
Figure 6.7 Distribution des coups de foudre sur le conducteur de phase qui ont causé un contournement.....	6.7
Figure 6.8 Distribution des temps du front des coups de foudre qui ont causé un contournement.....	6.8
Figure 6.9 Surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T1 - Scénario 1 -.....	6.10
Figure 6.10 Surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T ₁ - Scénario 2 -.....	6.11
Figure 6.11 Relation entre les surtensions enregistrées et le BIL.....	6.12
Figure 6.12 Surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T1 - Scénario 3 -.....	6.12
Figure 6.13 Caractéristiques VI des parafoudres utilisés.....	6.17
Figure 6.14 Sélection du MTBF correspondant à un BIL de 1050 kV et 1175 kV.....	6.19
Figure 6.15 Sélection du MTBF correspondant à un BIL = 1175 kV (cas du parafoudre 5).....	6.20
Figure 6.16 Sélection du MTBF correspondant à un BIL = 1300 kV (cas du parafoudre 6).....	6.20
Figure 6.17 Sélection du BIL correspondant à un MTBF = 150 ans (cas du parafoudre 4).....	6.22
Figure 6.18 Sélection du BIL correspondant à un MTBF = 125 ans (cas du parafoudre 2).....	6.22
Figure 6.19 Sélection du BIL correspondant à un MTBF = 300 ans (cas du parafoudre 7).....	6.23
Figure 6.20 Sélection du parafoudre correspondant à un BIL = 1050 kV et MTBF = 200 ans.....	6.24
Figure 6.21 Sélection du parafoudre correspondant à un BIL = 1175 kV et MTBF = 150 ans.....	6.25
Figure 6.22 Sélection du parafoudre correspondant à un BIL = 1300 kV et MTBF = 100 ans.....	6.25

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Classification des contraintes de tension apparaissant sur les réseaux d'énergie électrique triphasés, formes normalisées de tensions d'essais et essais de tenue diélectrique	2.10
Tableau 4.1 Caractéristiques des conducteurs de la ligne [4.1]	4.2
Tableau 4.2 Caractéristiques physique de l'isolateur utilisé [4.1].....	4.7
Tableau 4.3 Identification des paramètres du modèle du parafoudre.....	4.11
Tableau 4.4 Expressions pour les distances d'amorçage [1.7].....	4.13
Tableau 5.1 Types de fonctions de distribution.....	5.7
Tableau 5.2 Types de distribution des paramètres du système	5.10
Tableau 5.3 Paramètres statistiques des coups de foudre	5.11
Tableau 6.1 Résultats de simulation - Autotransformateur T_1	6.10
Tableau 6.2 Résultats de simulation – poste de transformation	6.13
Tableau 6.3 Résultats de simulation supplémentaires.....	6.14
Tableau 6.4 Les différents scénarios étudiés.....	6.15
Tableau 6.5 Principales données des parafoudres ZnO (ABB)	6.16
Tableau 6.6 Paramètres des parafoudres utilisés	6.16
Tableau 6.7 Tensions enregistrées dans le poste.....	6.18
Tableau 6.8 Exemples choisis.....	6.24
Tableau 6.9 Influence de l'effet couronne.....	6.26

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes en Anglais

EMTP	Electromagnetic Transients Program
ATP	Alternative Transients Program
MTBF	Mean Time Between Failures
BIL	Basic Insulation Level
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
OPGW	Optical Ground Wire
CPU	Computer Processor Unit

Acronymes en Français

MEG	Modèle Electro-Géométrique
OAT	Oued El-Athmania
CEI	Comité Electrotechnique International
SiC	Carbure de Silicium
ZnO	Oxyde de Zinc
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
BT	Basse Tension
MT	Moyenne Tension
HT	Haute Tension
THT	Très Haute Tension

Symboles

m	Mètre
A	Ampère
V	Volt
F	Farad
Ω	Ohm
$^{\circ} K$	Kelvin
$^{\circ}C$	Degré Celsius
ρ	La résistivité de sol.
s	Seconde
I	Courant de foudre
U_{cf}	Tenue diélectrique de la ligne en choc de foudre
Z_c	Impédance caractéristique du conducteur
R_0	Résistance de terre à faible courant et faible fréquence
R_t	La résistance actuelle de la terre
I_g	La valeur seuil du courant suffisante pour commencer l'ionisation du sol
E_0	Champ d'ionisation du sol
E_0	Le champ d'ionisation du sol
v	La vitesse de l'arc de la chaîne d'isolateurs
D	Longueur totale de la chaîne d'isolateurs
L	La longueur de l'arc de la chaîne d'isolateurs
t	Temps à l'amorçage de la chaîne d'isolateurs
U	Tension appliquée aux bornes de la chaîne d'isolateurs
C	La capacité de l'arc à la terre
t_c	Temps de contournement
t_i	Temps avant le début du streamer
t_s	Temps de propagation du streamer
t_l	Temps de l'arc de contournement
U_p, U_n	Tensions aux bornes de la chaîne d'isolateurs
S	Commutateur
A_0, A_1	Eléments non linéaire du parafoudre

p, q	Constants propres de l'Eléments non linéaire du parafoudre
V_{ref}	Tension de référence du parafoudre
R_i	Résistances des tronçons de pylône
L_i	Inductances des tronçons de pylône
V_t	Vitesse de propagation de l'onde de courant dans le pylône
H	La hauteur totale du pylône
h_i	Hauteurs des tronçons du pylône
γ	Coefficient d'atténuation de l'onde du courant dans le pylône
α	Coefficients d'amortissement de l'onde du courant dans le pylône
V_c	Tension de l'apparition couronne.
C_i	Capacité couronne
k_c	Constante de couronne
r	Rayon du conducteur
R_0, R_1	Résistances du modèle de parafoudre
L_0, L_1	Inductances du modèle de parafoudre
C_0, C_1	Capacitances du modèle de parafoudre
r_c	Rayon théorique crée par rapport aux conducteurs
r_g	Rayon théorique crée par rapport au sol
R_n	Nouveau rayon de la sphère
R_{sph}	Rayon de la sphère
T_h	Hauteur du pylône
$p(\mathbf{x})$	Fonction de densité de probabilité
σ_{lnx}	Déviations standard de $ln x$
t_f	Temps de front
Y_s	Nombre d'années de simulation
n_f	Nombre de défauts
F_r	Taux de contournement
A	Zone d'étude
N	Nombre de cas généré
ρ_c	Facteur de corrélation

1.1. Introduction

Les équipements et les installations électriques sont soumis à des surtensions variables dans le temps, dont les valeurs maximales sont supérieures à la valeur crête de la tension nominale du système d'origine, ce qui peut affecter l'isolation et provoquer des pannes. La coordination des isolements des réseaux électrique consiste à les rendre fiables quelque soient les conditions environnementales [1.1, 1.2, 1.3]. Ces conditions sont liées à divers facteurs tels que la pollution, la pression atmosphérique, la température, etc. De plus, dans les régions foudroyées, s'ajoute le problème des coups de foudre qui tombent sur le réseau électrique [1.4, 1.5, 1.6].

La rigidité diélectrique des équipements électriques est souvent menacée par la présence de surtensions transitoires sur les réseaux électriques. Ces dernières sont dues principalement aux manœuvres des lignes (surtensions de manœuvre) et à la foudre (surtensions atmosphériques) qui peuvent détruire l'isolation des équipements des réseaux électriques [1.7].

Parmi les équipements électriques les plus importants, un intérêt particulier doit être porté au transformateur de puissance qui constitue un élément essentiel pour le bon fonctionnement de ces derniers, au fait qu'il représente un grand pourcentage dans le coût total de conception. En effet, leur défaillance peut avoir une grande influence sur les coûts d'exploitation des réseaux électriques. Par ailleurs, les isolateurs sont aussi des équipements essentiels pour la coordination de l'isolement. Ils peuvent être affectés d'une façon importante par les surtensions transitoires qui sont capables de dépasser leur limite de tenue diélectrique en tout temps. Cela se traduit généralement par des contournements électriques pouvant conduire à des interruptions plus ou moins longues de la distribution de l'énergie électrique et à des pertes économiques importantes [1.8].

Afin de répondre à la demande croissante en énergie, les systèmes électriques de 400 kV sont en cours de généralisation en Algérie. Lorsque la tension du système électrique augmente, le coût de l'isolation correspondant augmente considérablement. Les systèmes de transmission 400 kV sont devenus des systèmes de puissance de base dans le pays et ils exigent une fiabilité beaucoup plus élevée. Par conséquent, grâce aux méthodes efficaces de limitation des surtensions, une conception et une coordination des isolements raisonnables doivent être réalisées. Afin de déterminer les différents facteurs pour la conception de l'isolation, l'EMTP est utilisé pour l'analyse des phénomènes transitoires dans le réseau étudié. Dans ce travail, on a étudié l'impact de la foudre sur la ligne de transmission et ses influences sur le poste de transformation de Oued El-Athmania de la région Est d'Algérie.

1.2. Problématique

L'étude des surtensions et la sélection des isolements et des dispositifs de protection constituent l'objectif de la coordination des isolements. Celle-ci est définie comme étant le choix de la rigidité diélectrique d'un équipement en fonction des tensions pouvant apparaître dans le système dans lequel il est installé, en tenant compte des conditions de service environnementales et des caractéristiques des dispositifs de protection disponibles. Cela doit se réaliser de telle sorte que la probabilité de court-circuit due à la défaillance d'une isolation donnée soit acceptable tant du point de vue opérationnel qu'économique. Ainsi, le comportement diélectrique doit répondre à une performance ajustée aux conditions environnementales et de service les plus sévères, telles que les chocs de foudre qui peuvent causer des dommages et des interruptions du service [1.7]. La foudre a toujours été une source de perturbation pour les utilisateurs d'électricité, cependant, la demande des systèmes électriques relativement croissante et la qualité (fiabilité, disponibilité, continuité de service, etc.) doit être prise en compte, ainsi que la nécessité permanente de minimiser le coût de production et améliorer le niveau d'isolement des équipements électriques. A cet effet, les principaux problèmes à prendre en compte sont:

1. Concevoir le système électrique étudié avec des données de paramètres appropriées pour un réseau électrique de 400 kV par exemple.

2. La connaissance des paramètres de la foudre qui sont généralement aléatoires [1.9]. Ces limitations peuvent être partiellement surmontées en effectuant une étude paramétrique qui pourrait mettre en évidence les paramètres pour lesquels une connaissance précise est requise.
3. Le temps important nécessaire à ce genre d'étude.

1.3. Motivation

Le courant de foudre qui se propage vers les postes de transformation peut être; soit un coup de foudre direct sur la ligne de transmission (touchant le conducteur de phase ou le câble de garde), soit celui qui se termine sur la terre [1.10]. Lorsqu'une décharge de foudre se produit sur un pylône ou sur le câble de garde et si la résistance des pieds des pylônes est importante, le potentiel du pylône monte à une valeur qui peut dépasser la tenue diélectrique de la ligne et par conséquent un contournement peut avoir lieu le long des chaînes d'isolateurs. Ceci est connu par l'amorçage en retour.

Dans ce projet, l'effet de la foudre sur le système électrique a été analysé. Le phénomène de foudre produit des ondes de surtensions qui se propagent dans les systèmes électriques. Cette surtension peut endommager la ligne de transmission et les appareils connectés. Il est nécessaire d'analyser et de prévoir les surtensions pour la conception des systèmes de protection. Le programme EMTP a été utilisé à cet effet [1.11].

1.4. Objectif de la thèse

L'objectif principal de la présente étude est de déterminer et d'analyser les paramètres de la coordination des isolements, pour optimiser l'influence des surtensions sur le système électrique étudié. Elle contribue, par ailleurs, au développement des connaissances sur le comportement des systèmes électriques soumis à des chocs de foudre.

Plus précisément, les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Comprendre et se familiariser avec les concepts fondamentaux de la coordination des isolements;

2. Collecter les paramètres réels du système et utiliser les modèles appropriés du système;
3. Implantation du système dans le logiciel ATP/EMTP et s'assurer de son fonctionnement;
4. Etudier l'effet aléatoire de la foudre sur la ligne de transmission et ses influences sur le reste du système électrique;
5. Élaborer un programme informatique pour simuler la probabilité du point d'impact d'un coup de foudre à l'aide de la méthode de Monte Carlo en utilisant MATLAB;
6. Contribuer à l'établissement de la procédure du calcul parallèle pour l'évaluation de la performance du processus de calcul;
7. Analyser la caractéristique du point d'impact du coup de foudre sur la ligne de transmission à travers le model Electro-géométrique (MEG);
8. Analyser les surtensions induites dans la ligne et étudier le phénomène du contournement des isolateurs;
9. Evaluer la protection du poste de transformation soumis aux surtensions en provenance des lignes connectées, le MTBF et le choix du niveau d'isolement fondamental (BIL) approprié en tenant compte des dispositifs de protection pouvant être utilisés.
10. Etudier l'influence de l'effet couronne sur les contraintes prédites.

1.5. Organisation de la thèse

Au meilleur de notre connaissance, la présente étude est d'actualité et est la première qui considère le calcul parallèle pour l'étude statistique de ce phénomène aléatoire de la foudre sur le système électrique. Cette thèse constitue le rapport des travaux réalisés au cours de cette recherche, et est organisé comme suit :

Dans le deuxième chapitre on détaille les principales notions fondamentales reliées à cette recherche, c'est à dire, les phénomènes de surtensions transitoires sur les réseaux électriques, les différents types d'isolation et les dispositifs utilisés pour la protection des systèmes électriques contre les surtensions

Le troisième chapitre présente une revue de la littérature concernant la coordination des isolements.

Le chapitre quatre fait une brève explication sur les travaux portant sur la modélisation des éléments du système électrique étudié et les éléments de protection.

Le chapitre cinq présente la méthode de Monte Carlo et ses applications sur le système étudié.

Le chapitre six présente les résultats obtenus, ainsi que leur analyse ayant permis de déterminer les paramètres de la protection adéquate face aux surtensions transitoires.

Enfin, le dernier chapitre présente les conclusions ainsi que les recommandations pour les travaux futurs liés à cette recherche.

Chapitre 02

CONCEPTS DE BASE ET GENERALITES

2.1. Introduction

La conception des équipements des réseaux électriques est basée sur plusieurs facteurs en tenant compte les conditions environnementales telles que, la pollution, la pression atmosphérique, la température, et notamment, les décharges électriques de la foudre. Cette dernière pourrait influencer sur la tenue diélectrique des équipements électriques et par conséquence entraîner une diminution du niveau d'isolement qui conduit à une interruption du service.

La tenue diélectrique de ces équipements est souvent menacée par la présence de surtensions transitoires sur les réseaux électriques. Ces surtensions correspondent principalement aux enclenchements ou déclenchement des lignes (surtensions de manœuvre) et aux surtensions atmosphériques (foudre) qui peuvent détruire l'isolation des équipements des réseaux électriques.

Avant de poursuivre la description du phénomène de foudre, il convient de préciser la signification des termes qui seront utilisés de manière récurrente dans ce domaine.

2.2. Définitions

Les définitions et les termes les plus utilisées dans le domaine de la coordination des isollements sont les suivants [1.1, 2.1, 2.2]:

Niveau Kéraunique : L'activité orageuse d'une région peut être quantifiée par un niveau kéraunique. Ce dernier est défini comme étant le nombre moyen de jours par an au cours desquels le tonnerre est entendu. En Algérie, ce nombre varie de 5 à 25 selon les régions avec une moyenne située autour de 15. La figure 2.1 montre la répartition du niveau Kéraunique sur le globe terrestre.

Orage : Phénomène météorologique d'instabilité atmosphérique, au cours duquel des turbulences développent des charges électriques dans l'air, notamment au sein des nuages

orageux. Ces charges sont la cause de décharges électriques violentes, dites "décharges atmosphériques".

Eclair : Dans le langage courant, on désigne par le terme "éclair" la manifestation lumineuse d'une décharge atmosphérique.

Foudre / Eclair à la terre : Décharge électrique violente d'origine atmosphérique, qui se développe entre un nuage et la terre en un ou plusieurs coups de foudre.

Champ électrique au sol : La dissociation des charges dans le nuage orageux entraîne la génération d'un champ électrique intense dans l'espace nuage-sol. Lorsque qu'il atteint, au niveau d'un sol, une intensité de 4 à 10 kV/m, selon les conditions locales, une décharge au sol est imminente. Les charges électriques induites à la surface du sol par le nuage sont généralement positives. Le vecteur représentatif du champ est alors vertical, orienté du sol vers le nuage.

Canal ionisé / Canal de foudre : Chemin filiforme faiblement conducteur, présentant de multiples ramifications, qui se trace à travers l'air atmosphérique, sous l'effet d'un processus d'ionisation. Au passage de courants de foudre, il s'échauffe jusqu'à des températures de 30 000°K et devient fortement conducteur : c'est le canal de foudre. Son diamètre est alors de l'ordre du centimètre ou plus.

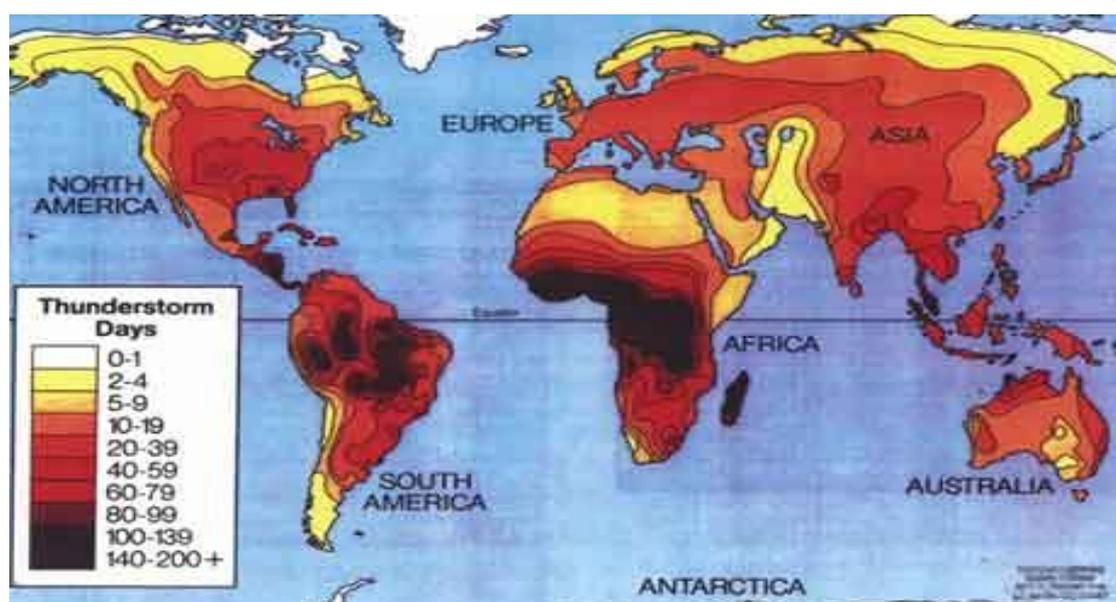


Figure 2.1 Répartition du Niveau Kéraunique sur le globe terrestre [2.3]

Point d'impact : Point où un coup de foudre tombe sur la terre, sur une structure ou sur une installation électrique.

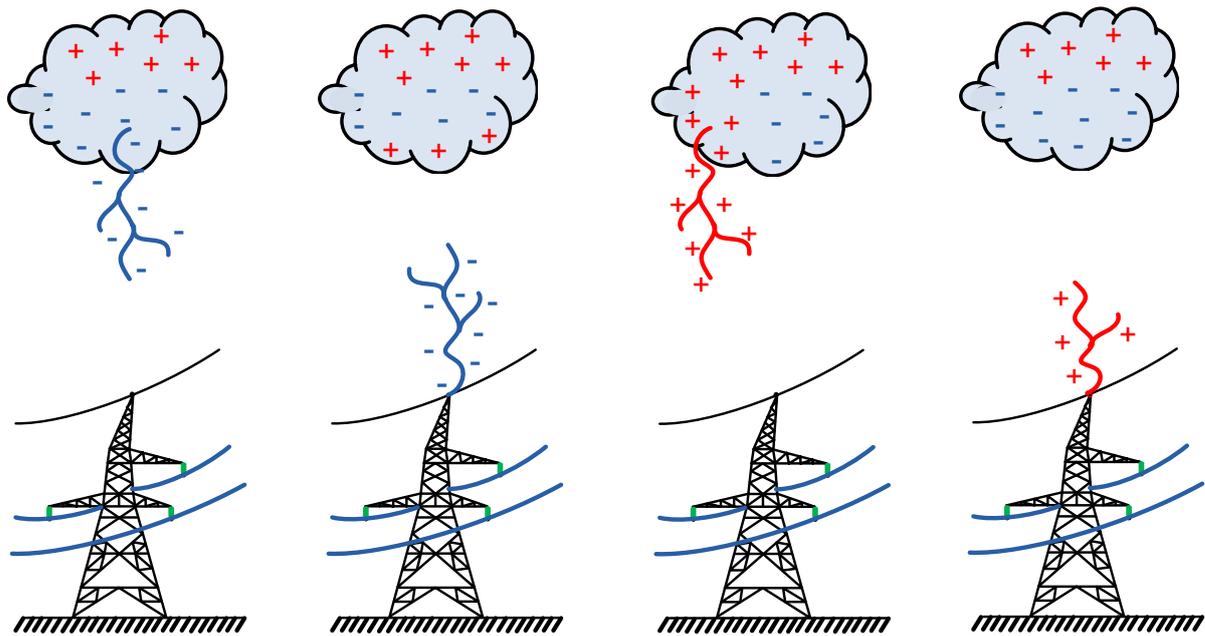
Densité de foudroiement : Cette densité s'exprime en nombre d'impacts par kilomètre carré et par an. Pour le territoire Algérien, elle est comprise entre moins de 1 impact/km² et an et 4 impacts /km² et an. Cette densité est déterminée en utilisant des capteurs répartis sur le territoire.

Distance d'amorçage : Distance entre le point d'origine de la décharge de capture et le point de rencontre avec le traceur descendant. Cette distance joue un rôle essentiel dans la définition de la zone de protection d'un point quelconque.

Décharges atmosphériques : Bien que les décharges inter-nuages (entre les nuages) et intra-nuages (à l'intérieur du nuage) constituent plus de la moitié des décharges atmosphériques, ce sont surtout les coups de foudre (décharges nuage-sol) qui ont été l'objet des études les plus poussées. Ceci est dû essentiellement à des raisons d'ordre pratique (cause de blessure et mort, incendies de forêts, et perturbations des systèmes de télécommunication et de transport), et aussi au fait qu'il est plus facile de mesurer les caractéristiques optiques et électriques des décharges nuage-sol. Les figures 2.2 et 2.3 illustrent les quatre types de décharges de foudre.

Les décharges de foudre sont subdivisées en quatre catégories selon d'une part la direction, ascendante ou descendante (Figure 2.2), du traceur (leader dans la terminologie anglo-saxonne) qui déclenche la décharge, et d'autre part le signe de la charge positive ou négative portée par le traceur.

Dans les régions à climat tempéré, plus de 90% des coups de foudre appartiennent à la première catégorie. Ce type de décharges, appelées décharges négatives, peut être considéré comme la forme la plus commune des décharges nuage-sol. Ces décharges sont déclenchées par un coup de foudre descendant chargé négativement. Les coups de foudre appartenant à la catégorie 3 sont aussi déclenchés par un leader descendant, mais chargé positivement. Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol. Enfin, les décharges des catégories 2 et 4 qui sont déclenchées par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement en montagnes ou dans de hautes structures.



a- C.F négatif descendant b- C.F négatif ascendant c- C.F positif descendant d- C.F positif ascendant

Figure 2.2 Représentation schématique des types de coups de foudre

Coup de foudre descendant négatif : Ce coup de foudre débute à l'intérieur du nuage orageux. L'hypothèse la plus probable est la formation d'une décharge bidirectionnelle constituée d'un canal positif et d'un canal négatif à l'intérieur du nuage. La décharge positive progresse horizontalement en se ramifiant dans le nuage, tandis que la négative sort du nuage et se dirige vers le sol. La progression de cette décharge s'effectue par une série de bonds lumineux successifs, chaque bond possède une longueur de quelques dizaines de mètre (figure 2.3). La foudre apporte une quantité de charges négatives de l'ordre de 10 C vers le sol avec une vitesse moyenne comprise entre 0,15 et 1 mètre par microseconde.

A l'approche du sol, le traceur dont le potentiel par rapport à la terre est d'environ 10 MV provoque une intensification du champ électrique et initie une ou plusieurs décharges ascendantes. Cette phase est appelée le processus d'attachement. La jonction entre une des décharges ascendantes et le traceur s'effectue à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol.

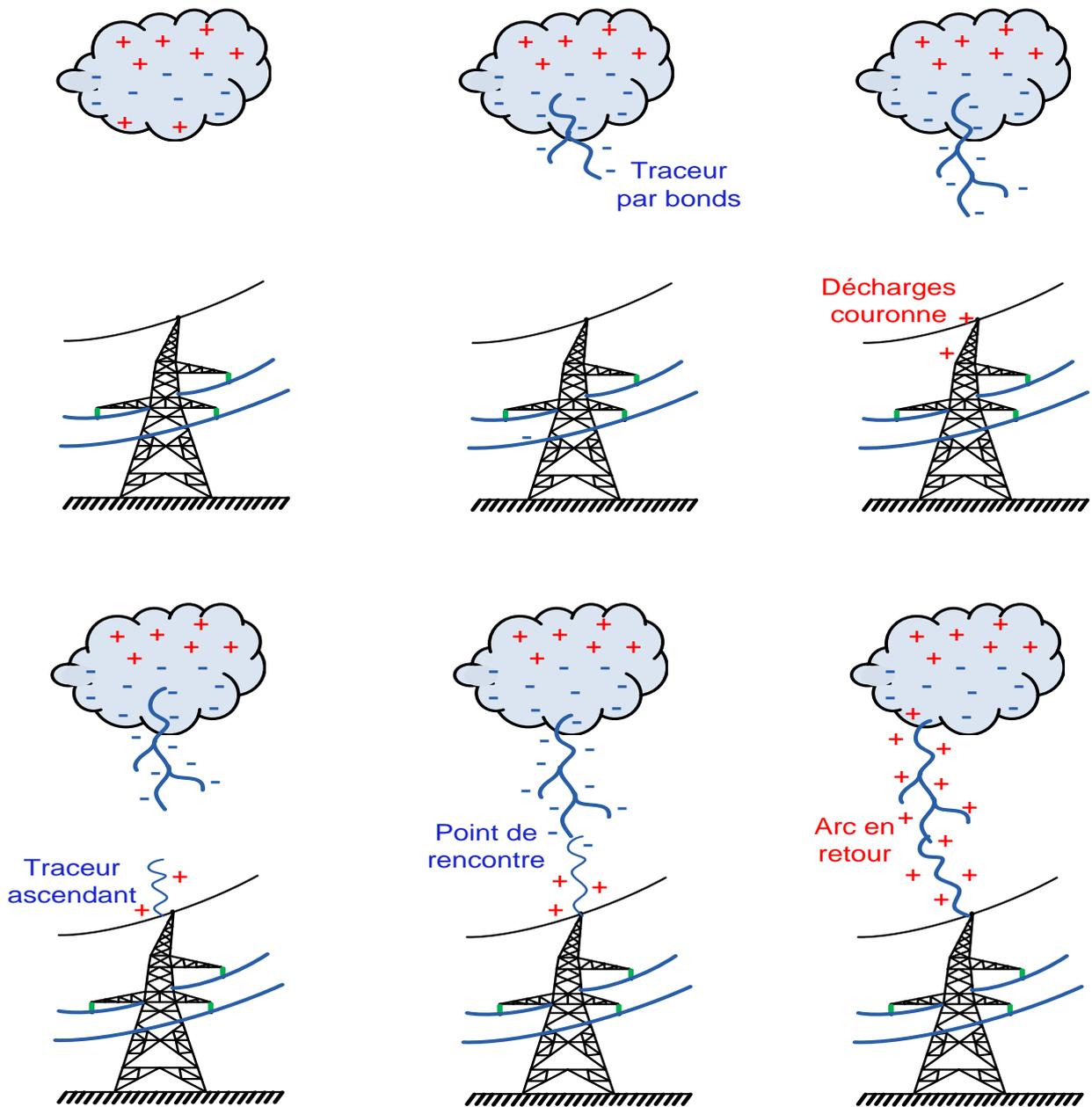


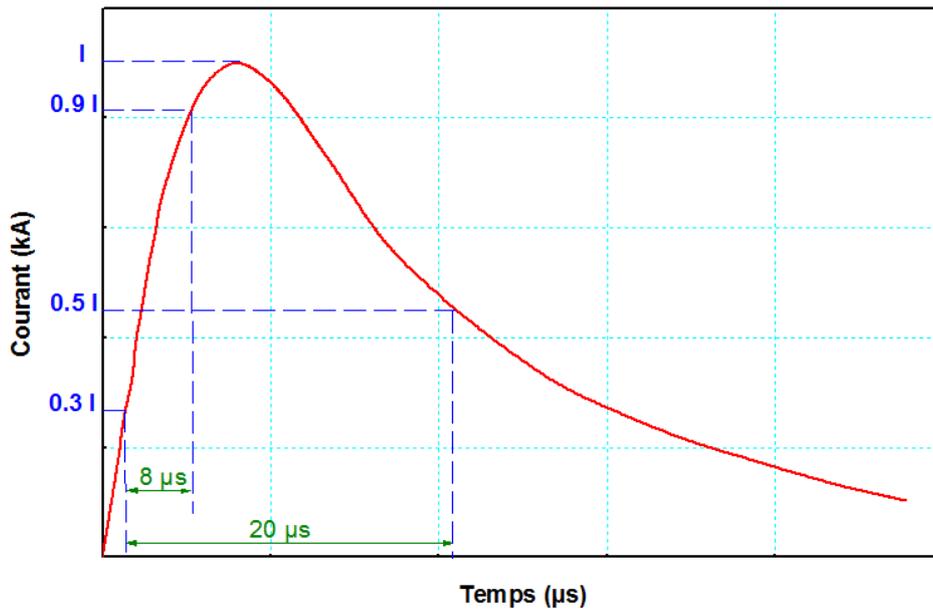
Figure 2.3 Phases de l'évolution d'un coup de foudre

Le canal du traceur par bonds est alors déchargé lorsqu'une onde de potentiel du sol, le premier arc en retour, se propage vers le nuage et neutralise la charge portée par le traceur avec une vitesse de l'ordre d'un tiers de la vitesse de la lumière. Le premier arc en retour se traduit au niveau du sol par un courant d'une valeur de crête d'environ 30 kA et d'un temps de montée de l'ordre de quelques microsecondes. Durant cette phase, la température du canal s'élève rapidement pour atteindre des valeurs de 30000°K qui génère un canal de haute pression provoquant une onde de choc appelée tonnerre [2.1].

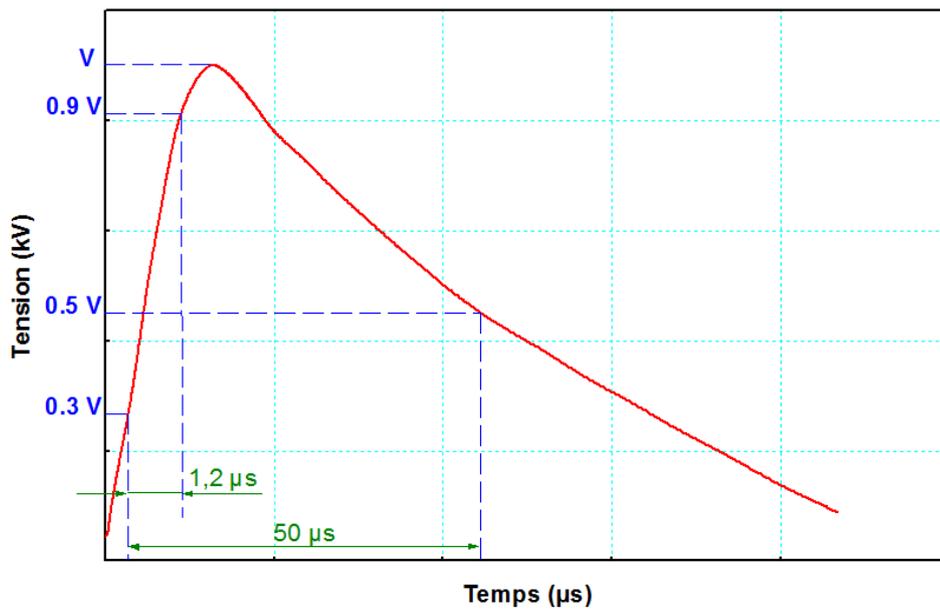
2.3. Paramètres électriques de la foudre

2.3.1. Forme du courant d'arc

Ce courant est de nature impulsionnelle ayant une forme qui se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée) et un temps de décroissance [2.3] (Figure 2.4).



a- Courant



b- Tension

Figure 2.4 Ondes typiques dans le canal de la foudre [2.3]

2.3.2. Forme réelle du courant de foudre

Le phénomène physique de la foudre correspond à une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. Il est généralement représenté par une source de courant impulsionnel. La forme d'onde réelle est très variable, elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelque microsecondes à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes (Figure 2.5) [1.10].

2.3.3. Amplitude des coups de foudre

Beaucoup de fonctions de répartitions des amplitudes des courants des premiers arcs en retour des coups de foudre négatifs peuvent exister. La distribution statistique expérimentale, selon la IEEE, des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée dans la figure 2.6 et celle en raideur de front est donnée sur la figure 2.7 [1.10, 1.8].

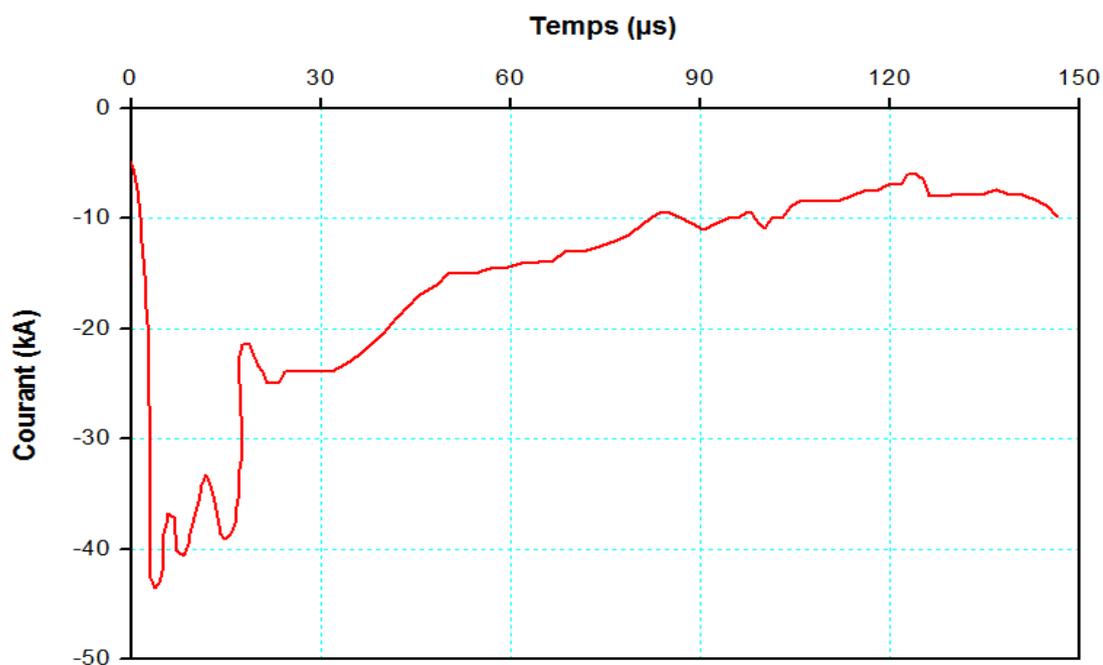


Figure 2.5 Oscillogramme d'un courant de foudre [1.10]

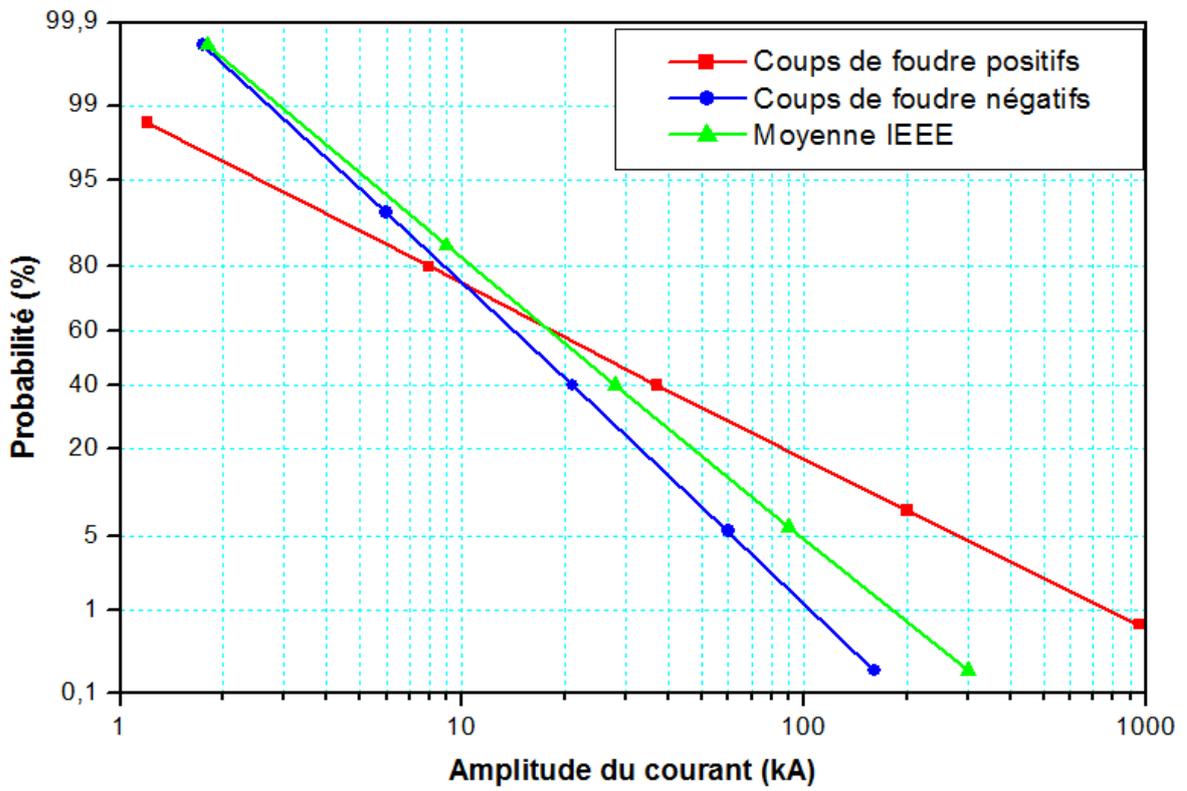


Figure 2.6 Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE [1.10]

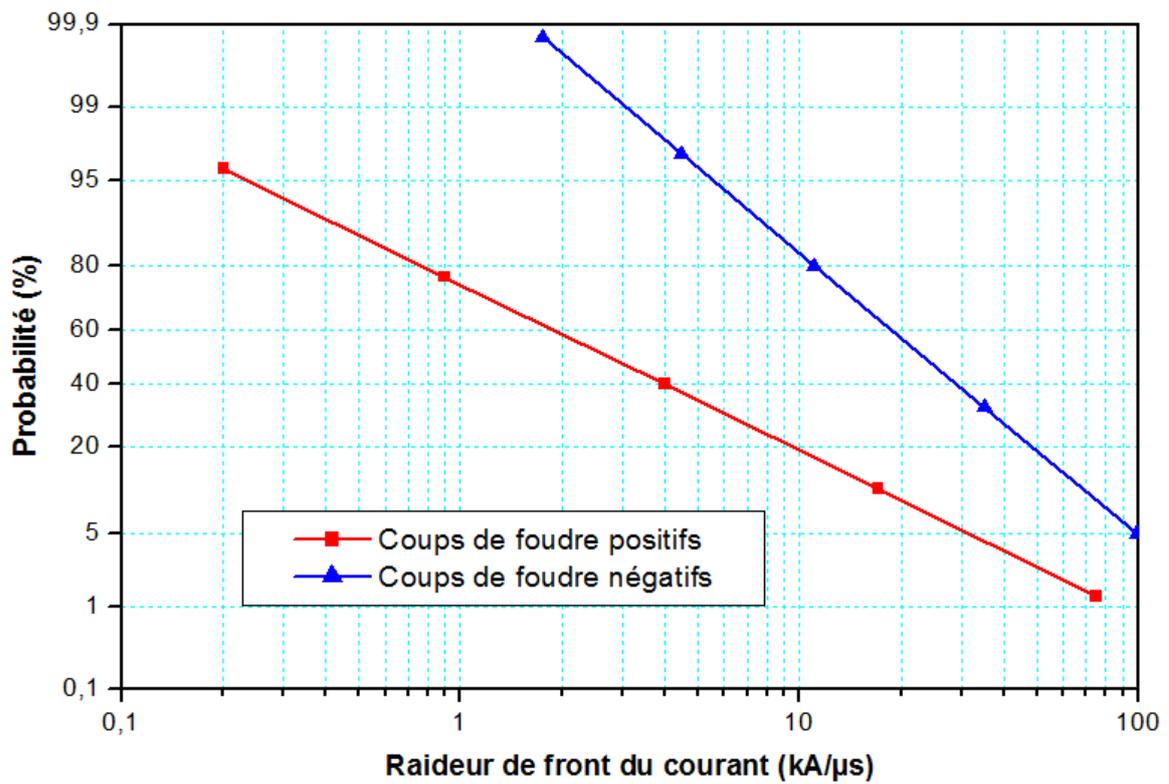


Figure 2.7 Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE [1.10]

2.4. Origines des surtensions

Les contraintes de tension dans les caractéristiques sont reprise dans le tableau 2.1 sont réparties en deux classes en fonction de leurs origines, de leurs formes d'onde et de leurs durées [1.1]

- Surtension basses fréquences ;
- Surtensions transitoires.

Parmi les surtensions transitoires les plus contraignantes on trouve celles dues à un coup de foudre qui peut affecter le conducteur de phase, le câble de garde ou encore le pylône d'un réseau électrique.

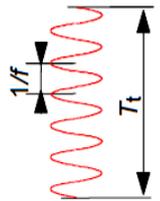
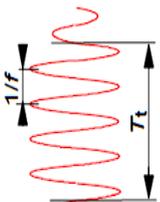
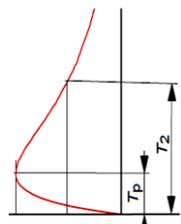
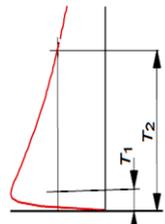
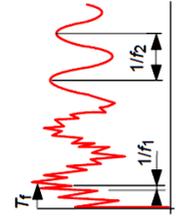
2.4.1. Coup de foudre sur un conducteur de phase

Une décharge de ce type se produit lorsque la foudre tombe directement sur les conducteurs de phase suite à une défaillance de blindage dans la ligne. Ce type d'incidence produit de fortes surtensions dues à deux ondes de surtension qui se propagent dans des directions opposées de la ligne à partir du point d'impact du coup de foudre (figure 2.8). Si l'onde trouve un transformateur ou un disjoncteur ouvert, elle sera totalement réfléchiée en conservant la polarité. Cette onde réfléchiée, superposée à l'onde incidente, produit une surtension égale à deux fois l'amplitude. Ces surtensions s'expriment à partir de l'impédance caractéristique Z_c (300 à 400 Ω) du conducteur d'après la formulation simplifiée suivante [1.10, 2.4]:

$$U(t) = I(t) \cdot \frac{Z_c}{2} \quad (2.1)$$

En se propageant le long de la ligne, l'onde subit des déformations dues aux éventuels amorçages des chaînes d'isolateurs. En effet, selon les valeurs respectives de la tension de tenue de cette chaîne et de l'amplitude de la surtension, il pourrait y avoir un contournement. Pour ce cas de figure, il y a un défaut d'isolement de la ligne dont l'élimination nécessite l'ouverture des disjoncteurs.

Tableau 2.1 Classification des contraintes de tension apparaissant sur les réseaux d'énergie électrique triphasés, formes normalisées de tensions d'essais et essais de tenue diélectrique normalisés [1.1, 1.2].

Classe	Basse fréquence		Transitoire		
	Permanente	Temporaire	A front lent	A front rapide	A front très rapide
Forme de tension					
Domaine des formes de tension	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_r \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ KHz} < f_2 < 300 \text{ KHz}$
Forme normalisée de tension	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	-
Essai de tenu normalisé	Aucun	Essai de courte durée à fréquence industrielle	Essai aux chocs de manœuvre normalisé	Essai aux chocs de foudre normalisé	-

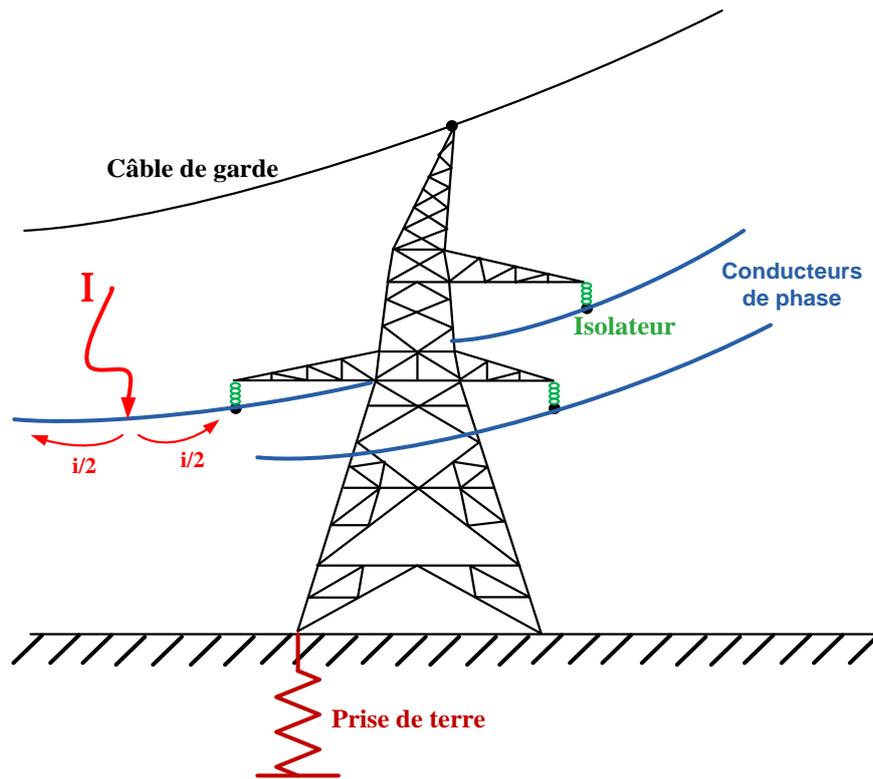


Figure 2.8 Coup de foudre sur le conducteur de phase

Une notion importante est celle du courant critique qui est défini comme étant l'amplitude minimale du courant de foudre qui provoque l'amorçage des chaînes d'isolateurs.

Donc, un coup de foudre tombant sur une ligne avec ou sans câble de garde provoque toujours un défaut. Dans ce cas, la forme d'onde de tension qui poursuit sa propagation au-delà du premier pylône est nettement modifiée à partir de l'instant où se produit le contournement. Plus l'impédance de ce pylône et de sa prise de terre sont faibles, plus l'amplitude de la surtension est faible. Cependant, cette amplitude risque d'être suffisante pour faire amorcer la chaîne du pylône suivant. Un coup de foudre assez fort peut ainsi provoquer des contournements sur plusieurs supports consécutifs, en particulier pour les isolateurs ayant la tenue la plus faible [2.4].

La surtension au sommet du pylône qui suit l'amorçage d'une chaîne d'isolateurs peut entraîner l'amorçage des chaînes des autres phases si l'amplitude du coup de foudre est forte ou si la tenue de la ligne est faible. Une forte impédance du pylône et de sa prise de terre favorise aussi ce phénomène. Le défaut provoqué devient alors polyphasé.

2.4.2. Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône

La protection des lignes de transmission contre les coups de foudre directs est faite avec des câbles de garde qui sont placés au-dessus des conducteurs de phases et reliés directement à la terre au niveau de chaque pylône. Lorsqu'un coup de foudre tombe sur un pylône ou sur un câble de garde, l'écoulement du courant vers la terre à travers la structure métallique du pylône provoque une élévation de potentiel de ce dernier [1.10, 2.4]. Cette surtension dépendant de l'inductance propre L du pylône et de la résistance de sa terre R au choc de foudre (Figure 2.9).

$$U(t) = [R \cdot i_p(t) + L \cdot \frac{di_p(t)}{dt}] \quad (2.2)$$

Lorsque la tension appliquée aux bornes des chaînes d'isolateurs supportant les conducteurs de phase atteint ou dépasse leur tenue diélectrique, il y a donc un amorçage de celle-ci. On parle alors d'amorçage en retour.

Les surtensions se propageant le long de la ligne vers les postes provoquent à nouveau des contournements sur les pylônes rencontrés si le coup de foudre est de forte amplitude et la tenue diélectrique des chaînes d'isolateurs est faible.

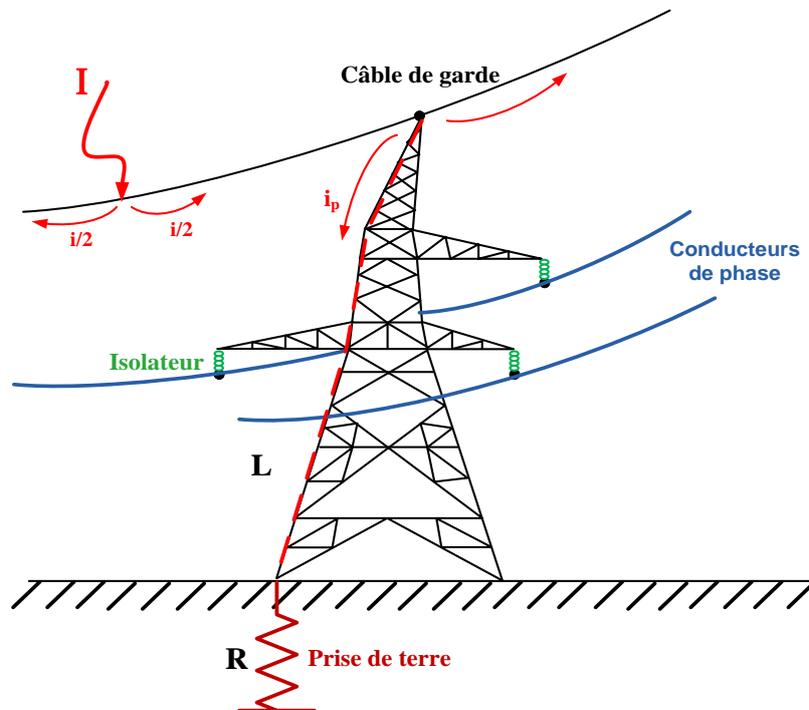


Figure 2.9 Coup de foudre sur le câble de garde

Pour déterminer les conditions de l'amorçage en retour et l'amplitude des surtensions, la modélisation des différents éléments électriques (pylône, chaînes d'isolateurs...) est indispensable pour représenter le comportement de la ligne à l'aide des programmes de simulation. Une approche statistique utilisant la fonction de répartition des amplitudes de courants de foudre permet de calculer le taux d'amorçage en retour d'une ligne.

Ces calculs montrent qu'il n'y a pas d'utilité à installer un câble de garde sur les lignes dont la tenue est faible (cas des lignes de distribution BT et MT), mais l'utilisation de ces câbles est efficace pour les lignes de transport HT et THT. Il n'y a pratiquement plus de risque d'amorçage en retour sur une ligne THT de 750 kV.

Généralement, pour limiter le nombre d'amorçages en retour, on peut :

- Augmenter la tension de contournement des chaînes d'isolateurs ;
- Diminuer la valeur de la résistance des prises de terre des pylônes ;
- Diminuer la valeur de l'impédance des pylônes en utilisant par exemple des supports moins hauts ;
- Installer des parafoudres ZnO, en parallèle sur chaque chaîne d'isolateurs, ayant un niveau de protection en choc de foudre inférieur à la tension de contournement des chaînes d'isolateurs. Cette mesure, qui ne paraît efficace qu'en équipant tous les pylônes et toutes les phases, est très difficile à justifier économiquement, mais elle permet aussi d'éviter les contournements dus aux coups directs et peut se substituer au câble de garde.

2.4.3. Surtensions induites par un coup de foudre tombant sur le sol à proximité de la ligne

Le couplage électromagnétique entre le canal de foudre et la ligne est la cause de surtensions induites qui peuvent atteindre plusieurs centaines de kilovolts sur la ligne. Ces surtensions n'ont pas d'importance sur les réseaux de transport, car elles restent inférieures au niveau de tenue des lignes et des matériels. Par contre, ce n'est pas le cas pour les réseaux de distribution. Il convient d'en tenir compte pour les lignes MT et surtout les lignes BT [1.8].

Pour réduire ces surtensions ou leurs conséquences sur les équipements, on peut citer :

- La diminution de la hauteur des conducteurs qui réduit le couplage lui-même, mais difficile à envisager vis-à-vis d'autres critères ;
- L'amélioration de la mise à la terre du neutre, pour le réseau BT ;
- L'utilisation de parafoudres.

2.4.4. Propagation des surtensions de foudre vers les postes

La surtension de foudre, dont la forme dépend des éventuels amorçages au niveau des pylônes, se propage le long de la ligne jusqu'au poste en subissant un amortissement dû à l'effet de peau mais surtout à l'effet couronne. Les surtensions réellement contraignantes pour le matériel constituant le poste sont dues à des coups de foudre tombant sur la ligne entre le poste et une distance dite distance limite, de quelques kilomètres au maximum [1.10]. Pour les coups de foudre tombant au-delà de cette distance limite, les surtensions sont le plus souvent suffisamment amorties par l'effet couronne pour ne plus pouvoir provoquer d'amorçage dans le poste.

Par ailleurs, pour les postes, on parle d'effet d'autoprotection lorsque plusieurs lignes sont en permanence raccordées au poste car, dans ce cas, la pente de l'onde de foudre incidente est divisée par le nombre de lignes raccordées. Par contre, la configuration pour laquelle les surtensions sont les plus importantes est celle d'une ligne qui arrive sur un appareil de coupure en position ouverte. Il peut alors y avoir de doublement de la surtension incidente.

Il est préférable d'effectuer un calcul précis des contraintes de tension avec les moyens actuels de simulation permettant de représenter la ligne et le poste. Ils permettent de déterminer, à partir des éléments statistiques connus des paramètres de foudre, les fonctions de répartition des surtensions sur des points fondamentaux du poste où son dimensionnement est nécessaire. Cela permet de mieux prendre en compte le caractère aléatoire du phénomène de foudre.

2.5. Types d'isolations

Lors de l'analyse des niveaux d'isolation des équipements, une distinction doit être faite entre l'isolation externe et l'isolation interne [1.1].

L'isolation externe se réfère aux surfaces isolantes directement exposées à l'environnement et qui sont donc affectées par des facteurs tels que: l'altitude, le taux d'humidité et la pollution. En absence de contact avec l'environnement extérieur, l'isolation interne est protégée contre les facteurs atmosphériques et environnementaux.

Ainsi, une isolation auto-régénératrice est considérée comme une isolation qui récupère totalement ses propriétés isolantes après une décharge perturbatrice provoquée par une surtension, généralement ce type d'isolation correspond à l'isolation extérieure. Alors qu'il est défini comme une isolation non auto-régénératrice automatiquement celle qui perd tout ou une partie de ses propriétés isolantes après une décharge perturbatrice produite, généralement ce type d'isolation correspond à l'isolation interne.

2.6. Dispositifs de protection

Pour éviter que les surtensions n'aient des suites catastrophiques sur les appareils, on construit ceux-ci de façon à ce qu'ils résistent à des surtensions à la fréquence nominale pendant 1 min et à des chocs normalisés. Pour éviter que la tension n'atteigne ces valeurs, on installe, dans les postes, des parafoudres qui s'amorcent à une tension définie et écoulent ces surtensions à la terre, puis interrompent le courant qui les traverse. Les dispositifs de protection peuvent être classés en deux catégories [2.5]:

- Les éclateurs à air;
- Les parafoudres.

2.6.1. Eclateurs à air

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension de contournement. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes. La forme et la nature de ces électrodes sont très variables. Le principal avantage de l'éclateur est son faible prix (Figure 2.10).

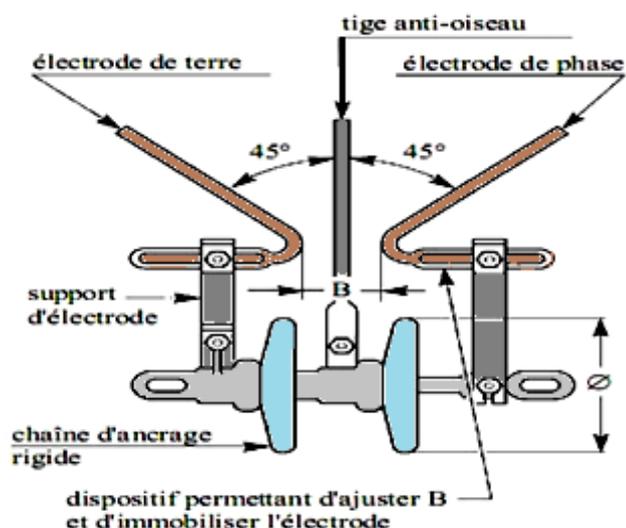


Figure 2.10 Schéma d'un éclateur [2.5]

Il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction [2.5].

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans inconvénients :

- Une fois amorcé entre les deux électrodes, l'arc ne se désamorce pas spontanément. Le défaut artificiel ainsi créé doit être éliminé par l'action des protections et du disjoncteur associé. Il est, par ailleurs, à l'origine de coupures brèves très gênantes pour la qualité de service ;
- Le fonctionnement de l'éclateur conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité ;
- Le niveau d'amorçage est très fluctuant ;
- Les éclateurs sont sensibles aux agressions extérieures.

En tout état de cause, l'éclateur demeure un excellent moyen de protection des isolations dans l'air puisque la tenue diélectrique du matériel à protéger subit les mêmes fluctuations que sa tension d'amorçage. En revanche, il est moins bien adapté à la protection des autres matériels tels que les transformateurs, les câbles, les postes électriques sous enveloppe métallique. On est alors amené à le remplacer de façon avantageuse par des parafoudres.

2.6.2. Parafoudre au carbure de Silicium

Les parafoudres SiC (Figure 2.11) permettent de remédier à la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur.

Ce type de parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances en carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs, l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante remplie d'un gaz sec (air ou azote). L'étanchéité est primordiale pour éviter la corrosion interne donc la dérive des caractéristiques et, à terme, la défaillance du parafoudre. En subdivisant l'intervalle d'amorçage en plusieurs éclateurs élémentaires, on stabilise les caractéristiques d'amorçage du parafoudre.

Les résistances variables sont constituées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disques dont les faces parallèles sont métallisées et le pourtour recouvert d'un revêtement isolant destiné à éviter les contournements.

Sous la tension de service, les éclateurs internes isolent le parafoudre. Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs deviennent conducteurs et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les varistances dont la résistance diminue au fur et à mesure que le courant augmente, ce qui permet de limiter la surtension. Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la non-linéarité des varistances entraîne une décroissance très rapide du courant pouvant alors être facilement interrompu au premier passage par zéro de la tension appliquée. Ainsi, la surtension est écrêtée sans provoquer de défaut [2.5, 2.6].

Son niveau de protection est la valeur maximale des trois tensions suivantes :

- La tension maximale d'amorçage au choc de foudre (1.2/50 μ s);
- La tension maximale d'amorçage sur onde à front raide, divisée par 1,15;
- La tension résiduelle au courant nominal de décharge.

Bien que d'un coût plus élevé, le parafoudre SiC se révèle très avantageux par rapport à un éclateur à air classique :

- L'extinction de l'arc interne est spontanée après passage de la surtension ;
- La tension à ses bornes est non nulle après amorçage, ce qui évite la transmission d'une onde de tension coupée ;

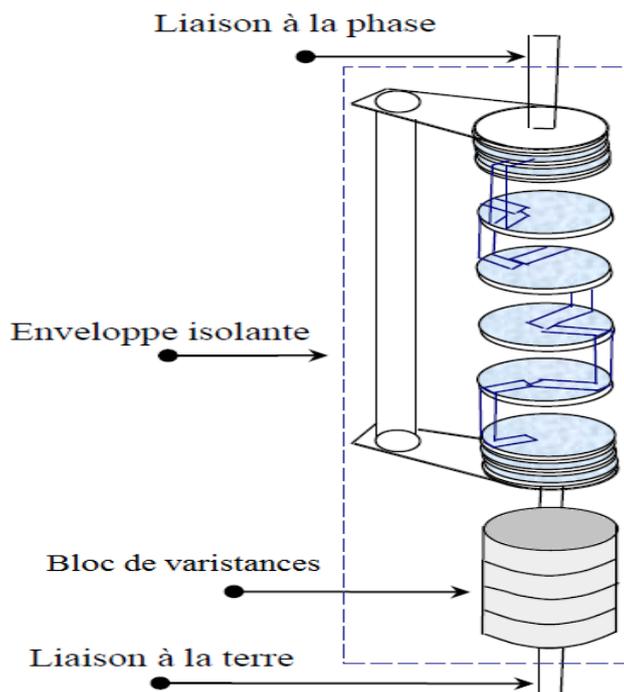


Figure 2.11 Constitution d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs [2.5]

- Sa tension d'amorçage est plus stable ;
- Il présente une bonne insensibilité aux agressions extérieures puisque les éléments actifs sont placés dans une enveloppe hermétiquement fermée.

2.6.3. Parafoudre à Oxyde de Zinc

C'est au cours des années 1970 que des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces varistances qui présentent deux avantages essentiels [2.5, 2.6] :

- Un coefficient de non-linéarité très important sur une large plage de courant;
- Une capacité d'absorption d'énergie très élevée.

La partie active des parafoudres ZnO est simplement constituée d'un empilage de varistances à Oxyde de Zinc, placé dans une enveloppe étanche et isolante en porcelaine ou, plus récemment, en matériau synthétique (Figure 2.12).

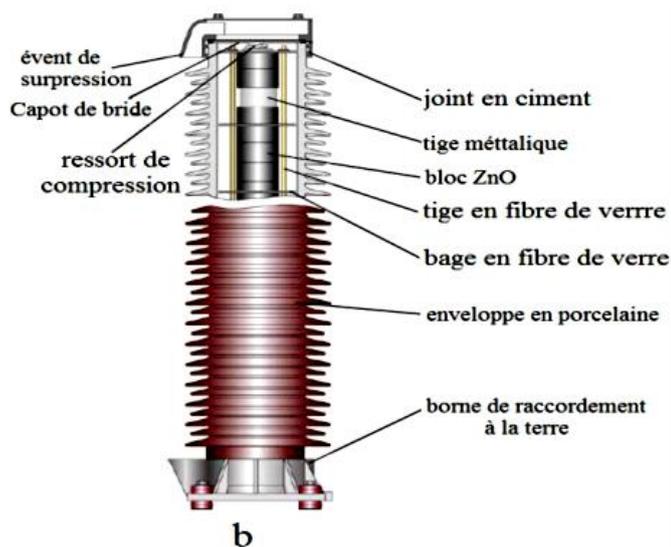


Figure 2.12 Structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine [2.5]

Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonyme de facilité de construction. La fabrication de ces céramiques requiert en effet beaucoup de soin et de savoir-faire, car leurs caractéristiques et leur fiabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible. Elles sont principalement constituées d'Oxyde de Zinc (90% en masse) et d'un mélange d'autres Oxydes (Oxyde de Bismuth, de Cobalt, de Manganèse, de Chrome, d'Etain...) de pureté et de granulométrie soigneusement contrôlées, qui sont mélangés en phase aqueuse. Ce mélange est ensuite asséché et la poudre résultante est compactée sous forme de disques. Les pièces sont alors frittées à très haute température (1000°C et plus) de façon à densifier l'ensemble et obtenir l'effet de non-linéarité recherché. Les disques sont finalement revêtus, en périphérie, d'une couche isolante assurant la tenue diélectrique de la varistance, puis métallisés sur chacune de leurs faces par projection d'un alliage métallique en fusion.

2.6.3.1. Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO

Les parafoudres ZnO protègent l'isolation des équipements dans les systèmes électriques contre les surtensions internes et externes [2.5].

Sous la tension de service permanent, l'impédance d'un parafoudre ZnO est très élevée si bien qu'il est parcouru par un courant très faible dit courant de fuite (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît, sa résistance diminue rapidement de manière à constituer un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre, et

donc à limiter le niveau de la contrainte résiduelle.

Par suite, la caractéristique V-I de l'appareil est fortement non-linéaire. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant le parafoudre passe de 0,1 mA à 10 kA, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ : cela fait du parafoudre ZnO un dispositif de protection presque idéal. Les parafoudres ZnO ont rapidement remplacé les parafoudres SIC, cela est dû à la forte non-linéarité de leurs caractéristiques (V-I ou E-J) comme il est montré sur la figure 2.13, ce qui a pour effet d'éliminer les éclateurs qui étaient présents dans leurs prédécesseurs et les caractéristiques électriques sont exclusivement déterminées par les propriétés des varistances ZnO.

On augmente la tension assignée en ajoutant des varistances en série par contre pour avoir de plus forte énergie on augmente le diamètre des varistances ou on réalise des colonnes parallèles. Le niveau de protection d'un parafoudre ZnO correspond à sa tension résiduelle au courant nominal de décharge qui le caractérise [2.5].

A partir des caractéristiques d'une varistance, dimensionner un parafoudre ZnO consiste à définir le nombre de varistances élémentaires à associer en série.

Deux exigences influent sur le nombre de varistances à placer en série :

- Un bas niveau de protection (un nombre maximal) ;
- La tenue à une tension de service donnée (un nombre minimal).

Par ailleurs, le parafoudre doit être capable en toutes circonstances de dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie qui lui est injectée. Lors de l'écrêtage d'une surtension, l'échauffement des varistances peut être considéré comme adiabatique. Il est donc nécessaire que la puissance dissipée par le parafoudre soit, à tout instant, supérieure à la puissance qu'il absorbe, sachant que celle-ci croît fortement avec la température. Dans le cas contraire, un phénomène appelé "emballement thermique" conduit à la défaillance du parafoudre.

En dehors des décharges de foudre, le parafoudre écrête toutes les surtensions du réseau. La norme [2.6] définit ainsi des classes de décharge de ligne de 1 à 5 correspondants à des capacités d'énergie croissantes.

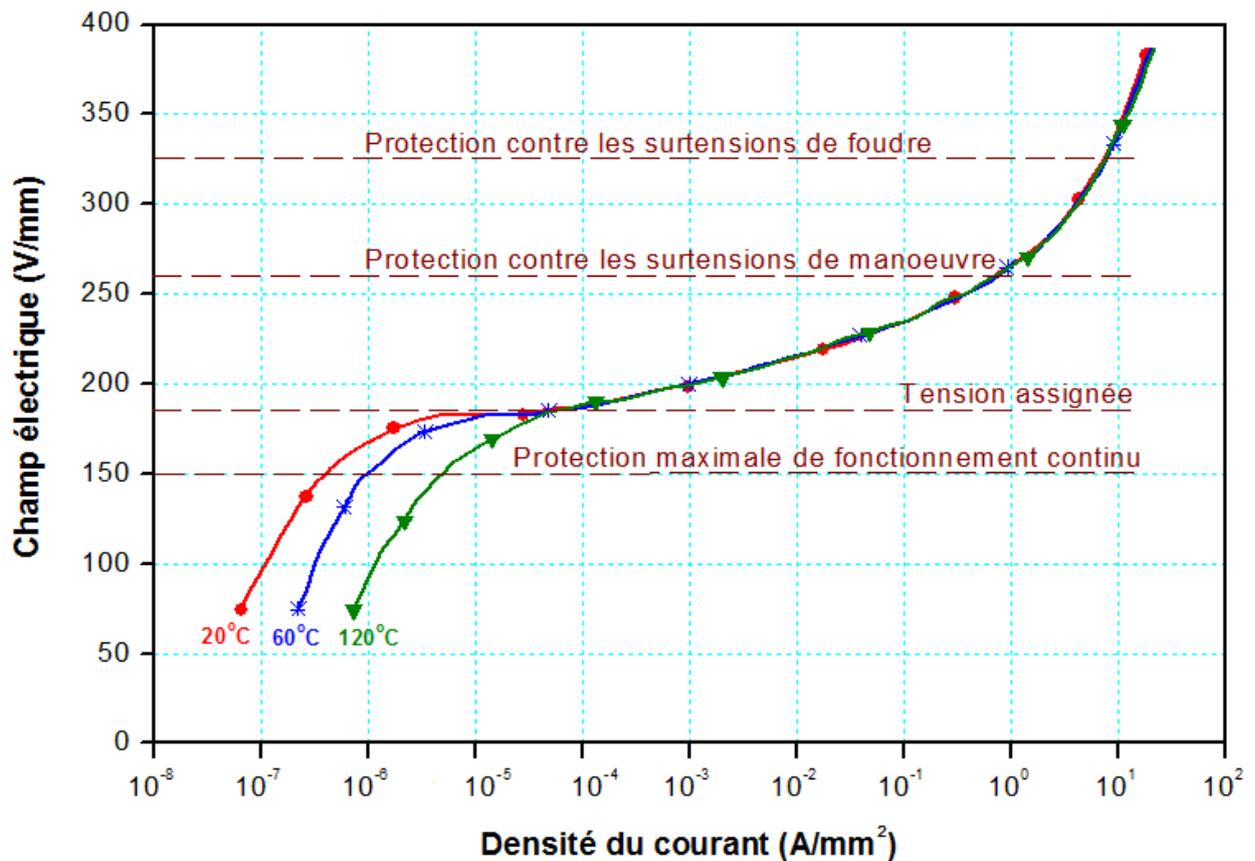


Figure 2.13 Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO [2.7]

Pour les réseaux de distribution moyenne tension, la classe habituelle est la classe 1. Les classes 2 et 3 se retrouvent usuellement sur des réseaux de 60 à 225 kV et les classes 4 et 5 pour les réseaux 225kV, 400kV et au delà.

2.6.3.2. Caractéristiques des parafoudres ZnO

L'étude des propriétés des parafoudres ZnO et l'analyse des contraintes d'exploitation ont permis de définir les caractéristiques électriques des parafoudres fixées par les spécifications d'essai [2.5].

- La notion de tension assignée (U_r), bien qu'ambiguë, est capitale. En fait, elle caractérise la tenue du parafoudre aux surtensions temporaires. Il s'agit plus précisément de la surtension maximale à fréquence industrielle que l'on peut appliquer, pendant 10s et suite à l'absorption d'une forte énergie, sans constater d'emballement thermique du parafoudre.

- La tension maximale de service permanent (U_c) est la tension maximale que le parafoudre est capable de supporter en permanence dans des conditions ambiantes données.
- Le courant nominal de décharge (I_n) est la valeur de crête d'une onde de courant de forme bi-exponentielle 8/20 μ s, qui sert à classer le parafoudre. En moyenne tension, il peut prendre la valeur 5 kA ou 10 kA. Le niveau de protection du parafoudre est défini à ce courant.
- La capacité d'absorption énergétique est traduite par la tenue aux ondes de courant de forme bi-exponentielle 4/10 (65 kA pour $I_n = 5$ kA et 100 kA pour $I_n = 10$ kA) et par la tenue aux ondes de courant de forme rectangulaire dont la durée et l'amplitude définissent la sévérité.

L'utilisation d'un parafoudre n'est efficace que sous certaines conditions d'implantation, et en particulier selon les distances qui les séparent du matériel à protéger et de sa terre, d'où l'importance de la notion de distance de protection du parafoudre.

2.6.3.3. Comportement dynamiques des parafoudres ZnO

L'analyse des données collectées sur les caractéristiques des parafoudres ZnO et les travaux menés par des groupes de recherche à travers le monde indiquent que les parafoudres ZnO ont des caractéristiques dynamiques qui dépendent de la fréquence et qui sont très importantes lorsqu'il s'agit des études de foudre ou d'autres ondes à front rapide [2.5]. Pour des contraintes ayant des temps de montée inférieur à 8 μ s, la tension de décharge du parafoudre atteint son maximum avant que le courant de décharge du parafoudre atteigne le sien et la tension de décharge du parafoudre ZnO augmente, lorsque le temps de front du courant de décharge diminue. Cette augmentation de la tension résiduelle peut atteindre 6% quand le temps de montée est réduit de 8 μ s à 1,3 μ s.

La figure 2.14 montre les différentes surtensions en fonction de leurs plages de durée et amplitudes. Elle présente aussi la relation liant les surtensions, les niveaux de protection du parafoudre et les tensions de tenue d'un équipement [2.8].

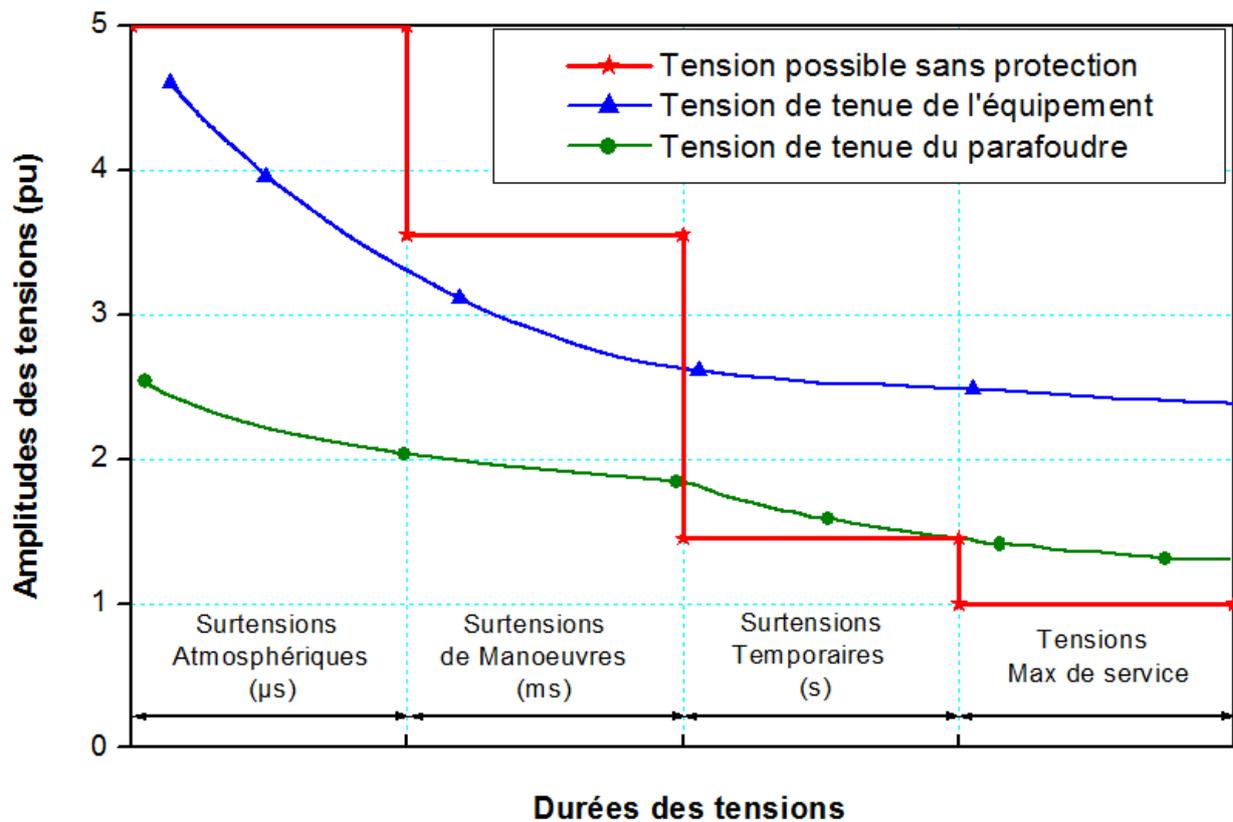


Figure 2.14 Schéma représentatif des amplitudes des tensions en fonction de leur durée, tensions de tenue de l'équipement et des niveaux de protection des parafoudres [2.8]

Pour les surtensions de manoeuvre et atmosphérique, l'amplitude de la surtension pourrait dépasser la tension de tenue des équipements, toutefois, le rôle du parafoudre est de limiter ces surtensions à des valeurs inférieures. En conséquence, l'isolation doit résister à des surtensions qui pourraient survenir en cas d'absence du parafoudre. Comme les surtensions temporaires étant généralement inférieures à la tension de tenue, le parafoudre ne limite pas ce type de surtensions.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux contraintes de tension et à leurs pendants, les tenues diélectriques des matériels, tenues qui caractérisent la capacité d'une isolation à supporter certains niveaux de tension sans rupture diélectrique, c'est-à-dire sans amorcer. Par ailleurs, nous avons donné des informations d'ordre général sur les effets électromagnétiques de la foudre et sur les dispositifs de protection des systèmes électriques. Il peut être conclu que si l'on veut améliorer la qualité du service, il s'avère

nécessaire de faire un choix rationnel des isolements. Ce qui impose donc à la fois la connaissance des diverses contraintes électriques apparaissant dans un réseau, la connaissance de la réponse des isolations à ces contraintes, celle des caractéristiques de l'appareillage de protection et enfin celle des concepts et des méthodologies utilisées pour la mise en œuvre pratique de la coordination de l'isolement.

COORDINATION DES ISOLEMENTS

3.1. Introduction

La coordination des isolements est une discipline qui permet de réaliser le meilleur compromis technico-économique dans la protection du matériel contre les surtensions pouvant apparaître sur les installations électriques indépendamment de la fréquence mise en jeu [3.1]. Ce chapitre discutera la procédure, les méthodes et les critères de la coordination des isolements.

3.2. Procédure de la coordination des isolements

La coordination des isolements a pour objet de déterminer les caractéristiques d'isolation nécessaires et suffisantes des équipements des réseaux électriques et de garantir que le niveau d'isolation des équipements soit supérieur à la tension qui peut apparaître. Cette dernière est limitée seulement si les dispositifs de protection sont installés. Pris en compte des conditions environnementales et de l'emplacement du poste, la coordination des isolements consiste à mettre en relation les surtensions pouvant apparaître dans le système et les niveaux de protection des parafoudres avec les niveaux d'isolation des équipements [3.2].

Le niveau d'isolation est défini comme une valeur d'essai pour laquelle l'isolation, dans des conditions spécifiées, prend en charge un certain nombre de décharges électriques sans présentation de défaillance [1.1].

Une procédure de coordination des isolements doit prendre en compte les facteurs qui influencent la résistance de l'isolation: la polarité des surtensions, la forme des ondes de surtension, le type d'isolation, les conditions atmosphériques (en cas d'isolation externe) et enfin l'état physique des équipements.

La procédure proposée dans la norme [1.1] consiste à sélectionner le niveau d'isolation normalisé et à déterminer les distances dans l'air, à partir des tensions représentatives (surtensions) et des facteurs qui influent sur la résistance de l'isolation.

La méthode de la coordination des isolements à appliquer dépendra des informations disponibles sur les surtensions. Les sections suivantes détaillent les principes des méthodes de la coordination des isolements et les étapes à suivre dans la procédure proposée par la CEI (Commission électrotechnique internationale).

3.3. Coordination des isolements d'un équipement

Les critères généraux de la coordination des isolements appliqués individuellement à chaque équipement sont présentés au moyen d'une courbe tension-temps comme le montre la figure 3.1. Les tensions impulsionnelles sont situées dans la partie supérieure de la figure, tandis que les courbes de tension de fréquence industrielle sont situées dans la partie inférieure, dans un ordre correcte pour la coordination des isolements [3.3]. La figure 3.1 est conforme à la figure 2.14 du chapitre II, qui montre de manière générale la relation entre les surtensions, le niveau de protection des parafoudres et le niveau d'isolation du matériel.

En résumé, le niveau d'isolation des équipements doit être dans tous les cas supérieur aux tensions surviennes.

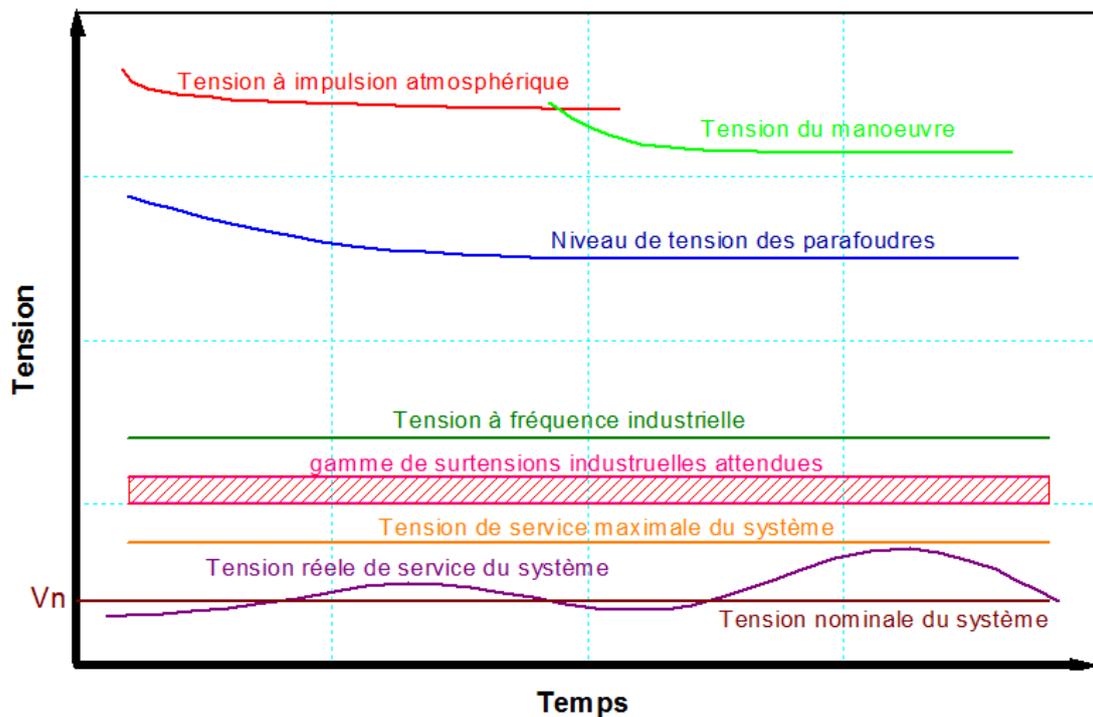


Figure 3.1 Schéma général de coordination de l'isolation individuelle [3.3]

Lors de l'analyse des niveaux d'isolation, une distinction doit être faite entre l'isolation externe et l'isolation interne.

Il est également nécessaire de faire la distinction entre l'isolation auto-régénératrice et l'isolation non auto-régénératrice, en fonction de sa réponse aux tests diélectriques.

Pour la présente étude, on considérera qu'une isolation externe est auto-régénératrice et qu'une isolation interne est automatiquement non auto-régénératrice.

Dans le cadre de la coordination des isolements, le critère de l'amélioration de la protection des équipements les plus importants du système sera pris en compte, ce qui, dans le cas des postes, correspond au transformateur de puissance. Pour cela, des parafoudres spécifiques sont nécessaires. Pour le reste des équipements, il faut vérifier qu'ils s'intègrent bien dans la zone de protection des parafoudres existants. De plus, dans les postes qui contiennent des générateurs, l'utilisation de parafoudres spécifiques pour leur protection doit être définie par des études et des simulations appropriées [3.4].

3.4. Coordination des isolements d'une installation

La première étape consiste à déterminer la tension nominale dans les équipements ou dans l'installation à concevoir, en tenant compte des niveaux de protection fournis par les dispositifs de protection installés et de la valeur maximale de la tension du fonctionnement [1.1]:

- Pour les installations de type I (entre 1 kV et 245 kV), les surtensions temporaires et d'origine atmosphérique sont analysées ;
- Pour les installations de type II (>245 kV), les surtensions à fronts lents et d'origine atmosphérique sont analysées ;

Le niveau d'isolation de base étant choisi, c'est-à-dire le niveau d'isolation attribué dont les tensions supportées normalisées sont associées à la tension de service la plus élevée selon la classification CEI.

Les objectifs d'une étude de la coordination des isolements seront différents en fonction de l'équipement à étudier, du type d'isolation à sélectionner et des surtensions qui influenceront cette sélection. Vous trouverez ci-dessous les objectifs, le type de calcul à effectuer et les surtensions qu'il faudra estimer dans la coordination des isolements des lignes aériennes de transport et des postes.

3.4.1. Coordination des isolements d'une ligne aériennes

La coordination des isolements d'une ligne de transmission peut avoir les objectifs suivants [3.5]:

- Concevoir le blindage (nombre et emplacement des câbles de garde) adapté aux décharges atmosphériques, ce qui minimise le nombre de contournements dus à une défaillance du blindage.
- Concevoir une mise à la terre efficace qui minimise le taux d'amorçage en retour.
- Choisir les dimensions des chaînes d'isolateurs pour résister aux surtensions pouvant être causées par des manœuvres et des décharges atmosphériques.
- Dimensionner les distances entre les conducteurs, entre les conducteurs et la terre et entre les conducteurs et les supports.
- Décider s'il sera nécessaire d'installer des parafoudres et, dans le cas échéant, déterminer leurs emplacements et leurs valeurs nominales.

La conception des câbles de garde et de la prise de terre sera imposée par les surtensions causées par la foudre, alors que le niveau de l'isolation à choisir dépendra des surtensions des manœuvre et celles causées par la foudre. Le niveau de pollution peut être déterminant dans la sélection des isolateurs. Enfin, l'installation des parafoudres dépendra des surtensions dues aux manœuvres et aux décharges atmosphériques, ainsi que la prise de terre peut être réalisée, en fonction du type de terrain sur lequel la ligne est installée. Le choix des valeurs nominales des parafoudres dépendra de la tension permanente maximale à la fréquence industrielle et des surtensions temporaires pouvant provenir de la ligne.

L'amorçage des isolateurs d'une ligne aérienne peut être causé par des surtensions de manœuvre ou d'origine atmosphérique. En tant que critères de conception, le nombre de contournements causés par la foudre par km et par an, et le nombre moyen des opérations de manœuvre sont effectués pour obtenir un contournement.

3.4.2. Coordination des isolements d'un poste

L'étude de la coordination des isolements d'un poste est plus complexe en raison du nombre et du type des éléments considérés. En général, les objectifs des études des postes sont les suivants [3.5]:

- Sélectionner le niveau d'isolation standard pour tous les équipements du poste.
- Concevoir les câbles de garde (type, nombre, emplacement) qui doivent protéger les équipements contre les décharges atmosphériques.
- Déterminer les distances dans l'air, particulièrement les distances entre phase et terre, et entre phases.
- Décider s'il sera nécessaire d'installer des parafoudres et, dans le cas échéant, déterminer leurs emplacements et leurs valeurs nominales.
- Décider s'il sera nécessaire d'installer d'autres dispositifs de protection.

Comme dans les lignes aériennes, la conception du blindage sera imposée par les surtensions provoquées par la foudre, tandis que le niveau d'isolation à sélectionner dépendra des surtensions par manœuvre et de celles provoquées par la foudre. Il sera également nécessaire de prendre en compte le niveau de pollution dans la sélection des isolateurs. Les surtensions causées par les décharges atmosphériques imposent à la fois le nombre et la position des parafoudres, tandis que le choix de leurs valeurs nominales dépendra de la tension permanente maximale à la fréquence industrielle et des surtensions temporaires pouvant être générées dans le poste.

Les pannes des équipements d'un poste peuvent être provoquées, comme dans le cas des lignes aériennes, par des surtensions de manœuvre et d'origine atmosphérique, bien qu'elles puissent également être dues à certaines surtensions temporaires, telles que celles provoquées par une Ferro-résonance. L'effet d'une panne dans un poste peut être beaucoup plus important que dans une ligne aérienne. En tant que critère de conception, le temps moyen entre défaillances (qui correspond à l'acronyme anglais MTBF, Temps moyen entre les défaillances) est généralement utilisé. La valeur du MTBF dépendra de la technologie utilisée: pour les postes blindés au SF₆ (poste à isolation gazeuse également appelées GIS), on choisit généralement un MTBF compris entre 300 et 1000 ans, tandis que dans les postes avec isolation à l'air, la valeur du MTBF sera comprise entre 100 et 400 ans [3.5].

3.4.3. Critères généraux de la coordination des isolements d'un poste

Les critères généraux de la coordination des isolements applicables à un poste sont présentés sur la figure 3.2. Le niveau d'isolation du transformateur, qui est l'équipement le mieux protégé, est pris comme référence. Ensuite, le niveau d'isolation du reste des équipements est supérieur à celui du transformateur car ces isolements ne sont pas directement protégés par des parafoudres.

Pour les lignes connectées au poste, deux niveaux d'isolation sont considérés, une valeur supérieure correspondante à la ligne en tenant compte de sa distance par rapport au poste et une valeur inférieure à l'entrée du poste, ceci afin que les ondes d'impulsion soient déchargées à la terre avant d'arriver au poste. Le niveau de protection du parafoudre est toujours inférieur au niveau d'isolation des autres équipements et à l'isolation de la ligne. Enfin, le niveau d'isolation entre les phases est supérieur au niveau d'isolation entre phase et terre [3.3].

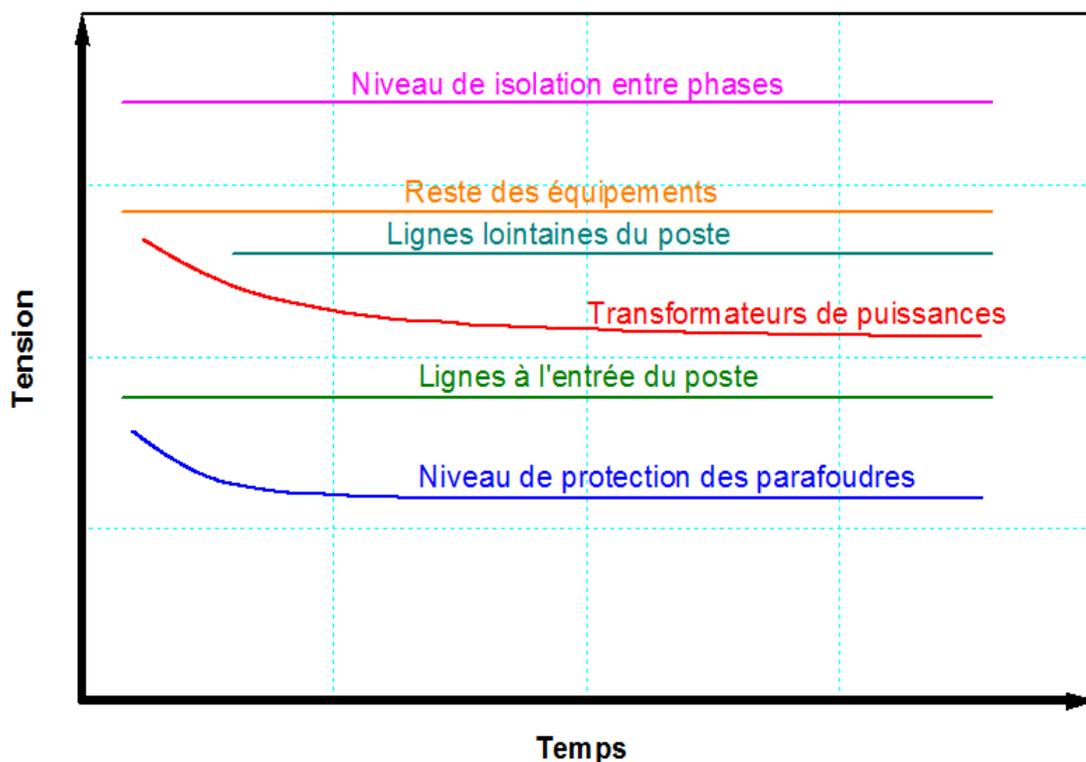


Figure 3.2 Schéma général de la coordination des isolements pour un poste [3.3]

3.5. Méthodes de la coordination des isolements

Deux méthodes de la coordination des isolements, déterministe et statistique, peuvent être distinguées. L'application de l'une ou de l'autre dépendra des informations disponibles sur le système ou l'installation à étudier et des informations permettant d'estimer les surtensions [1.2].

Les surtensions provenant d'un réseau électrique haute tension, principalement causées par des manœuvres et des décharges atmosphériques, ont un caractère statistique et sont généralement caractérisées au moyen d'une fonction de densité de probabilité.

De plus, le comportement de l'isolation dans des conditions normalisées est aléatoire et peut être caractérisé par une distribution statistique normale ou gaussienne. Bien que, dans ce cas, il soit normal d'utiliser la fonction de distribution cumulative, c'est-à-dire, la probabilité que l'isolation se perd lorsque la valeur de l'onde de tension normalisée appliquée dépasse le niveau d'isolement. Cette manière de caractérisation est généralement utilisée lorsque l'isolation est auto-régénératrice, tandis que pour une isolation non auto-régénératrice, on suppose généralement une valeur limite, qui sépare la zone de défaillance de la zone saine.

3.5.1. Méthode de la coordination statistique

La méthode de la coordination statistique peut être appliquée lorsqu'il est possible d'obtenir la fonction de densité de probabilité des surtensions, qui sera utilisée dans la sélection de l'isolation. A partir de la distribution statistique des surtensions et de la fonction de probabilité de défaillance de l'isolation, il est possible d'obtenir le risque ou le taux de défaillance d'un dispositif contre un certain type de contrainte diélectrique en utilisant par exemple la méthode de Monte Carlo [1.2].

Cela permet de sélectionner et de dimensionner l'isolation de manière à ce que le taux de défaillance se situe dans les limites acceptables.

Avec les informations produites d'une étude statistique de la coordination des isolements, on pourra penser à faire une étude d'optimisation de l'isolement, reliant le coût de l'énergie non fournie au type de défaillance. En pratique, ces études ne sont pas mises en œuvre du fait de la difficulté d'évaluer les conséquences des défaillances

d'isolement pour les différents états de fonctionnement du réseau et de l'incertitude liée à la définition des coûts de l'énergie non fournie. Par conséquent, il est préférable de surdimensionner le système d'isolation plutôt que de l'optimiser.

3.5.2. Méthode de la coordination déterministe

La méthode déterministe, également appelée conventionnelle, s'applique lorsqu'il n'est pas possible de connaître la distribution statistique des surtensions à partir de tests ou de simulations. Avec cette méthode, le choix de l'isolation peut être fait de manière à supporter la surtension maximale pouvant être générée, c'est-à-dire, une probabilité de 100% de supporter les tensions de test appliquées. Toutefois, lors de l'application de cette méthode, les taux de défaillances possibles de l'équipement ne sont pas pris comme référence. En pratique, une distinction est généralement faite entre l'isolation auto-régénératrice et l'isolation non auto-régénératrice [1.2]. Dans le premier cas, la valeur U_{10} est généralement utilisée comme paramètre de conception, c'est-à-dire, la valeur de la tension avec une probabilité de défaillance de 10%.

La figure 3.3 montre un organigramme de la procédure de la coordination des isolements.

A partir de là, on peut conclure que la méthode statistique de la coordination des isolements, contrairement à la méthode déterministe, permet d'estimer le taux de défaillance en fonction des facteurs de conception à l'aide de méthodologies plus complexes et des études plus élaborées.

Cependant, un bon nombre des procédures appliquées combinent les deux méthodes. Par exemple, certains facteurs utilisés dans la méthode déterministe ont été dérivés d'expériences statistiques et certaines considérations statistiques peuvent être omises dans la méthode statistique, faisant ainsi d'une méthodologie hybride.

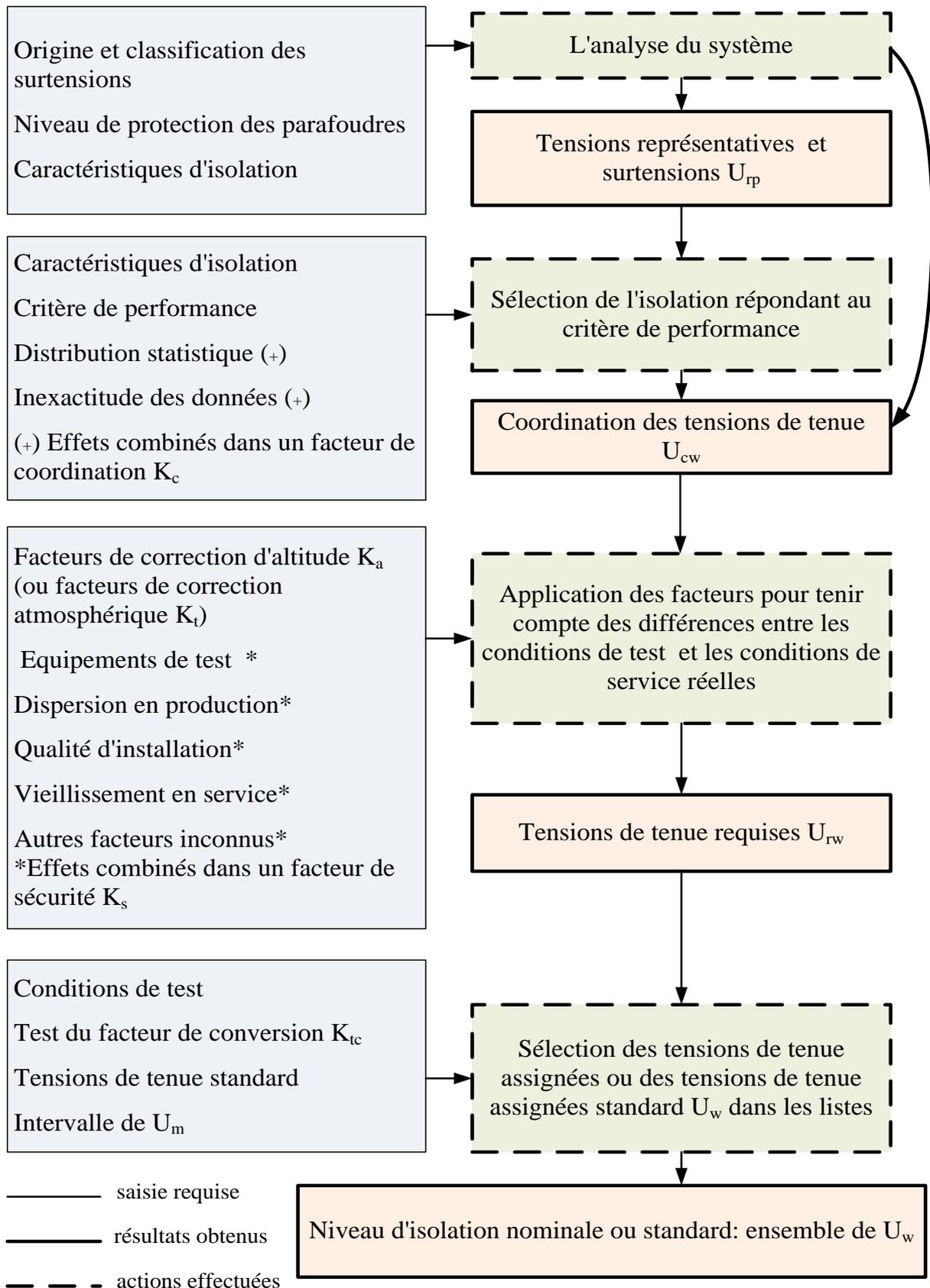


Figure 3.3 Procédure de détermination des niveaux d'isolation standard [1.1]

3.6. Conclusion

Ce chapitre a traité les points essentiels pour les études de la coordination des isolements. Le processus de la coordination des isolements permet d'obtenir un ensemble de tensions de tenues qui constituent le niveau d'isolation normalisé à spécifier dans les équipements du poste. Par ailleurs, il a été montré que l'une des difficultés essentielles du processus de la coordination des isolements réside dans le fait que les contraintes des tensions appliquées aux matériels et les tenues diélectriques de ces matériels sont de nature probabiliste; cette double incertitude rend délicat l'ajustement des tenues diélectriques à spécifier par rapport aux contraintes. Cependant, il a été conclu que la méthode statistique de la coordination des isolements permet d'estimer le taux de défaillance en fonction des facteurs de conception. Un diagramme pour la procédure de détermination des niveaux d'isolation standard est présenté.

LES MODELES POUR LA COORDINATION DES ISOLEMENTS

4.1. Introduction

Dans le développement de l'électricité et de l'informatique, des programmes de simulation sont développés pour faciliter les études de circuits électriques de plus en plus complexes et pour la création de prototypes de modélisation de phénomènes électriques. Parmi ceux-ci, certains concernent spécifiquement les réseaux de transport et les phénomènes électromagnétiques. L'EMTP est considéré comme l'un des programmes universels largement utilisés dans les simulations digitales des phénomènes transitoires de nature électromagnétique ou électromécanique dans les systèmes d'énergie électrique. Avec ce programme digital, des réseaux complexes et des systèmes de commandes et de contrôle de structure arbitraire peuvent être simulés. L'EMTP a des capacités de modélisation extensive et d'autres particularités très importantes en plus du calcul des transitoires. Il a prouvé qu'il est un outil souhaitable pour l'analyse des surtensions de foudre dans les postes de transformations et les études de coordination des isolements.

La modélisation de chacun des éléments du poste est indispensable pour réaliser cette étude. Le choix des modèles est étroitement lié aux phénomènes qu'on veut simuler [1.11].

4.2. Modélisation des éléments du système étudié

Le système étudié est un poste 400 kV, 50 Hz à isolation dans l'air (AIS). Le poste possède quatre entrées, deux jeux de barres et deux autotransformateurs de puissance. Des parafoudres ZnO sont installés aux entrées des lignes et au niveau des autotransformateurs. Les lignes de transmission connectées, sont des lignes triphasées ayant deux conducteurs par phase et un câble de garde. Les conducteurs sont supportés par des pylônes de type triangle [4.1].

4.2.1. Modélisation des éléments de la ligne de transmission

Les spécifications utilisées pour modéliser la ligne de transmission (conducteurs de phase, câble de garde et pylône..etc) telles que les caractéristiques géométriques et électriques sont résumées dans les sections suivantes.

4.2.1.1. Les conducteurs électriques

Nous avons représenté la ligne de transmission foudroyée par plusieurs sections représentant une longueur de 3,5 km, auquel est rajoutée une section de 10 km. Cette dernière est utilisée de côté de la source pour éviter la réflexion des ondes [1.11]. Chaque portée à une longueur de 390 m est divisée en treize sections de 30 m de longueur. L'effet courone est pris en considération en connectant son modèle aux extrémités de ces sections. Les tronçons de lignes sont représentés par des modèles polyphasés en considérant la nature distribuée de ses paramètres et leur dépendance en fonction de la fréquence. Le modèle JMARTI est choisi pour ce cas d'étude. Les données nécessaires au modèle de la ligne sont la configuration géométrique des conducteurs, leurs diamètres, géométries des faisceaux, résistance en courant continu, etc (Tableau 4.1 et Figure 4.1).

La figure 4.1 représente à la fois la géométrie de la ligne et le modèle du pylône. Les distances de la configuration de cette ligne sont indiquées sur la figure, on souligne que les valeurs entre parenthèses représentent les hauteurs des conducteurs au milieu de la portée. La distance entre les conducteurs élémentaires constituant une phase est égale à 50 cm. [4.1]

Tableau 4.1 Caractéristiques des conducteurs de la ligne [4.1]

	Type	R_{ext} (mm)	R_0 (Ω /km)	Nombre de fils	Diamètre d'un fil (mm)	Distance entre conducteurs élémentaires (cm)
Conducteur de phase	Almélec 2 x 570 mm ²	15,525	0,0523	61	3,54	50
Câble de garde	Fibre optique – OPGW 185 mm ²	9,92	0,185	---	---	---

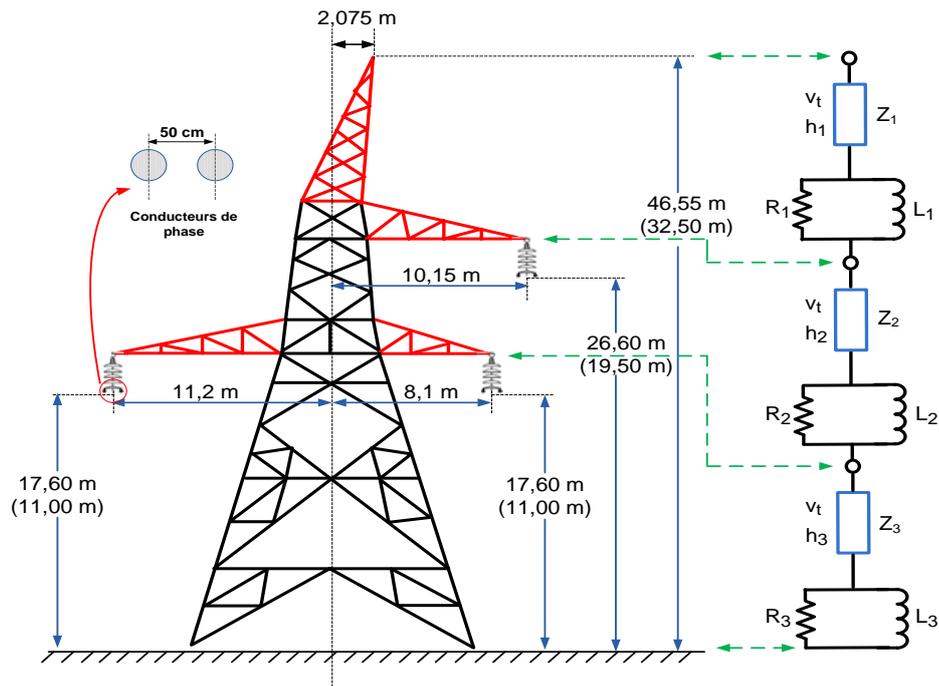


Figure 4.1 Modèle multi-étages du pylône

Les paramètres de la ligne sont calculés par le sous-programme LINE CONSTANTS de l'EMTP.

La concaténation des conducteurs de phases et de garde (Figure 4.2) est prise en considération dans la modélisation de la ligne de transmission.

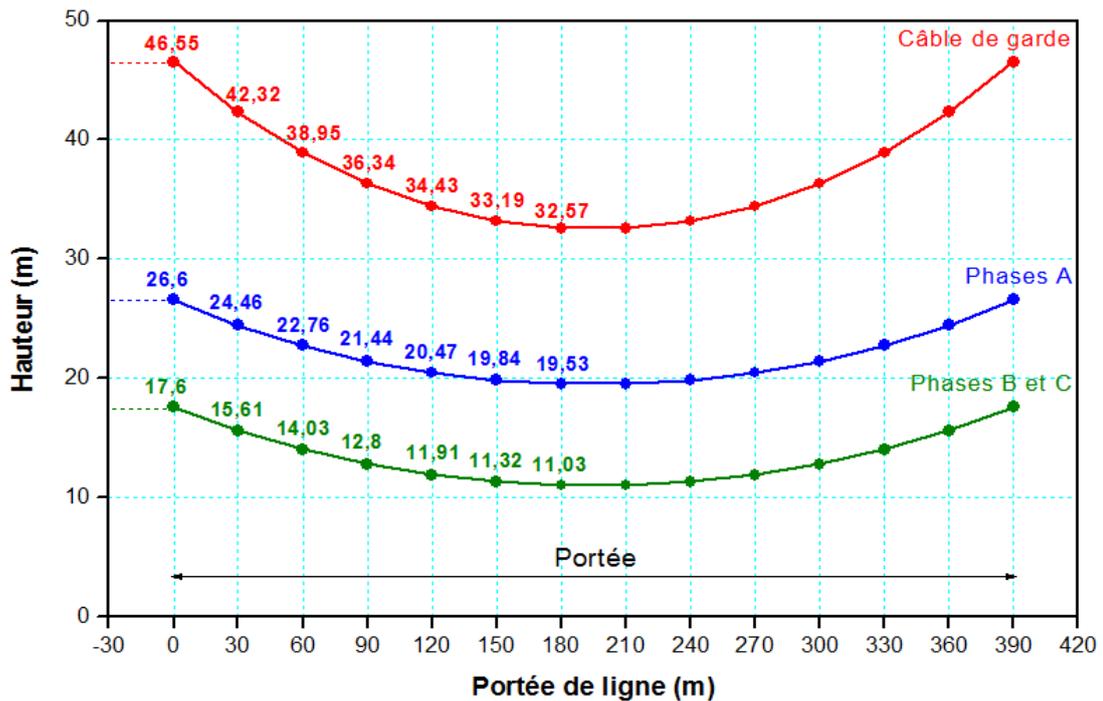


Figure 4.2 Concaténation des conducteurs

4.2.1.2. Les pylônes

Un coup de foudre direct sur un conducteur de phase est très rare et la plupart des coups de foudre atteignent le sommet des pylônes de transmission. En conséquence, dans le calcul de la foudre, des modèles de pylônes ont été développés en utilisant des approches théoriques et/ou expérimentales. Le modèle des pylônes de transmission pour les simulations de surtension de foudre a fait l'objet de nombreuses discussions [4.2- 4.5] dans lesquelles il peut aller de simples résistances ou inductances localisées à des circuits compliqués. L'utilisation d'un élément localisé n'est valide que si le temps du front de l'onde du courant est important par rapport au temps de propagation de l'onde dans le pylône. Ainsi, pour une onde à front raide, le pylône doit être modélisé par des éléments à paramètre distribué [4.2]. Un des modèles qui tient compte de cet effet est celui proposé par Ishii et al. Ce modèle, à plusieurs étages, est développé sur la base de la mesure de la réponse transitoire du pylône de transmission en considérant un coup de foudre vertical. Il est constitué de lignes à paramètres distribués représentant l'impédance du pylône et de circuits R-L parallèles représentant l'atténuation de l'onde progressive le long de pylône [4.3]. Dans le présent travail, ce modèle est adopté et est composé de trois sections qui représentent les parties entre les bras du pylône (Figure 4.1). Chaque section est modélisée par une ligne monophasée sans perte en série avec un filtre R-L, il est utilisé pour atténuer les ondes transitoires. Afin de pouvoir utiliser ce modèle, on a besoin d'introduire pour la ligne monophasée la vitesse de propagation du courant, généralement de l'ordre 300 m/ μ s et les impédances Z_1 , Z_2 et Z_3 prises égales à 220 Ω , 220 Ω , et 150 Ω respectivement. Les paramètres des éléments des filtres peuvent être déterminés de la manière suivante [4.2, 4.3, 4.4]:

$$R_i = \frac{-2Z_i \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2} h_i, \quad i = 1, 2 \quad (4.1)$$

$$R_3 = -2Z_i \ln \sqrt{\gamma} \quad (4.2)$$

$$L_i = \frac{\alpha R_i 2H}{V_t}, \quad i = 1, 3 \quad (4.3)$$

$$H = \sum_{i=1}^3 h_i \quad (4.4)$$

avec :

R_i : Les résistances des tronçons en [Ω] ;

L_i : Les inductances des tronçons en [H] ;

V_t : La vitesse de propagation [m/s] ;

α : Le coefficient d'amortissement de l'inductance. Il est généralement pris égal à l'unité;

γ : Le coefficient d'atténuation de la résistance, sa valeur peut être prise égale à 0.8;

H : La hauteur totale du pylône [m] ;

h_i : Les hauteurs des tronçons du pylône.

4.2.1.3. Les prises de terre

Le modèle de la résistance des pieds du pylône est l'un des principaux paramètres qui influent sur le taux d'amorçage. C'est également un paramètre important pour la limitation des occurrences des surtensions à front rapide, il existe plusieurs types de modèles pour la résistance des pieds du pylône. Les plus utilisés sont les modèles simples et non-linéaires. Le modèle simple propose soit un circuit parallèle formé d'une branche contenant une résistance en série avec une inductance et une branche contenant une capacité soit simplement une résistance constante. Le modèle de résistance non-linéaire considère l'ionisation du sol pendant la décharge de foudre [4.5].

Un modèle précis de l'impédance de mise à la terre doit, donc, tenir compte de ce phénomène. Il est admis que la valeur de la résistance est plus grande pour les petits courants de foudre, et sa variation par rapport aux valeurs de courant faible et de basse fréquence n'est significative que pour une résistivité importante du sol. Lorsque l'effet d'ionisation du sol est incorporé. L'impédance de mise à la terre est non-linéaire [1.4, 4.6]. Elle est donnée par:

$$R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (4.5)$$

Étant :

R_0 : La résistance de la terre à faible courant et à faible fréquence (environ 20 Ω) ;

I_g : La valeur seuil du courant suffisant pour commencer l'ionisation du sol (A) ;

I : Le courant de foudre à travers la résistance (A).

L'expression du courant d'ionisation I_g est donnée par :

$$I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2} \quad (4.6)$$

avec :

ρ : La résistivité de sol ($\Omega.m$) ;

E_0 : Le champ d'ionisation du sol (de 300 à 400 kV/m). [4.7]

Dans ce modèle la résistance des pieds de pylône est représentée par une résistance non-linéaire type-91 contrôlée à travers l'interface MODELS dans laquelle les équations 4.5 et 4.6 sont implantées. Le signal du courant est passé de l'EMTP à la section de contrôle MODELS qui retournera à son tour la valeur de la résistance (voir figure 4.3).

La figure 4.4 présente la caractéristique de la résistance de terre en fonction de la décharge du courant de foudre.

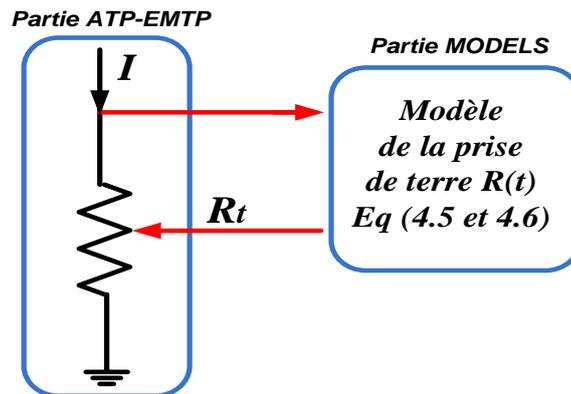


Figure 4.3 Modèle de la prise de terre des pieds de pylône

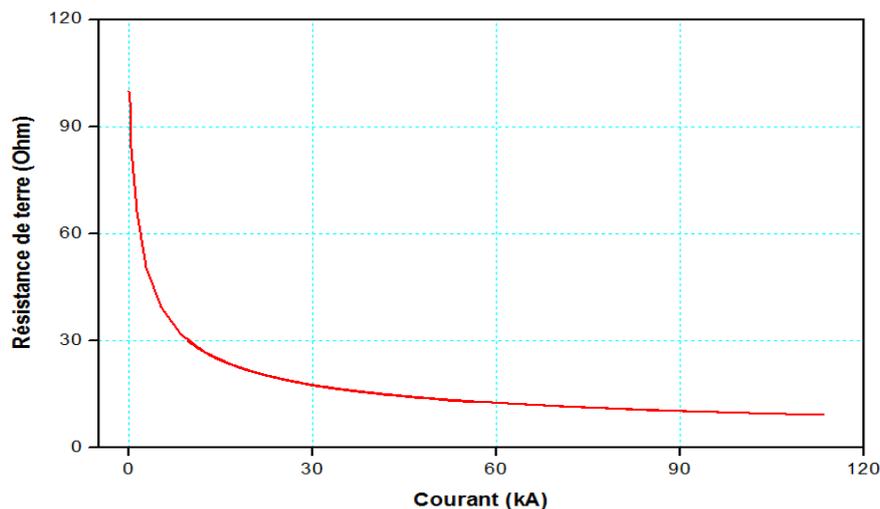


Figure 4.4 Caractéristique non-linéaire de la prise de terre

4.2.1.4. Les isolateurs

Les isolateurs en verre trompé ont pour fonction d'assurer l'isolement des conducteurs sous tension par rapport à des masses qui sont aussi chargées du rôle de support.

Les caractéristiques physiques de l'isolateur utilisé (U160) dans notre système sont présentées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Caractéristiques physique de l'isolateur utilisé [4.1]

	Langueur de la chaine d'isolateur (m)	Nombre d'unités	Pas (m)	Ligne de fuite (m)	Tension de tenue au choc de foudre (kV)	Tension de tenue à fréquence industrielle (kV)
Chaîne d'isolateur	5,6	35	0,16	14	1425	520

Lorsqu'un coup de foudre tombe sur un pylône, une surtension est générée et circulée le long du pylône. L'isolateur contourne si cette tension transitoire dépasse son niveau de tenue. Le mécanisme de contournement des isolateurs est très complexe et sa modélisation est très difficile. Elle requiert une attention particulière. Dans ce travail, le modèle proposé dans [4.8] est adopté. La partie concernant le mécanisme de contournement des isolateurs a été implanté dans l'ATP/EMTP en le représentant par un interrupteur contrôlé à travers l'interface MODELS.

Ce modèle est basé sur la représentation de la propagation de l'arc. Il a été démontré que le contournement des isolateurs comporte trois étapes successives: l'apparition de la couronne, la propagation des streamers et la propagation de l'arc dans les trois stades [1.4, 4.9, 4.10]. Dans ce modèle le temps de contournement est donné par :

$$t_c = t_i + t_s + t_l \quad (4.7)$$

où :

t_i : Temps avant le début de streamer. Il peut être négligé pour des raisons pratiques ;

t_s : Temps de propagation de streamer, il est supposé qu'il atteint l'électrode positif lorsque le champ moyen dans l'isolateur dépasse la valeur moyenne de 5 kV/cm ;

t_l : Temps de l'arc de contournement.

L'arc commence à l'instant t_s . Le développement de l'arc est calculé pas à pas avec les formules de la vitesse de l'arc v en utilisant la formule suivante [4.8]:

$$v = \frac{dL}{dt} = k_1 \cdot U^2 / (D - L) + k_2 \cdot C \cdot U^2 \cdot v \cdot \frac{L}{[D \cdot (D - L)]} \quad (4.8)$$

k_1, k_2 : Constantes dont les valeurs sont égales à $2 \cdot 10^{-7}$ ($\text{m}^2/\text{V}^2 \cdot \text{sec}$) et $3 \cdot 10^{-3}$ ($\text{m}^2/\text{V}^2 \cdot \text{A} \cdot \text{sec}$) respectivement ;

D, L : Correspondent à la longueur de l'isolateur et à la longueur de l'arc respectivement ;

U : La valeur absolue de la tension actuelle de l'isolateur ;

C : La capacité de l'arc par rapport au sol, elle est prise égale à $5 \cdot 10^{-10}$ F/m.

Si la vitesse de l'arc v est obtenue à l'instant t , la longueur de l'arc L à l'instant $t + \Delta t$ est calculée comme suit :

$$L(t + \Delta t) = L(t) + v \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

Le calcul continue jusqu'à ce que la longueur de l'arc atteigne la longueur de l'isolateur ou que la tension appliquée à ses bornes devienne inférieure à la tension minimale V_{min} pour maintenir la décharge. Si la tension appliquée devient inférieure à V_{min} pendant le développement de l'arc, on considère que l'arc s'étouffe et à ce moment là il n'y a aucun enregistrement de contournement.

La tension minimale V_{min} est exprimée avec la formule suivante :

$$V_{min} = E_0 \cdot (D - L) \quad (4.10)$$

E_0 : Est le champ moyen de l'isolateur (0,4 MV/m).

La méthode décrite permet de simuler le contournement des isolateurs avec n'importe quelle onde impulsionnelle, et également de compter le nombre de contournements et de défauts survenant sur le système subissant un coup de foudre.

Le calcul du contournement est effectué à travers ce modèle en utilisant le langage MODELS de l'ATP-EMTP comme il est montré sur la figure 4.5. A l'étape de l'intégration, les potentiels U_p et U_n aux bornes du commutateur S sont transmis de l'EMTP à MODELS et la ddp ($U_p - U_n$) est calculé dans l'environnement MODELS.

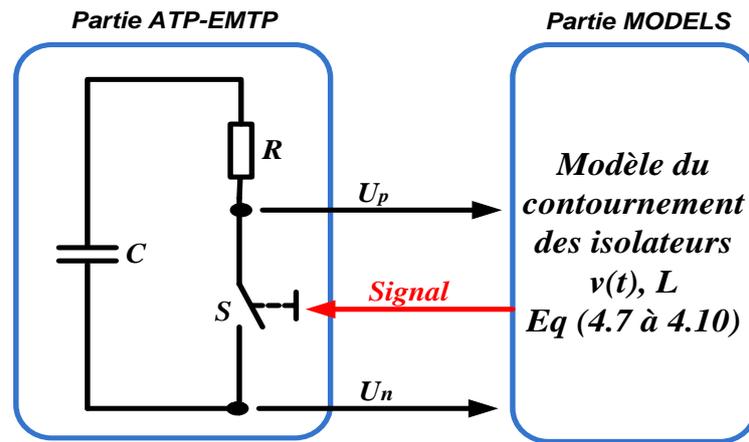


Figure 4.5 Implémentation ATP-EMTP du modèle de l'isolateur

Au moment où la longueur de l'arc L atteint la longueur de l'isolateur D , un signal de fermeture passé de MODELS à l'interrupteur S indiquant le lieu du contournement et par suite son nombre est incrémenté d'une unité.

Le premier arc apparaissant lors du contournement est représenté dans ce modèle par la résistance linéaire R [4.10, 4.11].

4.2.1.5. Effet couronne

L'effet couronne se produit sur toutes les lignes soumises à une surtension dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, ≈ 30 kV/cm), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse [1.10].

L'effet couronne entraîne une augmentation de la capacité de la ligne due à l'ionisation de l'air autour du conducteur. Cet effet apparaît à la fois entre phases et entre phase et terre.

L'apparition de l'effet couronne joue un rôle important dans l'étude de la propagation des surtensions sur les lignes de transmission du fait qu'il participe positivement dans l'atténuation et la déformation de ces surtensions.

L'effet couronne est incorporé dans le modèle de la ligne à chaque 30 m par le circuit équivalent présenté sur la figure 4.6, dans lequel les diodes idéales sont utilisées pour simuler l'apparition de l'effet couronne.

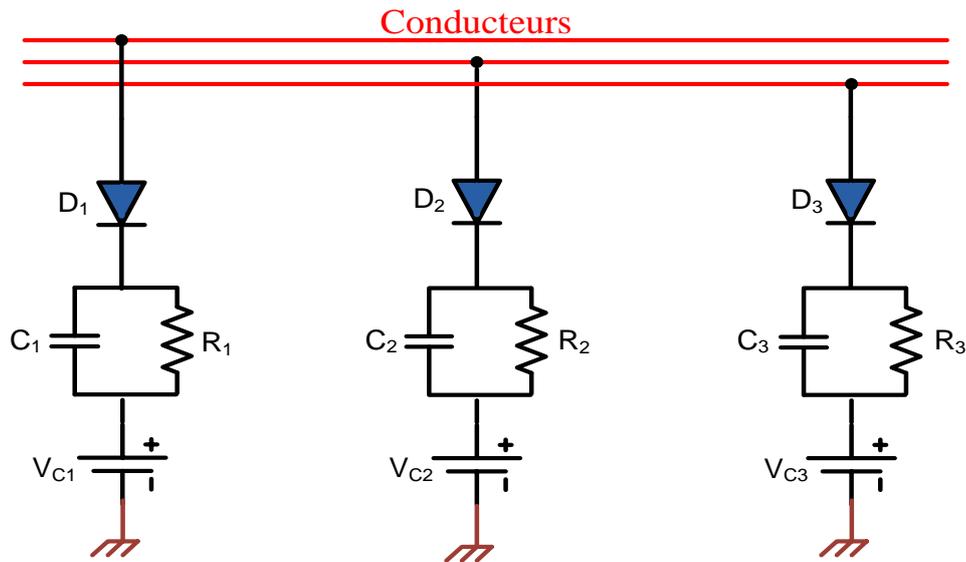


Figure 4.6 Modèle représentant l'effet couronne [4.12]

Les valeurs de C_i (nF/m), R_i ($M\Omega$) et V_c (kV) sont obtenues selon l'équation (4.11) [4.12], k_c est ajusté pour obtenir un modèle de propagation le plus proche possible de celui recommandé par [4.12]. Dans ce travail, la valeur de k_c est prise égale à 0,6. Ce modèle est connecté aux extrémités des sections représentant les portées, ses paramètres sont déterminés en utilisant les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_c = 23,8 \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0,67}{r^{0,4}}\right) \cdot \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \\ R_i = 60 \text{ } M\Omega \\ C_i = k_c \frac{1}{18 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \end{cases} \quad (4.11)$$

où : r et h sont le rayon et la hauteur du conducteur respectivement, en cm ;

V_c : Tension de l'apparition couronne ; C_i : Capacité couronne.

4.2.2. Modélisation des éléments du poste de transformation

Pour les surtensions de foudre, les transformateurs de courant, de tension et de puissance sont modélisés comme des capacités locales [1.3, 1.5, 4.13]. Les valeurs adoptées sont respectivement 500 pF pour les transformateurs de courant et de tension et de 3000 pF pour les transformateurs de puissance. Les disjoncteurs sont représentés par des interrupteurs contrôlés en temps. Les jeux de barre sont représentés par un modèle de

ligne calculé avec 'LINE CONSTANT' de l'EMTP [1.11].

En ce qui concerne le parafoudre ZnO, de nombreux travaux l'ont représenté avec le modèle conventionnel de résistance non-linéaire disponible dans l'EMTP [2.6, 1.3]. Cependant, une telle pratique ne sera pas appropriée pour les études de foudre en raison de leurs caractéristiques dynamiques [4.13, 4.14].

Dans le présent travail, un modèle dépendant de la fréquence (Figure 4.7) proposé par [4.14] est utilisé, est une version modifiée du modèle de IEEE.

Sur la base des techniques d'optimisation de l'algorithme génétique proposées dans [4.15], les paramètres du modèle du circuit équivalent du parafoudre ont été déterminés pour les ondes à front rapide. La méthode a été appliquée à un parafoudre de 336 kV utilisé dans le poste [4.16]. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.3. Les éléments non linéaires A_0 et A_1 sont représentés par le modèle de la résistance non-linéaire disponible dans l'EMTP et ajusté suivant la procédure détaillé dans [4.17].

La figure 4.8 donne la caractéristique tension-courant du parafoudre ZnO considéré dans les simulations.

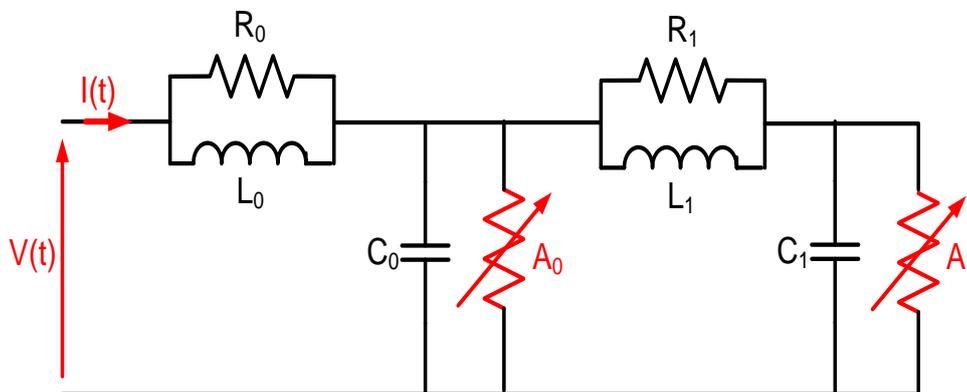


Figure 4.7 Modèle IEEE modifié du parafoudre

Tableau 4.3 Identification des paramètres du modèle du parafoudre

R_0 (Ω)	R_1 (Ω)	L_0 (μH)	L_1 (μH)	C_0 (pF)	C_1 (pF)
450	292,5	0,9	24	11,00	11,2

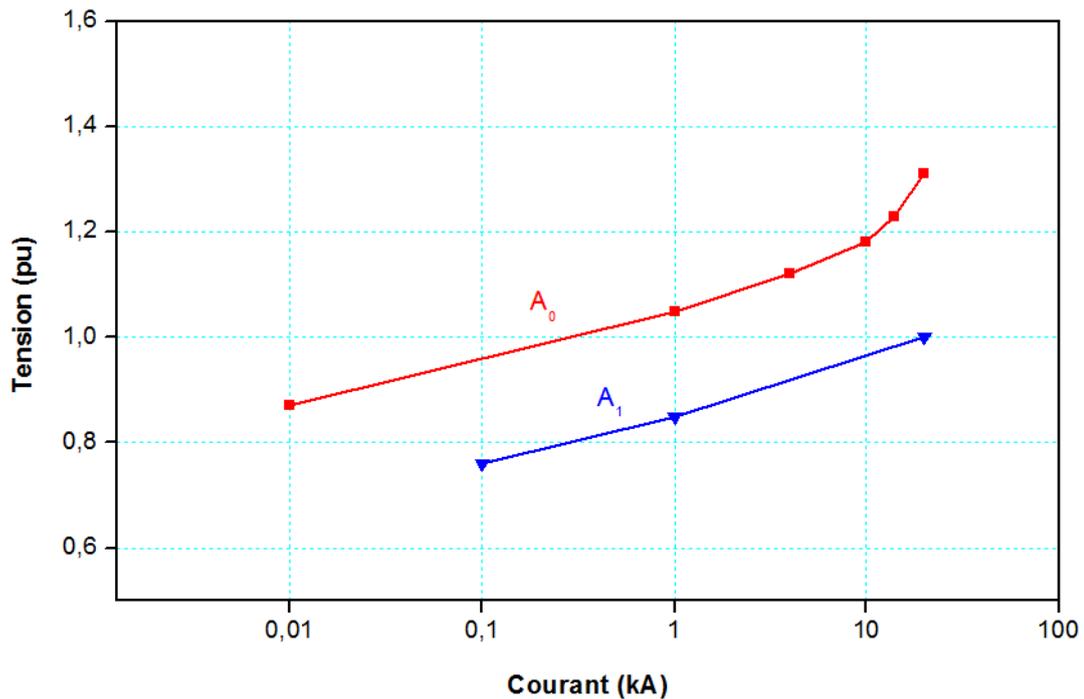


Figure 4.8 Caractéristique tension-courant du parafoudre

4.2.3. Le modèle électro-géométrique

Le modèle électro-géométrique (MEG) est composé d'un ensemble d'outils de décision qui permettent de calculer la probabilité qu'un coup de foudre tombant sur une ligne de transmission aérienne. En outre, il détermine le point d'impact pour le stade final du coup de foudre. Plusieurs approches ont été utilisées au cours des dernières décennies. Le modèle présenté dans cette section est une approximation hybride incluant l'approche traditionnelle présentée par IEEE et une interprétation sphérique en 3D pour la décision finale [1.7].

L'analyse est commencée en prenant en considération une portée de ligne, puis on généralise l'étude sur toute la ligne. Lors d'un événement de foudre, la première décision prise par le modèle électro-géométrique est le point d'impact du coup de foudre. Par conséquent, le modèle doit décider si le coup de foudre est dirigé vers les pylônes de transmission, vers la portée de ligne ou se termine sur la terre. Pour prendre cette décision, des zones d'attraction pour les conducteurs et pour la terre sont imposées ; elles sont déterminées en se basant sur le rayon théorique qui est en fonction de l'amplitude du courant de foudre.

Les expressions utilisées pour calculer les rayons théoriques pour déterminer les distances d'amorçage sont [1.7]:

$$r_c = \alpha I^\gamma \quad , \quad r_g = \beta I^\delta \quad (4.12)$$

où α , β , γ et δ sont des constantes qui dépendent de l'objet et I est le courant de crête de la foudre ;

r_c : est le rayon théorique créé par le champ autour des conducteurs des phases et le câble de garde en [m] ;

r_g : est le rayon théorique créé par le champ du plan horizontal du sol en [m] ;

I : Amplitude du courant de coup de foudre en [kA].

Le tableau 4.4 résume les expressions les plus utilisées dans la littérature.

Tableau 4.4 Expressions pour les distances d'amorçage [1.7]

Auteur	Distance d'amorçage au conducteur de phase et de câble garde (m)	Distance d'amorçage au sol (m)
Wagner [4.18]	$r_c = 14,2 I^{0,42}$	$r_g = 14,2 I^{0,42}$
Young [4.19]	$r_c = 27,0 I^{0,32}$, pour $h < 18$ m $r_c = \frac{444}{462-h} 27,0 I^{0,32}$, pour $h > 18$ m	$r_g = 27,0 I^{0,32}$
Brown and Whitehead [4.20]	$r_c = 7,1 I^{0,75}$	$r_g = 6,4 I^{0,75}$
Love [4.21]	$r_c = 10 I^{0,65}$	$r_g = 10 I^{0,65}$
Anderson and IEEE-1985 [1.8][4.22]	$r_c = 8,0 I^{0,65}$	$r_g = 8,0 \beta I^{0,65} \begin{cases} \beta = 0,64 \text{ for UHV lines} \\ \beta = 0,8 \text{ for EHV lines} \\ \beta = 1 \text{ for others} \end{cases}$
IEEE Std. 1243 [4.23]	$r_c = 10 I^{0,65}$	$r_g = [3,6 + 1,7 \ln(43 - h)] I^{0,65}$ pour $h < 40$ m $r_g = 5,5 I^{0,65}$ pour $h > 40$ m
Mousa and IEEE-1995 Substations Committee [4.24][4.25]	$r_c = 8,0 I^{0,65}$	$r_g = 8,0 I^{0,65}$
Eriksson [4.26]	$r_c = 0,67 h^{0,6} I^{0,75}$	None

Dans ce travail, les équations présentées par Mousa et IEEE-1995 [4.24, 4.25] ont été adoptées.

Les arcs de cercle de rayon r_c sont créés des 3 points dans la portée : les deux extrémités de la portée et le centre. Ensuite un plan horizontal est tracé à une distance r_g à la terre. Les intervalles créés entre les intersections de ces arcs de cercle, déterminent où les coups de foudre se termineront (ceux qui se terminent sur le conducteur de phase, ceux qui se terminent sur les câbles de garde et ceux qui se terminent sur la terre) (Figure 4.9).

En considérant que tous les coups de foudre sont verticaux, la distance d'exposition pour les conducteurs de phase est ' D_c ' et celle pour les câbles de garde est ' D_g '.

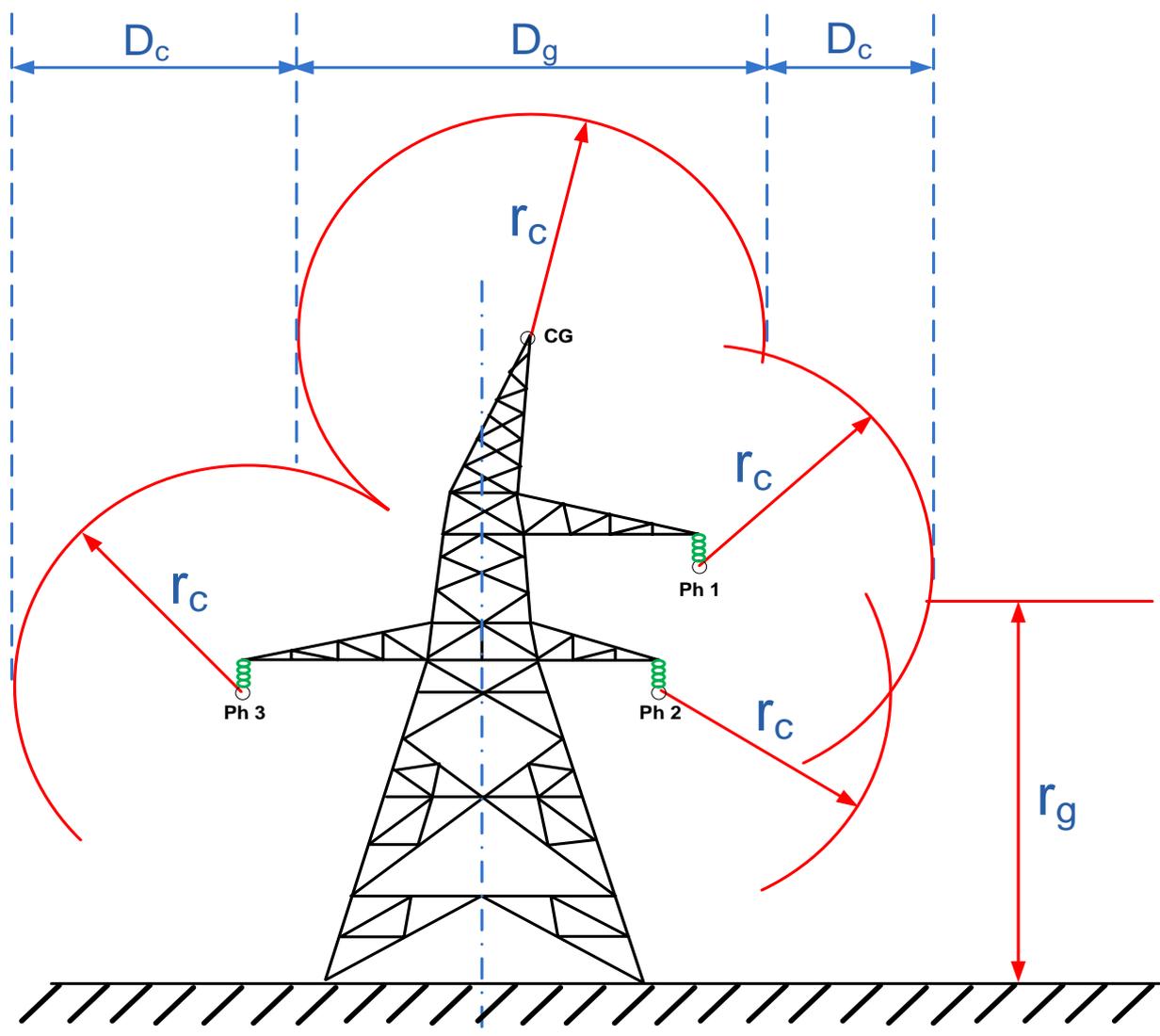


Figure 4.9 Modèle Electro-géométrique - Vue en coupe

Une fois que les rayons théoriques sont calculés, les zones d'attraction sont définies par des sphères pour chaque point où le coup de foudre tombe. Trois situations peuvent apparaître :

A) Les sphères créées au niveau des pylônes (phases A, B, C et aux câbles de garde) et celles créées au milieu de la portée ne se croisent pas quelque soit la position du plan horizontal par rapport à ces sphères.

B) Les sphères créées au niveau des pylônes (phases A, B, C et aux câbles de garde) et au milieu de la portée se croisent avec le plan horizontal créé à une distance r_g du sol.

C) Les sphères créées au niveau des pylônes (phases A, B, C et aux câbles de garde) et au milieu de la portée se croisent au-dessus du plan horizontal créé à une distance r_g du sol.

Chacune de ces situations est représentée sur les figures 4.10, 4.11 et 4.12. En plus, une solution géométrique est proposée pour chaque cas. Étant donné que l'information géométrique est vaste pour chaque cas, trois façons pour résoudre le problème peuvent être trouvées.

Pour le premier cas, les différents paramètres de la méthode sont calculés en utilisant les équations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{t1} = Tw1 + \sqrt{(r_c)^2 - (r_g - T_h)^2} \\ D_{t2} = Sc + \sqrt{(r_c)^2 - (r_g - S_h)^2} \\ D_{sp1} = Sc - \sqrt{(r_c)^2 - (r_g - S_h)^2} \\ D_{sp2} = Tw2 - \sqrt{(r_c)^2 - (r_g - T_h)^2} \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Les paramètres du deuxième cas sont déterminés avec les équations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{t1} = D_{sp1} = Tw1 + \sqrt{(r_c)^2 - (r_g - T_h)^2} \\ D_{t2} = D_{sp2} = Sc + \sqrt{(r_c)^2 - (r_g - S_h)^2} \end{array} \right. \quad (4.14)$$

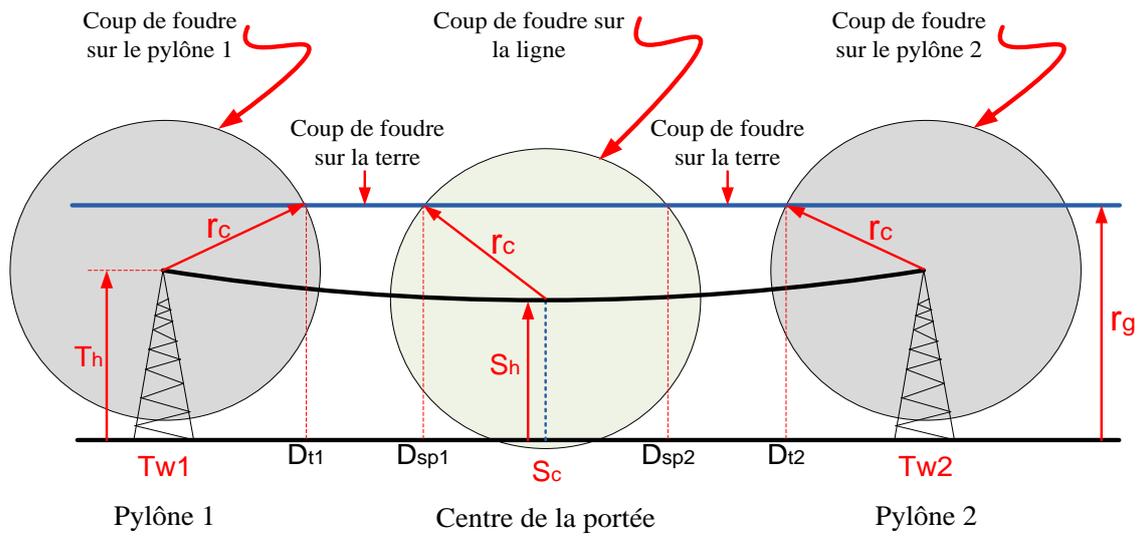


Figure 4.10 Vue de profil du modèle électro-géométrique (cas 1)

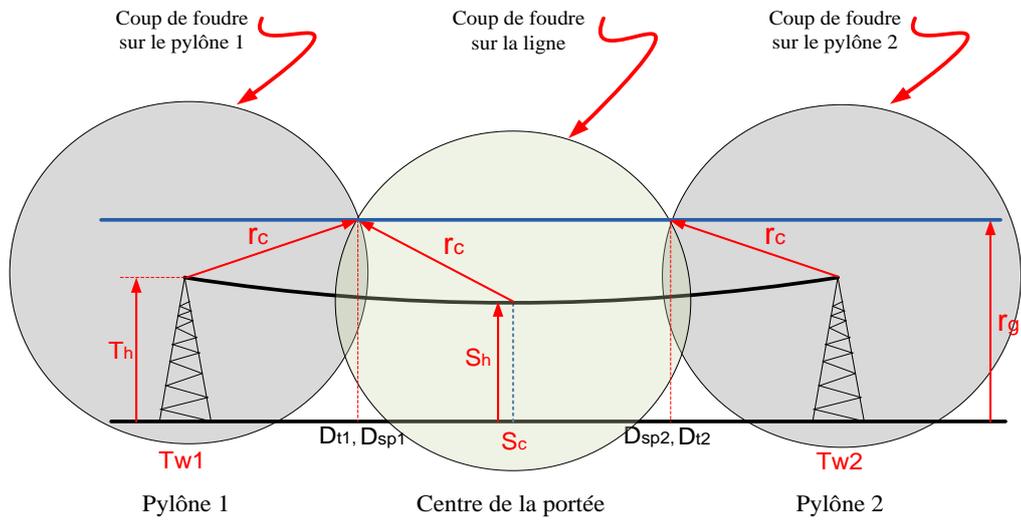


Figure 4.11 Vue de profil du modèle électro-géométrique (cas 2)

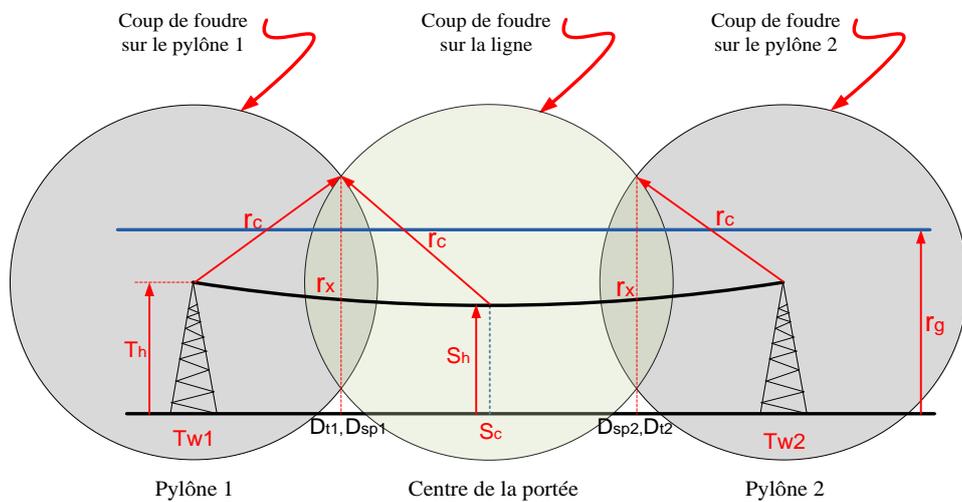


Figure 4.12 Vue de profil du modèle électro-géométrique (cas 3)

Le troisième cas est un peu différent des deux premiers, car il nécessite la détermination de la valeur de r_x , pour cet effet on suit la procédure suivante :

$$\begin{cases} D_{t1} = D_{sp1} = Tw1 + \sqrt{(r_c)^2 - (r_x - T_h)^2} \\ D_{t2} = D_{sp2} = Sc + \sqrt{(r_c)^2 - (r_x - S_h)^2} \end{cases} \quad (4.15)$$

On utilise les équations des deux cercles pour déterminer la valeur de (r_x) :

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 + A_1x_1 + B_1y_1 + C_1 = 0 \\ x_2^2 + y_2^2 + A_2x_2 + B_2y_2 + C_2 = 0 \end{cases} \quad (4.16)$$

Avec :

$$A_1 = -2 * Tw1$$

$$B_1 = -2 * T_h$$

$$C_1 = Tw1^2 + T_h^2 - r_c^2$$

$$A_2 = -2 * Sc$$

$$B_2 = -2 * S_h$$

$$C_2 = Sc^2 + S_h^2 - r_c^2$$

Pour calculer la valeur de r_x , on prend les deux équations des sphères pour $x_1 = x_2$ la valeur maximale du y est égale à r_x .

Le point d'impact possible du coup de foudre est :

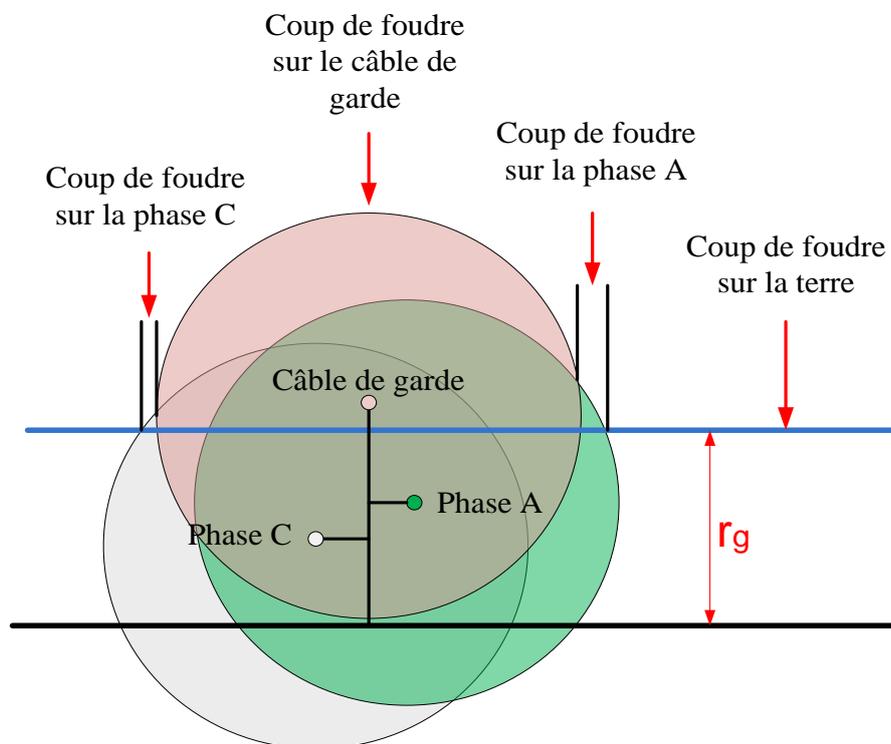
- ($D_{t1} < y < D_{sp1}$) et ($D_{sp2} < y < D_{t2}$) : Le coup de foudre tombe sur la terre. (situation a)
- ($y \leq D_{t1}$) et ($y \geq D_{t2}$) : Le coup de foudre tombe sur les pylônes.
- ($D_{sp1} < y < D_{sp2}$) : Le coup de foudre tombe sur les conducteurs de la ligne.
- sinon : Le coup de foudre tombe sur la terre.

Dès que le premier ensemble de décision a été pris et que tous les cas qui tombent sur le sol sont rejetés, un deuxième filtre de décision est effectué. Selon la direction du coup de foudre vers les pylônes ou vers la ligne, quatre nouvelles possibilités sont considérées pour l'étape finale du point d'impact du coup de foudre.

- A) Coup de foudre tombe sur le câble de garde.
- B) Coup de foudre tombe sur le conducteur de la phase A.
- C) Coup de foudre tombe sur le conducteur de la phase C.
- D) Coup de foudre tombe sur la terre.

La possibilité qu'un coup de foudre atteigne le conducteur de la phase B est complètement éliminée en raison de sa position dans le pylône (symétriquement placé entre la phase A et la phase C et en dessous de A). Traditionnellement, l'étape finale du point d'impact du coup de foudre est résolue à l'aide d'un plan de décision 2D comme celui de la figure 4.13.

La méthode considère des cercles représentant les distances d'attraction des coups de foudre et faisant varier leurs diamètres en fonction de l'intensité du courant de foudre. Bien que la méthode soit fonctionnelle, les zones désignées, lorsqu'un coup de foudre est dirigé vers les conducteurs, ne sont pas planes mais plutôt sphériques.



a- Vue du profil des phases

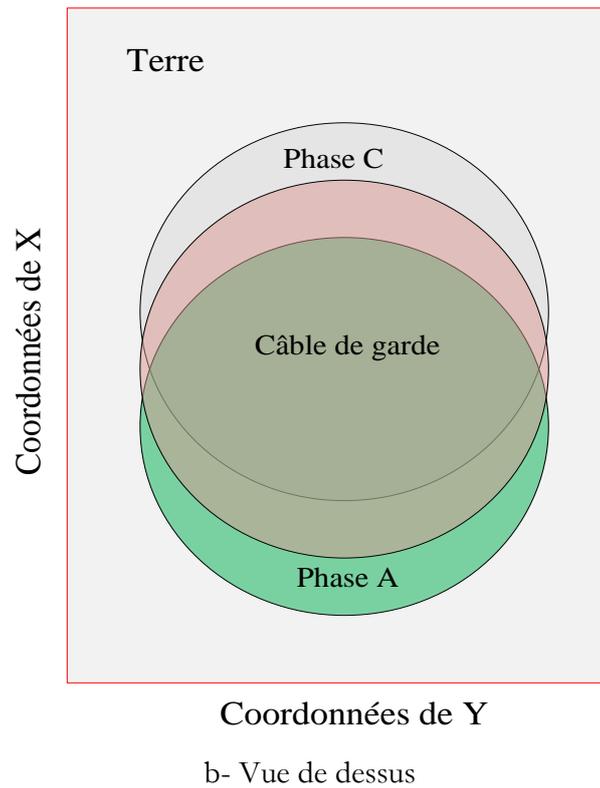


Figure 4.13 Plan de décision finale du coup de foudre

Si la décision du stade final du coup de foudre est basée sur la figure 4.13.a, il y a une probabilité de considérer qu'un coup de foudre se dirige vers un conducteur, alors qu'il tombe réellement sur la terre. Cela est dû au fait que le coup de foudre ne se termine pas sur une zone carrée mais plutôt sur une zone circulaire (Figure 4.13.b). Dans ce cas, c'est la zone occupée par la partie de la sphère située au-dessus du plan horizontal qui doit être considérée (Figure 4.14).

L'idée principale est de considérer que les coordonnées du point d'impact du coup de foudre sont placées dans le plan (x, y) formé par r_g . A partir de cela, un nouveau rayon (R_n) doit être calculé pour chacune des sphères pour les pylônes et pour le centre de la portée. Ce rayon est calculé selon:

$$R_n = \sqrt{(R_{sph})^2 - (r_g - T_h)^2} \quad (4.17)$$

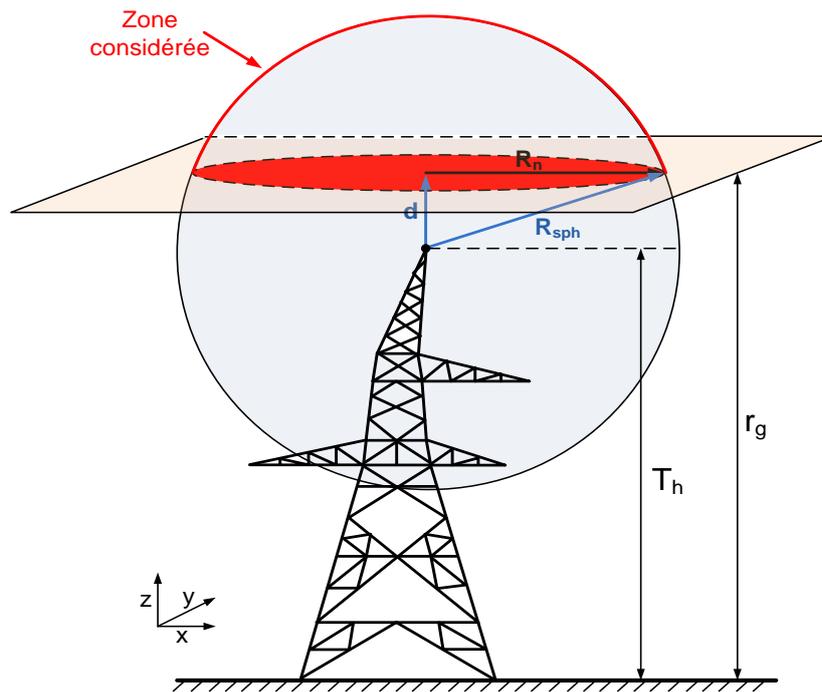


Figure 4.14 Zone d'attraction à considérer

Enfin, une matrice contenant toutes les informations résultantes du modèle électro-géométrique est construite. Les données qui y sont enregistrées comprennent : le nombre de cas étudiés, les coordonnées du point d'impact selon le profil x , les coordonnées du point d'impact selon le profil y , l'amplitude du courant de foudre, angles des tensions de service, temps du front du courant et le temps du demi-queue.

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé le système étudié pour simuler son fonctionnement dynamique. Nous nous sommes intéressés, alors, à la représentation des différents éléments du poste de transformation y compris la ligne de transmission qui y est connectée en utilisant l'EMTP. Par ailleurs, nous avons présenté, discuté et analysé la procédure complète pour englober le phénomène dans sa complexité où il est conclu qu'avant de pouvoir atteindre le stade de la formulation statistique de ce processus aléatoire (stochastique), celui-ci doit être "phénoménologiquement connu". C'est dans cet ordre d'idée que le caractère aléatoire est pris en considération dans le développement de cette application sous environnement MATLAB en se basant sur l'utilisation des méthodes statistiques.

5.1. Introduction

La méthode de Monte-Carlo a vu son essor à partir de la fin de la seconde guerre mondiale, essentiellement dans le cadre du projet américain "Manhattan" concernant le développement de l'arme nucléaire. Cette époque correspond également à la construction des premiers "ordinateurs". Ce projet a été classé "secret défense", il est difficile de savoir exactement qui parmi ses pionniers : Von Neumann, Ulam, Metropolis a proposé le nom de "Monte Carlo". Quoi qu'il en soit, ce terme fait référence aux jeux de hasard : la capitale de la principauté de Monaco. Le terme méthode de Monte-Carlo désigne une famille de méthodes algorithmiques visant à calculer une valeur numérique approchée en utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. D'un point de vue purement mathématique, une méthode de Monte-Carlo peut servir au calcul d'intégrales (simples ou multiples) et à la résolution des équations aux dérivées partielles, de systèmes linéaires et de problèmes d'optimisation. D'une manière plus globale, elle permet d'avancer toutes les possibilités liées à une observation, en quantifiant le risque associé (ou l'incertitude statistique). Pratiquement, ces techniques sont couramment utilisées dans divers domaines (Ingénierie, physique, finance...etc.). C'est une méthode d'évaluation itérative d'un modèle déterministe utilisant des ensembles de nombres aléatoires comme entrées [5.1].

Des nouvelles applications de la Méthode de Monte Carlo sont démontrées dans la modélisation des systèmes financiers, l'estimation du comportement de la transition de molécules organiques, la réaction chimique, la diffusion de particules, les phénomènes électrostatiques, la simulation cinétique de données biophysiques et biologiques et les pratiques de soins de santé.

Dans ce chapitre, nous allons donner quelques concepts et définitions nécessaires à l'utilisation de cette méthode et son adaptation au cas de la foudre.

5.2. Estimation d'une valeur inconnue

La plupart des travaux qui ont utilisé la méthode de Monte Carlo portent sur l'estimation de la valeur inconnue d'un paramètre d'une telle distribution. Dans ce contexte, le paramètre s'appelle un estimand. Les données disponibles comprendront un certain nombre de variables aléatoires observées, constituant l'échantillon. Le nombre d'observations dans l'échantillon s'appelle la taille de l'échantillon. Le lien entre l'échantillon et l'estimand est que ce dernier est un paramètre de la distribution des variables aléatoires constituant la première [5.2].

5.3. Événements aléatoires et probabilité

Un événement aléatoire est un événement qui a une chance de se produire, et la probabilité est une mesure numérique de cette chance. La probabilité est un nombre compris entre 0 et 1, les deux sont inclus; plus les valeurs sont élevées, plus les chances sont grandes. Un événement avec une probabilité nulle (effectivement) ne se produit jamais; par contre avec une probabilité d'unité l'événement est sûrement fait. On écrit: $P(A)$ pour la probabilité qu'un événement A se produise; $P(A+B+\dots)$ Pour la probabilité qu'au moins un des événements A, B, \dots se produise, $P(AB\dots)$ pour la probabilité que tous les événements A, B, \dots se produisent; et $P(A|B)$ pour la probabilité que l'événement A se produise lorsqu'on sait que l'événement B se produit. $P(A|B)$ est appelée la probabilité conditionnelle de A pour une donné B . Les deux axiomes les plus importants qui régissent la probabilité sont [5.2]:

$$P(A + B + \dots) \leq P(A) + P(B) + \dots \quad (5.1)$$

$$P(AB) = P(A|B) \cdot P(B) \quad (5.2)$$

Si seulement l'un des événements A, B, \dots peut se produire, ils sont appelés exclusifs et l'égalité est maintenue dans (5.1). Si au moins un des événements A, B, \dots doit se produire, elles sont dites exhaustives et la partie gauche de (5.1) est 1.

Si $P(A|B)=P(A)$, on dit que A et B sont indépendants: effectivement, la chance d'apparition de A n'est pas influencée par la survenue de B .

5.4. Fiabilité du système et analyse des risques par simulation de Monte Carlo

L'analyse de la fiabilité du système a suscité une discipline scientifique dans les années 1950, spécifiquement dans les années 1960, a été intégrée à l'évaluation des risques dans les années 1970 et a été reconnue comme un contributeur important à l'analyse des systèmes grâce aux vastes développements méthodologiques et aux applications pratiques dans les années 1980 et 1990.

L'analyse de la fiabilité du système vise à quantifier la probabilité de défaillance d'un système, grâce à un ensemble de méthodes formelles permettant d'étudier les limites incertaines entre le fonctionnement et la défaillance d'un système. Cela implique de répondre aux questions suivantes [5.3]:

Pourquoi les systèmes tombent en panne, par exemple, en utilisant les concepts de la physique de la fiabilité pour découvrir les causes et les mécanismes de la défaillance et identifier les conséquences;

- Comment développer des systèmes fiables, par exemple selon une conception basée sur la fiabilité;
- Comment mesurer et tester la fiabilité dans la conception, le fonctionnement et la gestion;
- Comment maintenir des systèmes fiables, par diagnostic de panne, pronostic, maintenance.

Pour un système donné, les réponses appropriées à ces questions nécessitent de résoudre les problèmes suivants [5.3]:

- La représentation et la modélisation du système;
- La quantification du modèle de système;
- La représentation, la propagation et la quantification de l'incertitude du comportement de système.

De nos jours, à son stade de maturité, l'analyse de la fiabilité des systèmes est toujours confrontée à ces défis, éventuellement accentués par la complexité croissante des systèmes.

Pour les systèmes complexes composés de plusieurs composants, il est important d'analyser les mécanismes de défaillance possibles et d'évaluer leurs probabilités. Souvent, chacun de ces systèmes est unique en sens qu'il n'existe pas de systèmes identiques (mêmes composants interconnectés de la même manière et fonctionnant dans les mêmes conditions) pour lesquels les données de défaillance ont été collectées; par conséquent, une analyse statistique des défaillances n'est pas possible [5.3].

De plus, ce n'est pas seulement la probabilité de défaillance du système qui présente l'intérêt globale, mais aussi les causes initiales et la combinaison d'événements qui peuvent y conduire.

La méthode technique pour aborder un problème de cette nature, où de nombreux événements interagissent pour produire d'autres événements, consiste à relier ces événements à l'aide de relations logiques simples et à construire de manière méthodique une structure logique qui représente le système. Ensuite, le modèle logique est résolu en termes quantitatifs pour fournir la probabilité de défaillance du système à partir des probabilités de défaillance de ses composants [5.3].

En fait, l'analyse de la fiabilité des systèmes complexes modernes implique une approche intégrée dans laquelle les éléments matériels, logiciels, organisationnels et humains sont traités dans un cadre combiné, ce qui explique leurs interdépendances dynamiques dans les tâches complexes liées à la production, à la maintenance et à la gestion des urgences. Pour faire face à une telle complexité d'un point de vue quantifiable, des méthodes informatiques sont préconisées afin de fournir un cadre permettant de simuler directement la réponse d'un système à une perturbation initiale, le matériel, les composants logiciels et l'équipe d'exploitation interagissant les uns avec les autres et avec l'environnement. Cela peut être réalisé en intégrant des modèles d'évolution de processus et de comportement d'opérateur humain dans des procédures Monte Carlo Simulation reproduisant l'occurrence stochastique de transitions système d'échec et de succès.

5.5. Domaines d'application de la méthode Monte Carlo

Les points collectivement cités ci-dessous illustrent comment une telle technique d'échantillonnage est exploitée pour résoudre des problèmes difficiles ou analyser des

systèmes complexes dans divers domaines de l'ingénierie et des sciences tel que [5.4]:

- Tests statistiques pour l'identité des distributions théoriques et empiriques des données expérimentales ;
- L'incertitude de mesure ;
- Les problèmes de disposition de lignes dynamiques ;
- Etude comparative de divers schémas de polarisation d'événement auto-cohérents pour des MOSFET à l'échelle nanométrique ;
- La formation de mésophase carbonée dans des grands ensembles d'hydrocarbures polyaromatiques
- Réduction de la variance en génie nucléaire ;
- Modèles stochastiques de processus physico-chimiques dans les réactions catalytiques - Auto-oscillations et ondes chimiques dans la réaction d'oxydation du CO ;
- La diffusion de particules dans diverses géométries et application à la chimie et à la biologie ;
- Simulation cinétique en biophysique et biologie des systèmes ;
- Détection des tumeurs du cancer du sein à l'aide de profils de rayons X dispersés.

5.6. Distribution des variables aléatoires

Souvent, le travail expérimental nécessite l'analyse de nombreux ensembles de données dérivés de la même manière. Pour chaque ensemble de données, il est possible de trouver une distribution théorique spécifique décrivant mieux l'échantillon. Une hypothèse de base dans ce type de travail est que si le mécanisme (ou l'expérience) pour générer les échantillons est le même, alors le type de distribution qui décrit les ensembles de données sera également le même.

Dans ce cas, la différence entre les ensembles sera capturée non pas en modifiant le type de la distribution, mais en modifiant ses paramètres [5.5].

Il existe certains avantages à déterminer si un type de distribution théorique convenant à plusieurs ensembles de données existe.

Au début, cela améliore l'ajustement, car les hypothèses concernant le mécanisme sous-

jaçant à l'expérience peuvent être vérifiées par rapport à plusieurs ensembles de données. Deuxièmement, il est possible d'étudier comment la variation des paramètres d'entrée influence les paramètres de la distribution théorique.

Dans certaines expériences, il pourrait être prouvé que les différences de conditions d'entrée entraînent une modification qualitative des distributions ajustées (le changement du type de distribution). Dans d'autres cas, la variation des conditions de saisie peut uniquement entraîner des modifications quantitatives de la production (des changements dans les paramètres de la distribution). Il est alors important d'étudier la signification statistique des différences quantitatives, c'est-à-dire de comparer la différence statistique des paramètres de distribution.

Dans certains cas, il peut ne pas être possible de trouver un seul type de distribution correspondant à tous les ensembles de données. Une option possible dans ces cas est de construire des distributions empiriques selon des techniques connues [5.6], et rechercher si les différences sont statistiquement significatives. Dans tout les cas, prouver que la différence observée entre les distributions théoriques ou entre les distributions empiriques n'est pas statistiquement significative, cela permet de fusionner des ensembles de données et de travailler sur une plus grande quantité de données, ce qui est indispensable pour obtenir des résultats statistiques plus précis. Cette tâche est similaire au test de stabilité dans une analyse de régression [5.7].

5.7. Distributions disponibles dans MATLAB

Une plate forme de fonctions de programme, écrite en environnement MATLAB, est créée pour exécuter les procédures statistiques. À l'heure actuelle, la plate forme permet aux utilisateurs de tester l'ajustement de 11 types de distributions sur l'ensemble des données. La plate forme permet également à l'utilisateur d'ajouter des types de distribution optionnels [5.4].

Une description des paramètres et des fonctions de densité de probabilité (FDP, en anglais : probability density function) des types de distribution incorporés est donnée dans les références [5.8, 5.9].

En outre, la fonction permet l'inclusion d'un nouveau type de distribution. Dans ce cas, les informations nécessaires que l'utilisateur doit fournir à l'entrée sont les

procédures permettant de trouver la fonction de densité cumulative (FDC, en anglais : cumulative density function), la FDP, la mesure du maximum de probabilité, la probabilité logarithmique négative, la moyenne, la variance et les méthodes de génération des vecteurs aléatoires à partir du type de distribution donné. La fonction détermine également la sortie de chaque type de distribution.

Les différents types de distribution utilisés dans cette étude sont résumés dans les paragraphes suivants :

- **Distribution Log normale** : En théorie des probabilités, une distribution log-normale est une distribution de probabilité continue d'une variable aléatoire dont le logarithme est normalement distribué.
- **Distribution uniforme** : Est la distribution de probabilité continue la plus simple, définie sur un intervalle borné. Elle est utilisée pour modéliser une variable répartie uniformément sur un ensemble borné.

Ces distributions sont représentées dans le tableau 5.1 suivant.

Tableau 5.1 Types de fonctions de distribution [5.4]

	Paramètres	Support	FDP
Distribution Log normal	$\mu \in (-\infty; +\infty), \sigma > 0$	$x \in (0; +\infty)$	$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Distribution Normal	$\mu, \sigma > 0$	$x \in (-\infty; +\infty)$	$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Distribution Uniform	$a, b \in (-\infty; +\infty)$	$a \leq x \leq b$	$f(x; a, b) = \frac{1}{b-a}$ For $a \leq x \leq b$ 0 For $x < a$ or $x > b$
Distribution exponentielle	$\lambda > 0$	$x \in [0; +\infty)$	$f(x; \lambda) = \lambda e^{-\lambda x}$ for $x \geq 0$ 0 for $x < 0$
Distribution Beta	$a > 0, \beta > 0$	$x \in [0; 1]$	$f(x; a, \beta) = \frac{x^{a-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(a, \beta)}$ Où $B(a, \beta)$ est la fonction beta
Distribution Gamma	$K > 0, \theta > 0$	$x \in [0; +\infty)$	$f(x; K, \theta) = x^{K-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta^K \Gamma(K)}$ Où $\Gamma(K)$ est la fonction gamma

5.8. Langages de programmation

La distribution de base qu'il faut savoir simuler numériquement est la loi uniforme sur $[0, 1]$. Tous les langages de programmation disposent d'un générateur de nombres au hasard dans $[0, 1]$, par exemple, en MATLAB le générateur est 'RAND'.

Quand on demande à un programme de générer des nombres aléatoires, il renvoie des nombres pris dans une liste. En général, cette dernière est suffisamment désordonnée et longue pour avoir un comportement similaire à celui d'une suite aléatoire. Dans le cas d'un programme écrit dans un langage de bas niveau (type C⁺⁺), l'utilisateur aura intérêt à construire lui-même une procédure de génération de nombres aléatoires.

La méthode de Monte-Carlo est souvent utilisée lorsque le modèle est complexe, non linéaire ou engage plusieurs paramètres incertains. Cette technique peut être utilisée pour développer un programme informatique dédié à l'évaluation des performances du système de protection contre la foudre. L'analyse de la surtension atmosphérique dans les postes électriques ou dans les lignes de transmission a toujours posé un problème pour déterminer l'amplitude du courant de foudre qui tombe sur l'objet protégé et provoque une surtension. Le développement d'un programme informatique pour représenter un algorithme qui déterminera l'amplitude mentionnée dans la même plage pour l'objet protégé entré est nécessaire. Le programme est basé sur une analyse statistique de Monte Carlo sur le système simulé en trois dimensions [5.4].

5.9. Application de la méthode Monte Carlo

La présente partie tente d'expliquer les principales étapes de l'étude statistique pour obtenir le point d'impact du dernier stade du coup de foudre, puis nous calculons le taux de contournement d'une ligne de transmission connectée au poste de transformation. Un total de 60000 cas a été considéré. Ces cas, après avoir été filtrés par le modèle électro-géométrique, seraient réduits à un total d'environ 9214 cas qui tombent sur la ligne de transmission. Dans ce qui suit, nous résumons les principales étapes de la procédure MATLAB/ATP développée dans cette thèse pour le calcul des surtensions de foudre dans le poste de transformation dont le circuit global a d'abord été implémenté dans l'ATP en utilisant les modèles mentionnés dans le chapitre 4.

5.9.1. Création des valeurs aléatoires

Pour initialiser l'analyse, plusieurs aspects doivent être pris en considération, tel que: l'environnement de la zone analysée, les caractéristiques géométriques du système électrique (pylône et câbles) et l'activité de l'atmosphère électrique dans la zone d'étude.

Afin de générer une situation proche à la réalité, plusieurs données devraient être statistiquement approximées. Tout d'abord, la ligne à étudier doit être sélectionnée et correctement modélisée. Une fois que le modèle est élaboré, un ensemble de coordonnées (x, y) doit être généré, les points créés correspondent à l'emplacement réel où le coup de foudre tombe. Étant donné que la zone sélectionnée doit être couverte d'une manière équilibrée, une distribution uniforme de valeurs est adoptée pour générer chaque valeur de x et y . La figure 5.1 présente la distribution normale des coordonnées (x, y) correspondant à la zone d'étude.

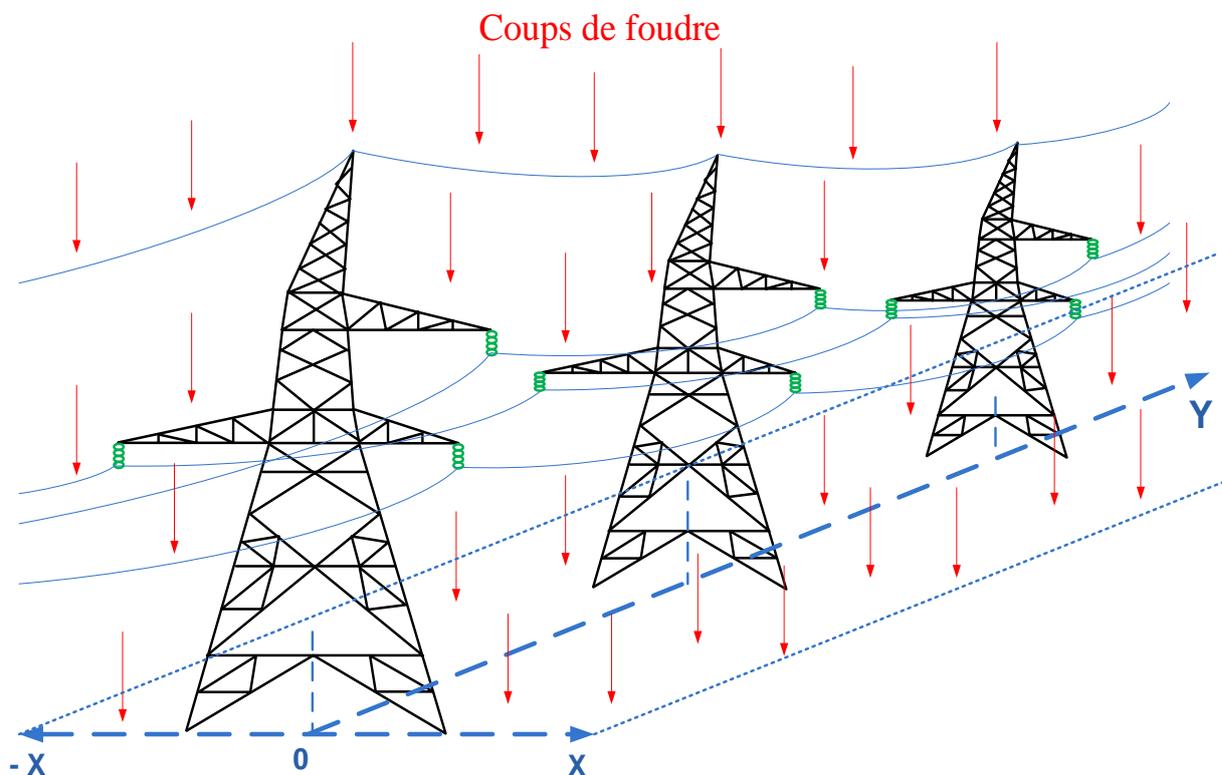


Figure 5.1 Zone de distribution des points d'impact des coups de foudre

5.9.2. Types de distribution adoptés

Les variables aléatoires générées dans cette étude suivent les distributions de probabilité qui sont résumées dans le tableau 5.2 :

Tableau 5.2 Types de distribution des paramètres du système

Variables	Distributions
L'amplitude du courant de la foudre	distribution log-normale
Temps du front de l'onde du courant	distribution log-normale
Temps de la queue de l'onde du courant	distribution log-normale
Coordonnée X: entre -250 et 250 m	distribution uniforme
Coordonnée Y: entre 0 et 3900 m	distribution uniforme
Angle de référence de phase: entre 0 et 360°	distribution uniforme

Les paramètres du coup de foudre (amplitude du courant, temps de montée et temps de demi-queue) sont calculés d'une manière aléatoire par MATLAB en utilisant le modèle du coup de foudre présenté ci-dessous, dans lequel une forme d'onde double exponentielle est choisie pour représenter le courant de foudre (Figure 5.2) et définie par l'expression (5.3):

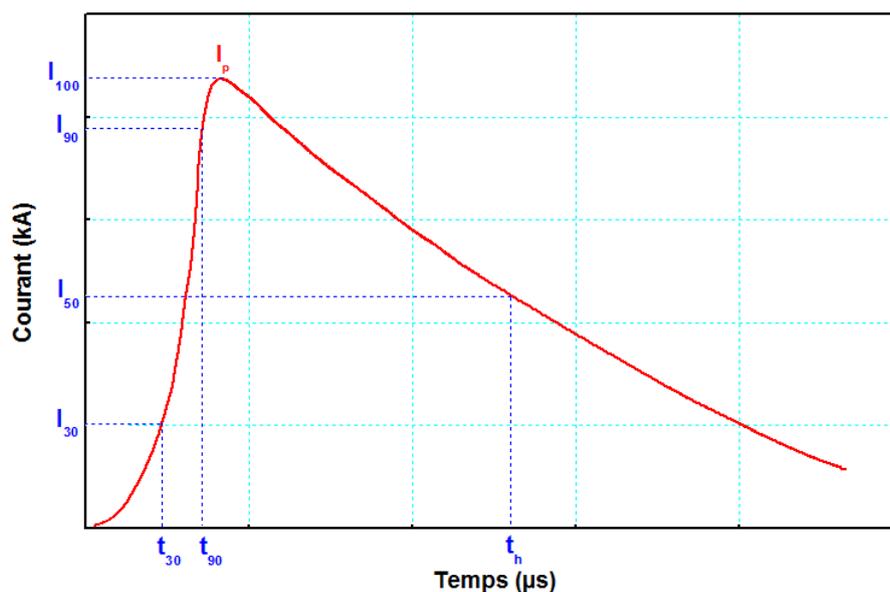


Figure 5.2 Paramètres du courant de foudre

$$i(t) = \begin{cases} i_1(t) & \text{when } i(t) \leq 0,999I_p \\ i_1(t) + i_2(t) & \text{when } i(t) > 0,999I_p \end{cases} \quad (5.3)$$

avec:

$$\begin{cases} i_1(t) = I_p \cdot \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t-t_s}{t_f}\right)^n\right) \right) \\ i_2(t) = I_p \cdot \left(\exp\left(-\left(\frac{t-t_w}{t_x}\right)\right) - 1 \right) \\ t_x = 1,44 \cdot (t_h - t_f \cdot 6,7^{1/n}) \end{cases} \quad (5.4)$$

où I_p est l'amplitude du courant, t_s est le temps de départ de la forme d'onde, $t_w = t$ quand $i_1(t) = 0,999 \cdot I_p$, et les paramètres utilisés pour définir cette forme d'onde sont l'amplitude du courant $I_{100} = I_p$, le temps du front t_f , et le temps de demi-queue t_h .

Le facteur de correction du front d'onde n est utilisé pour obtenir $t_f = 1,67 \cdot T$ où T est l'intervalle entre les instants lorsque l'impulsion est de 30% et 90% de la valeur de crête du courant. La valeur obtenue pour n est 2,5.

La variation statistique des paramètres de foudre a été supposée pour suivre une distribution log-normale, avec la fonction de densité de probabilité comme il est montré dans [5.10]:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot x \sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] \quad (5.5)$$

où $\sigma_{\ln x}$ est la déviation standard de $\ln x$, et x_m est la valeur moyenne de x . Le tableau 5.3 montre les valeurs utilisées pour les paramètres de foudre.

Tableau 5.3 Paramètres statistiques des coups de foudre

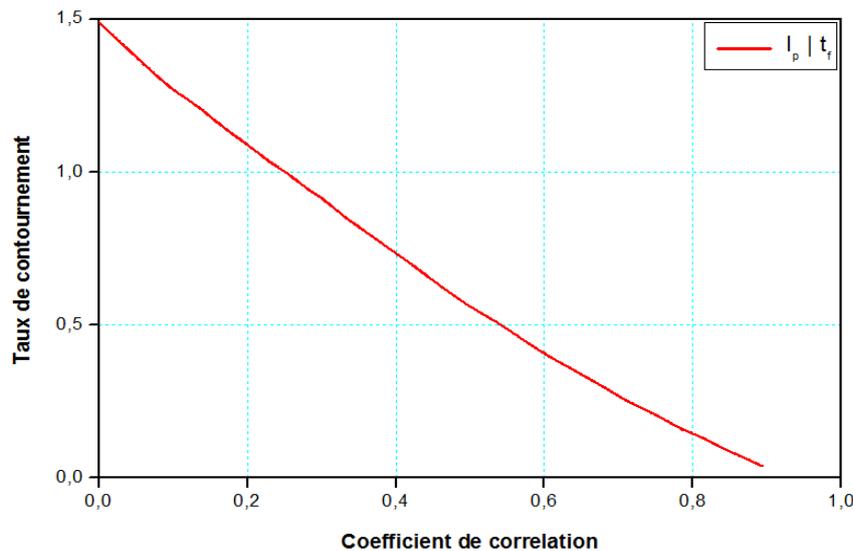
Paramètre	x_m	$\sigma_{\ln x}$
I_{100} , kA	34,0	0,740
t_f , μ s	2,0	0,494
t_h , μ s	77,5	0,577

5.9.3. Influence du coefficient de corrélation

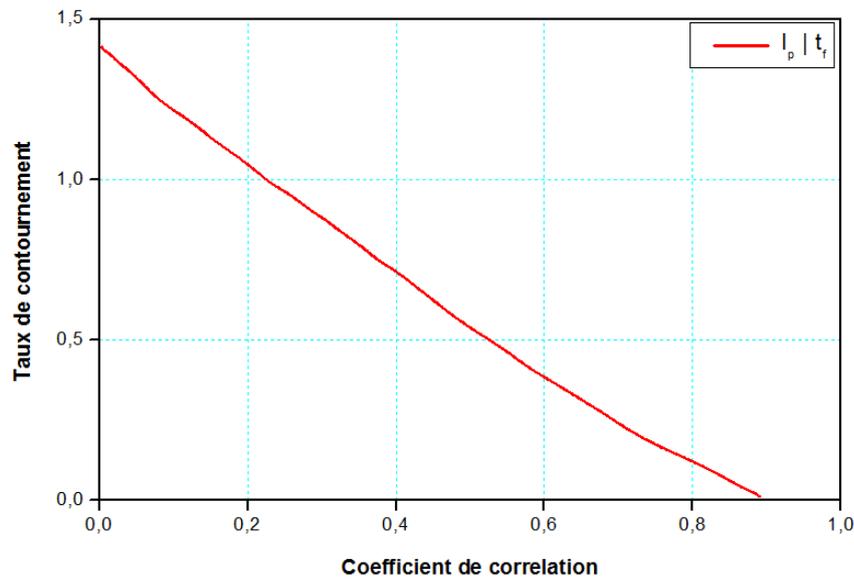
Le calcul paramétrique peut s'avérer très utile pour analyser l'influence de certains paramètres de foudre et de la ligne, aussi pour déterminer la plage des valeurs pouvant être considérées. On note que le nombre de paramètres impliqués dans les calculs de foudre est très élevé. Cependant, pour une ligne de transmission donnée, il n'est pas nécessaire d'analyser l'influence de chacun d'entre eux, car certains peuvent être spécifiés avec précision à partir de la géométrie de la ligne [5.10].

Plusieurs études ont été réalisées pour analyser l'influence d'un coefficient de corrélation non nul entre les fonctions de densité de probabilité de l'amplitude du courant et le temps de front sur le taux de contournement [5.10, 5.11, 1.9]. La génération des variables aléatoires, pour lesquelles une fonction de distribution de probabilité conjointe est supposée, a été basée sur la fonction de densité de probabilité conditionnelle.

Les graphes de la figure 5.3 présentent respectivement le taux de contournement total et le taux de contournements causés par des coups de foudre sur le câble de garde. Il est évident que les résultats obtenus dans les deux cas de test correspondent très bien les uns aux autres. Deux conclusions peuvent être tirées: le taux de contournement des isolateurs est très sensible au coefficient de corrélation entre l'amplitude du courant et le temps de front, tandis que le taux de contournement en retour des isolateurs reste pratiquement constant, quelle que soit la valeur de ρ_c .



a- Taux de contournement total



b- Taux de contournement en retour

Figure 5.3 Influence du coefficient de corrélation [1.9]

Il est conclu que le taux de contournement total diminue à mesure que la valeur du coefficient de corrélation augmente. Ce résultat est important car des valeurs égales ou supérieures à 0,4 ont été suggérées pour ρ_c [1.4].

Pour la présente étude un coefficient de corrélation ($\rho_c = 0,47$) à été considéré entre les fonctions de densité probabilistes de l'amplitude du courant et du temps de front [5.10, 5.11], pour lesquelles une fonction de densité de probabilité conjointe comme celle représentée en (5.6) est supposée :

$$f(I_p, t_f) = \frac{1}{2\pi \cdot I_p \cdot t_f \cdot \sigma_{\ln I_p} \cdot \sigma_{\ln t_f} \cdot \sqrt{1 - \rho_c^2}} \exp(-A) \quad (5.6)$$

avec :

$$A = \frac{1}{2(1 - \rho_c^2)} \left[\left(\frac{\ln I_p - \ln \bar{I}_p}{\sigma_{\ln I_p}} \right)^2 + \left(\frac{\ln t_f - \ln \bar{t}_f}{\sigma_{\ln t_f}} \right)^2 - 2\rho_c \left(\frac{\ln I_p - \ln \bar{I}_p}{\sigma_{\ln I_p}} \right) \left(\frac{\ln t_f - \ln \bar{t}_f}{\sigma_{\ln t_f}} \right) \right]$$

où:

$\ln \bar{I}_p$: est la valeur moyenne de $(\ln I_p)$ dont (\bar{I}_p) est la valeur médiane de (I_p) ;

$\sigma_{\ln I_p}$: est la déviation standard de $(\ln I_p)$;

$\ln \bar{t}_f$: est la valeur moyenne de $(\ln t_f)$ dont (\bar{t}_f) est la valeur médiane de (t_f) et $(\sigma_{\ln t_f})$ est la déviation standard de $(\ln t_f)$.

Pour ce contexte, la génération des variables aléatoires a été basée sur la fonction de densité de probabilité conditionnelle de t_f pour un I_p donné (5.7). [5.10, 5.11, 1.9]

$$p(t_f | I_p = I_{p0}) = \frac{p(I_p, t_f)}{p(I_p)} = \frac{\exp\left(-\frac{(\ln t_f - b)^2}{2\sigma^2}\right)}{t_f \sigma \sqrt{2\pi}} \quad (5.7)$$

où :

$$b = \ln \bar{t}_f + \rho_c \frac{\sigma_{\ln t_f}}{\sigma_{\ln I_p}} (\ln I_{p0} - \ln \bar{I}_p) \quad (5.7 a)$$

$$\sigma = \sigma_{\ln t_f} \sqrt{1 - \rho_c^2} \quad (5.7 b)$$

5.9.4. Calcul statistique des surtensions de foudre en utilisant le calcul parallèle

Cette section détaille les aspects les plus importants de la procédure MATLAB-ATP mise en œuvre pour calculer les surtensions de foudre dans un poste isolé par l'air en utilisant le calcul parallèle. L'objectif de cette étude est de calculer le taux de contournement et d'estimer le MTBF du poste en fonction des parafoudres et du BIL. Une fois que le modèle du système a été implémenté dans ATP, les principales étapes (Figure 5.4) de la procédure peuvent être résumées comme suit:

- Les points d'impact des coups de foudre sont estimés d'une manière aléatoire (amplitude, temps de front, temps de la queue, position du canal vertical de foudre) en supposant un chemin vertical des coups de foudre et une répartition uniforme du sol. Les canaux verticaux sont uniformément répartis sur une surface de neuf portées par rapport au poste (3,51 km) et une distance de 250 m pour chaque côté de la ligne. Les angles de référence des tensions des phases sont aussi estimés en utilisant une distribution uniforme entre 0 et 360 degrés. Généralement, les coups de foudre qui

tombent sur la région située au delà de la 9^{ème} portée ne causent pas des dangers pour les équipements du poste.

- Le point d'impact du dernier stade de la foudre est déterminé au moyen du modèle électro-géométrique (MEG). Ce dernier est implémenté dans MATLAB, il consiste un ensemble d'outils de décision calculant la probabilité qu'un coup de foudre tombe sur une ligne de transmission (câble de garde, conducteur de phase, la terre). Les surtensions provoquées par les coups de foudre qui tombent sur le sol à proximité de la ligne sont négligées car elles sont généralement inférieures à 400 kV et ne sont importantes que pour les systèmes à basse tension [1.11, 1.6].
- Les calculs de surtension sont effectués une fois que le point d'impact est déterminé. La source de courant qui représente la foudre est connectée au moyen de commutateurs à des câbles de garde ou à des conducteurs de phase en fonction de la nature de l'événement (défaut d'écran ou amorçage en retour).
- Après ayant toutes les données pour un coup de foudre, MATLAB va créer des fichiers de données qui vont être utilisés comme des fichiers des entrées pour notre système électrique, qu'il est déjà modélisé dans le logiciel EMTP.
- A l'aide de l'application MATLAB, nous avons calculé le taux de contournement de la ligne de transmission et on a enregistré les surtensions entrantes au poste au plusieurs points fondamentaux.
- Le traitement du résultat de chaque simulation est effectué pour déterminer la valeur du MTBF et par suite étudié la coordination des isolements du système étudié.
- La procédure est basée sur un calcul parallèle pour accélérer le calcul et pour couvrir l'inconvénient majeur (temps long) de la méthode appliquée (Monte Carlo).

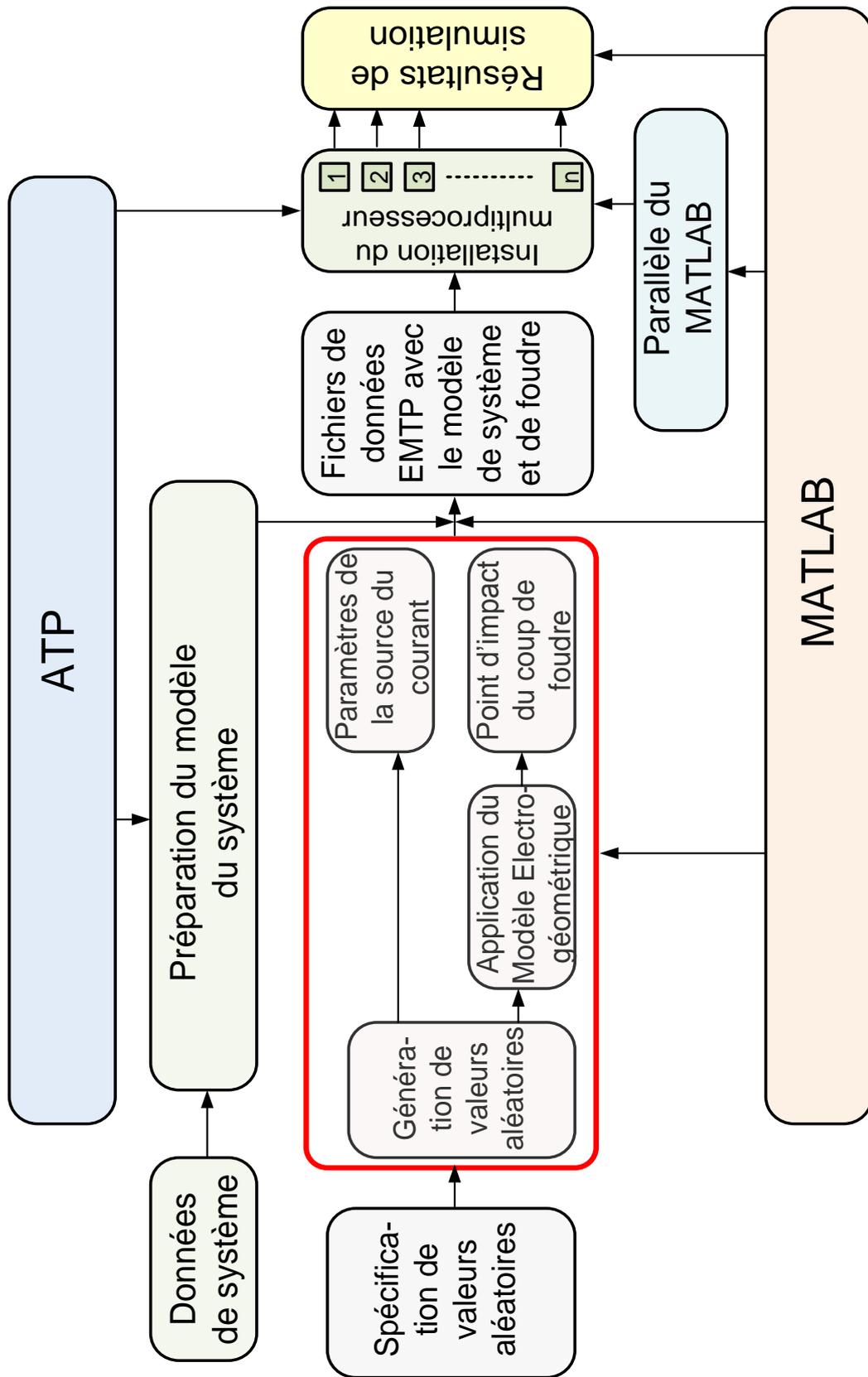


Figure 5.4 Organigramme de l'étude statistique de l'analyse de la performance de la foudre

5.10. Conclusion

Comme conclusion de cette partie, il est à retenir que la méthode de Monte-Carlo désigne une famille de méthodes algorithmiques visant à calculer une valeur numérique approchée en utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes.

Cela permet d'estimer des valeurs numériques et de caractériser des systèmes complexes. L'inconvénient est que cette méthode est lente, mais l'application de la procédure de calcul parallèle permet un gain considérable en temps de calcul.

Dans cette partie du travail, des concepts et des définitions nécessaires à l'utilisation de cette méthode et son adaptation au cas de la foudre sont présentés et discutés. Particulièrement la corrélation qui existe entre l'amplitude du courant et son temps du front pour laquelle le taux du contournement est très sensible. Par conséquent il est nécessaire d'en tenir compte dans la présente étude. Par ailleurs, l'algorithme complexe de cette étude est présenté d'une manière compacte à la fin de ce chapitre.

6.1. Introduction

Dans ce chapitre, l'évaluation de la coordination des isolements du poste à isolation dans l'air est proposée. Elle est basée sur une application MATLAB-EMTP dans laquelle un environnement multi processeur est élaboré pour accélérer les calculs [6.1].

L'étude présentée permettra d'estimer le nombre de contournements induits par la foudre en présence et en absence de l'effet couronne.

Il sera, par ailleurs, question non seulement d'estimer le MTBF des équipements du poste mais également de sélectionner les parafoudres nécessaires et les BIL adéquats.

Les simulations ATP seront réparties, dans ce cas, entre 40 processeurs. Le temps de simulation nécessaire pour réaliser l'étude complète pour chaque cas sera réduit considérablement.

6.2. Présentation du système étudié

L'image satellite du système étudié est présentée sur la figure 6.1. Son schéma unifilaire est présenté sur la figure 6.2. Il s'agit du poste d'interconnexion et de transformation 400 kV, 50 Hz à isolation dans l'air (AIS) de Oued El-Athmania. Il est construit avec un niveau d'isolement fondamental de 1425 kV. Le poste possède quatre entrées, deux jeux de barres et deux autotransformateurs de puissance ayant une puissance de 500 MVA chacun. Des parafoudres ZnO sont installés au niveau de chaque ligne d'entrée et au niveau des autotransformateurs pour but de protection. Les lignes de transmission connectées, sont des lignes triphasées ayant deux conducteurs par phase de section égale à 570mm^2 en Almélec et un câble de garde en fibre optique.

Les conducteurs sont supportés par des pylônes de type triangle dotés de prises de terre au niveau de leurs pieds. Les chaînes d'isolateurs utilisés sont en verre de type U160 [4.1].



Figure 6.1 Vue de satellite du système étudié

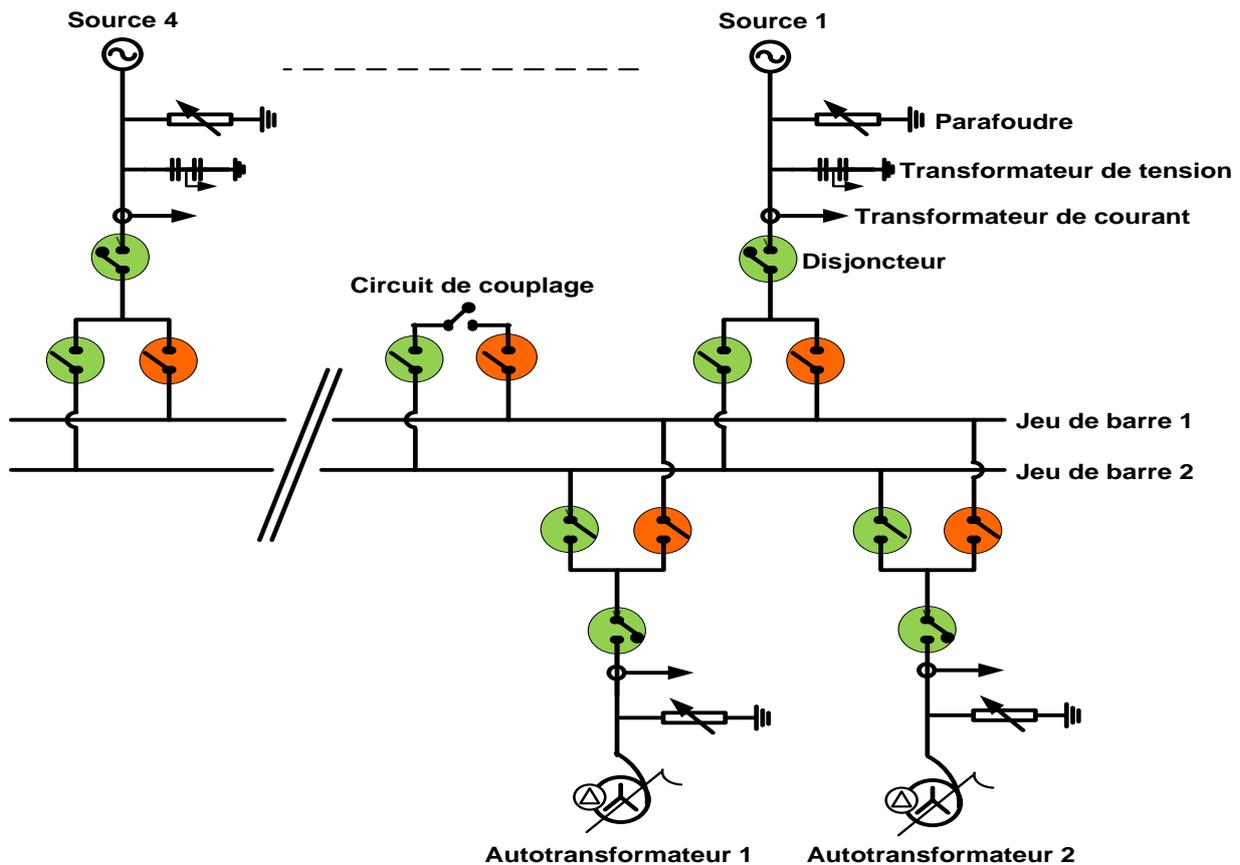


Figure 6.2 Schéma unifilaire du système étudié

6.3. Etude et analyse des performances du système étudié

La figure 6.3 montre la disposition complète du circuit implanté dans l'ATPDraw sur lequel la performance sous choc de foudre du système est étudiée. Puisque la fiabilité est l'inverse de la défaillance et que la défaillance est considérée comme étant un événement aléatoire, les études probabilistes sont les plus appropriées pour le système testé. Afin de générer une situation proche de la réalité, plusieurs données sont approximées statistiquement.

Dans le présent travail, une approche est proposée pour évaluer la performance de la foudre d'une ligne de transmission et pour obtenir les surtensions de foudre entrantes dans le poste. En utilisant la technique de calcul parallèle pour accélérer la procédure de solution globale, la performance de la foudre du système de test est estimée en générant 60000 combinaisons de nombres aléatoires qui correspondent à une analyse de 30769 années, en supposant que la densité du coup de foudre au sol $N_g = 1$ coup par km^2 et par an.

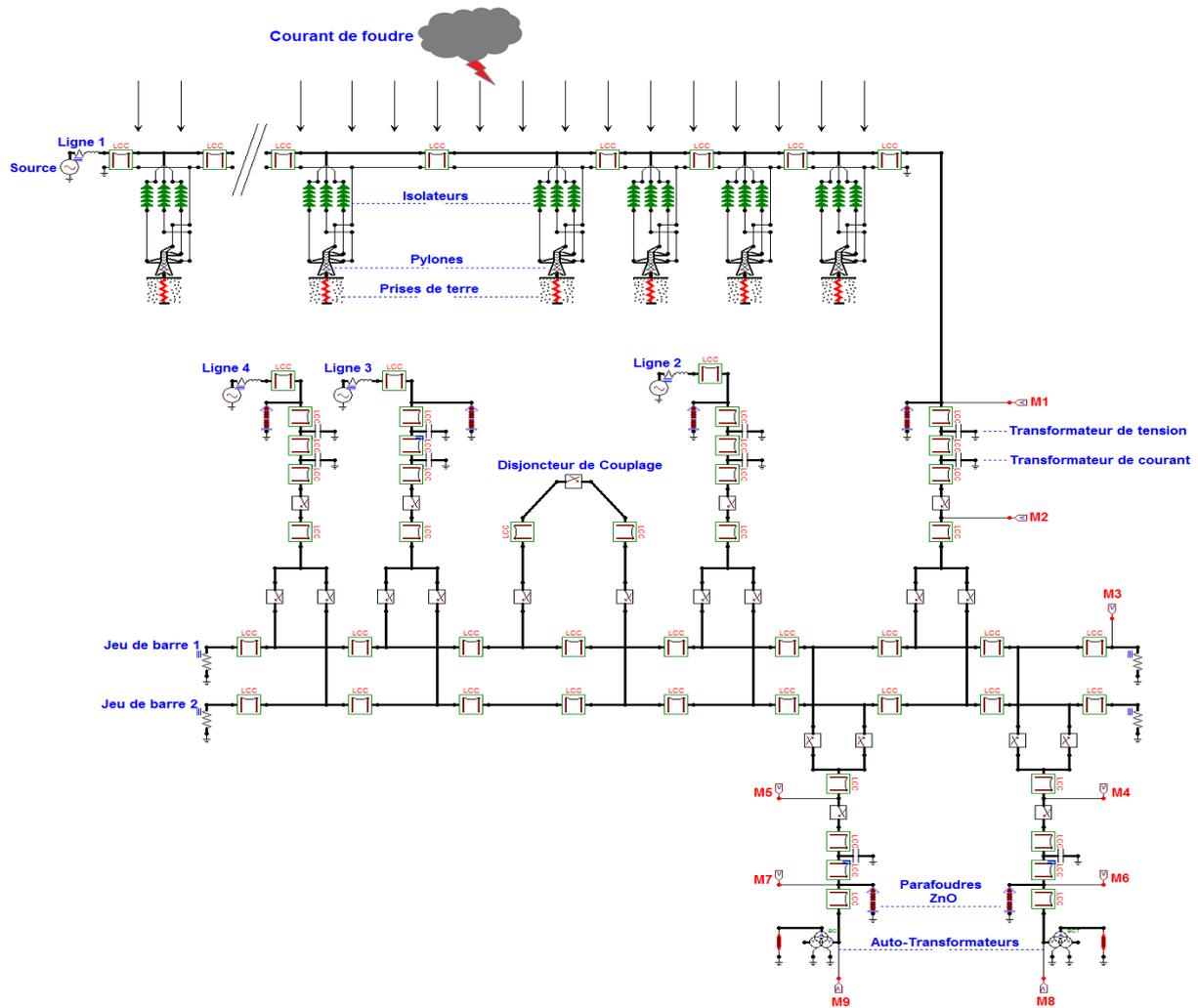


Figure 6.3 Modèle complet du poste et des lignes connectées implémenté dans ATPDraw

Le nombre total généré est analysé et filtré par le modèle électro-géométrique. Ce nombre est réduit donc seulement à 9214 cas qui touchent la ligne de transmission (on néglige les cas qui se terminent à la terre). La ligne de transmission a été modélisée en prenant 10 portées à partir du poste.

Une première investigation vise à évaluer les contraintes en tension dans la ligne de transmission en considérant bien sûr les paramètres aléatoires (la position du coup de foudre, l'amplitude et la vitesse de l'onde du courant de foudre et l'angle de déphasage de la tension permanente). Les principaux résultats sont résumés comme suit :

La figure 6.4 a montré que la probabilité des courants des coups de foudre qui tombent sur le câble de garde, et sur la figure 6.5 la probabilité des courants des coups de foudre qui tombent sur le conducteur de phase.

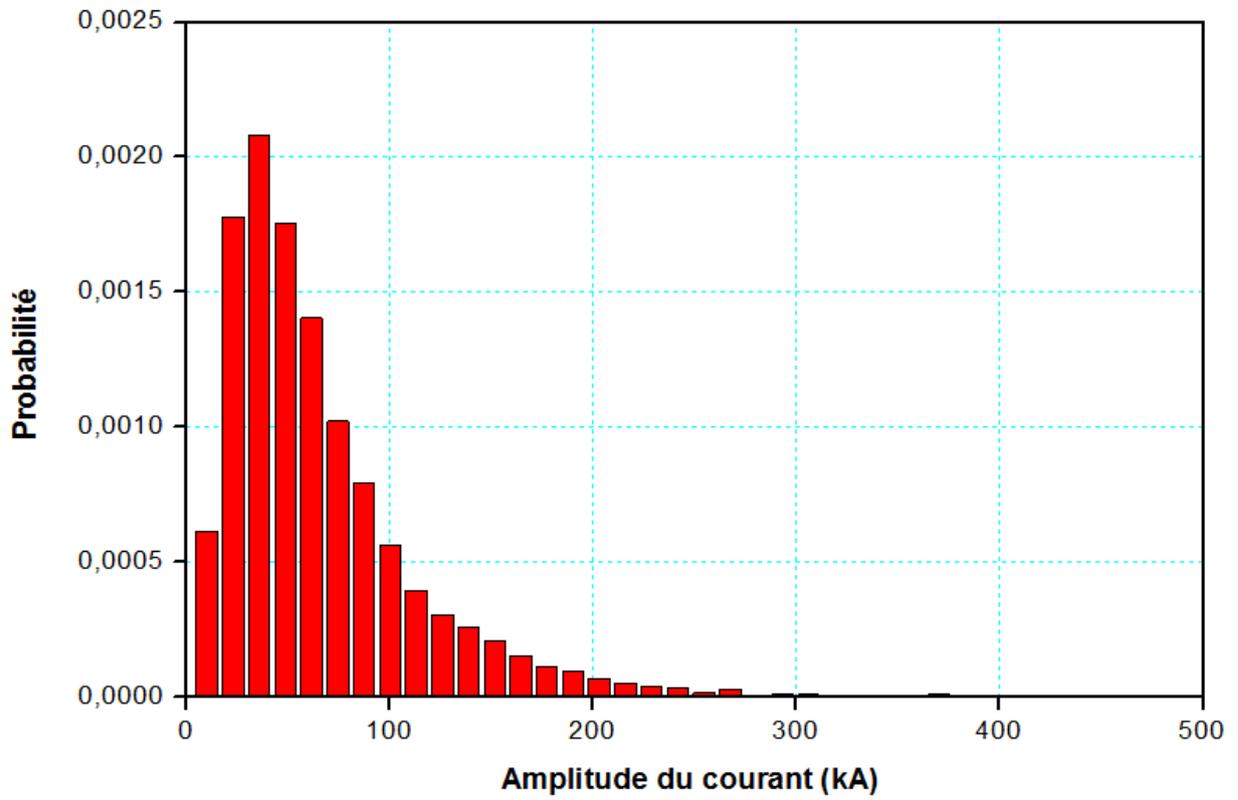


Figure 6.4 Distribution des coups de foudre qui tombent sur le câble de garde

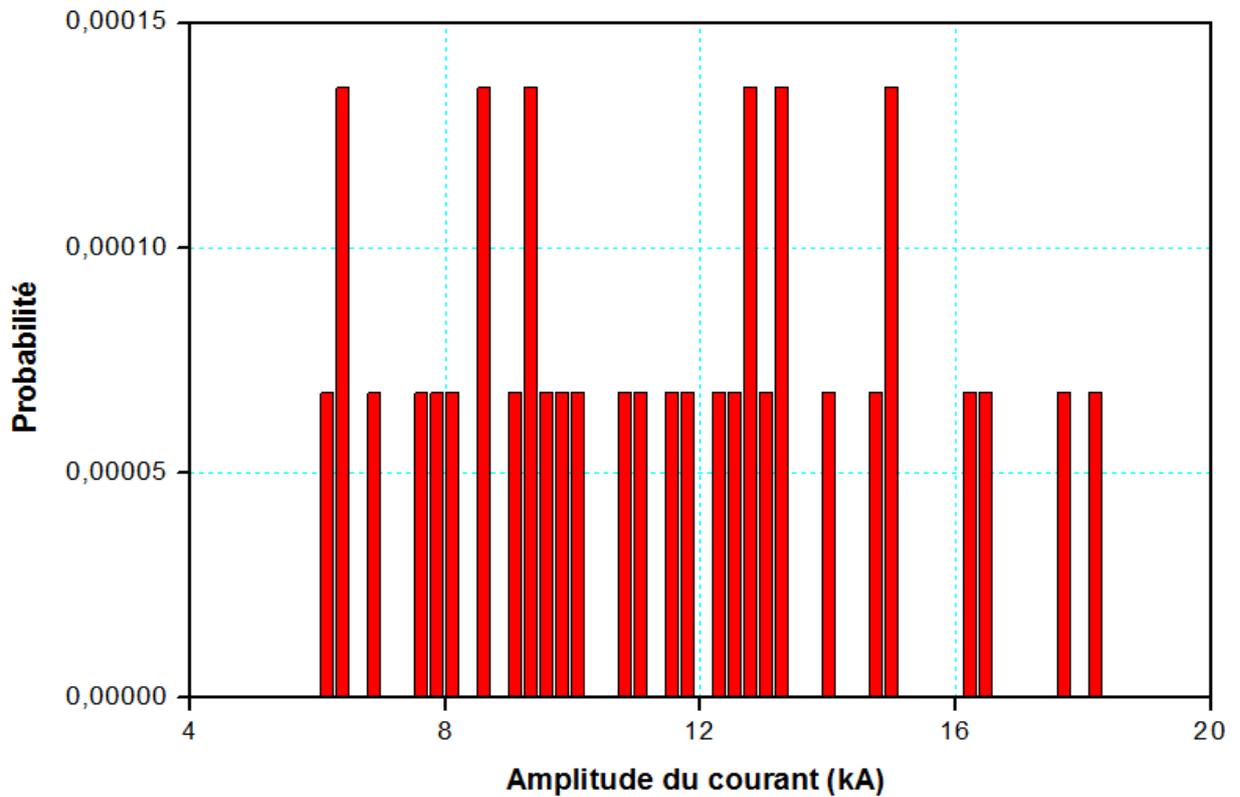


Figure 6.5 Distribution des coups de foudre qui tombent sur le conducteur de phase

Comme on peut voir sur la figure 6.4, les courants ayant la probabilité la plus élevée (0,0021) possèdent une amplitude qui se situe entre 36 à 49 kA. Cela signifie qu'ils représentent 1608 cas parmi les 9180 cas qui sont tombés sur le câble de garde. Cependant, seulement 34 cas qui sont tombés sur le conducteur de phase. Les courants de crête varient entre 6 kA et 18 kA. La probabilité la plus élevée dans ce cas est de $1,36.10^{-4}$ obtenue pour six courants possédant les amplitudes suivantes : 6,39 kA; 8,60 kA; 9,34 kA; 12,78 kA; 13,27 kA et 14,99 kA.

Il a été souligné précédemment que seulement un certain nombre de courants de foudre atteignant la ligne provoquent un contournement. Pour obtenir cette quantité, un algorithme est développé pour distinguer les cas qui le provoquent de ceux qui ne le provoquent pas.

La figure 6.6 montre la distribution des amplitudes des courants de foudre qui causent un amorçage en retour (Back Flashover - BF). Le nombre total dans ce cas est de 4689. Les courants ayant la probabilité la plus élevée (0,0011) possèdent une amplitude allant de 71 kA à 84 kA. Ce qui représente 784 cas. De plus, aucun amorçage n'a été enregistré pour les amplitudes inférieures à 47 kA. Par ailleurs, pour les courants supérieurs à 400 kA, la probabilité est quasiment nulle, ce qui est en accord avec les résultats de simulation rapportés dans [6.2, 6.3] et expérimentaux présentés dans [6.4] où les foudres avec un courant supérieur à 500 kA ont été rarement enregistrées.

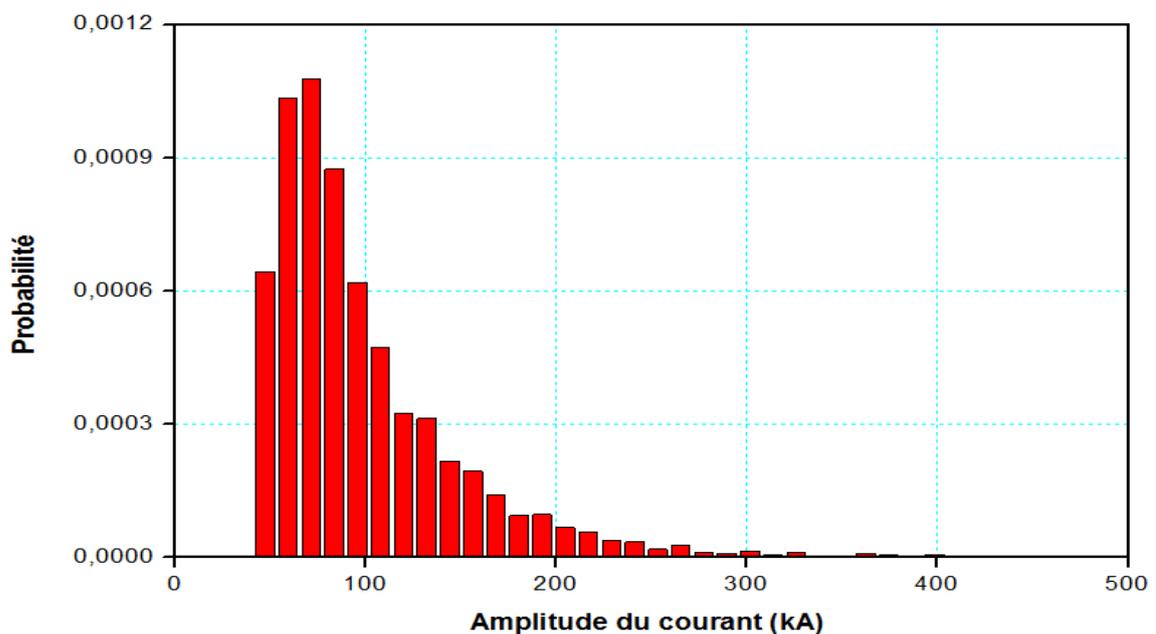
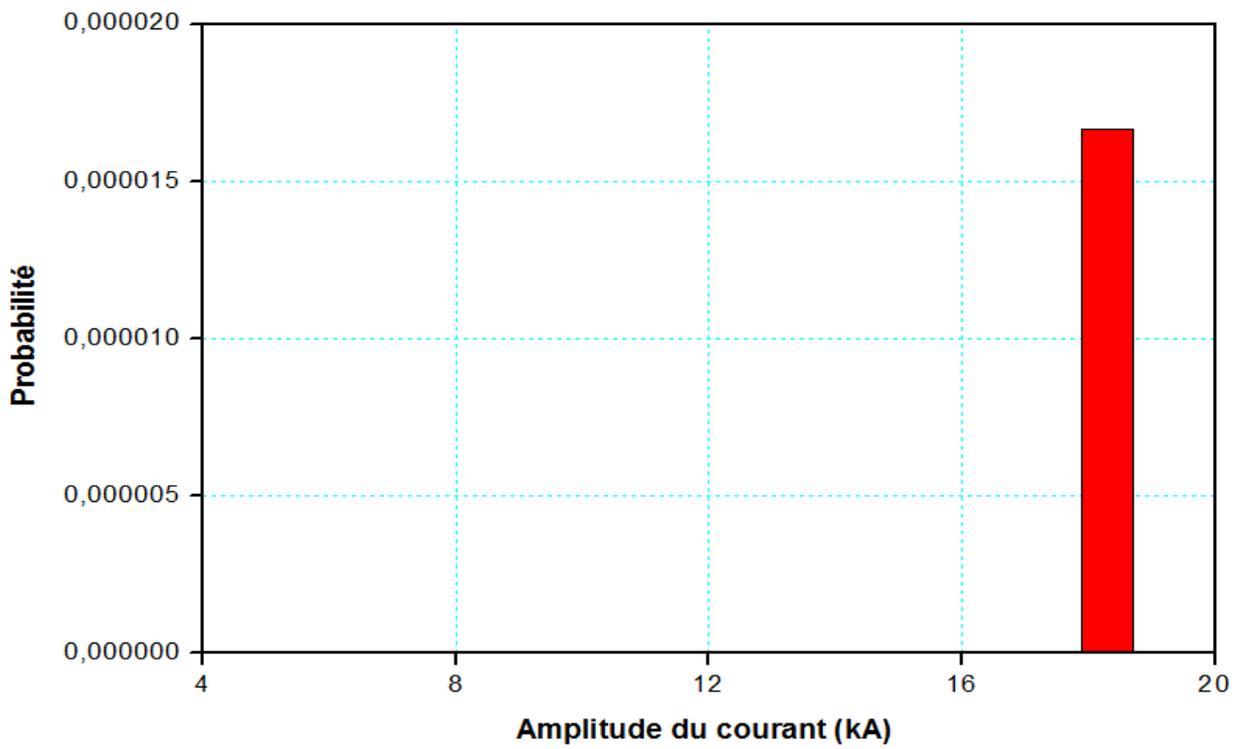
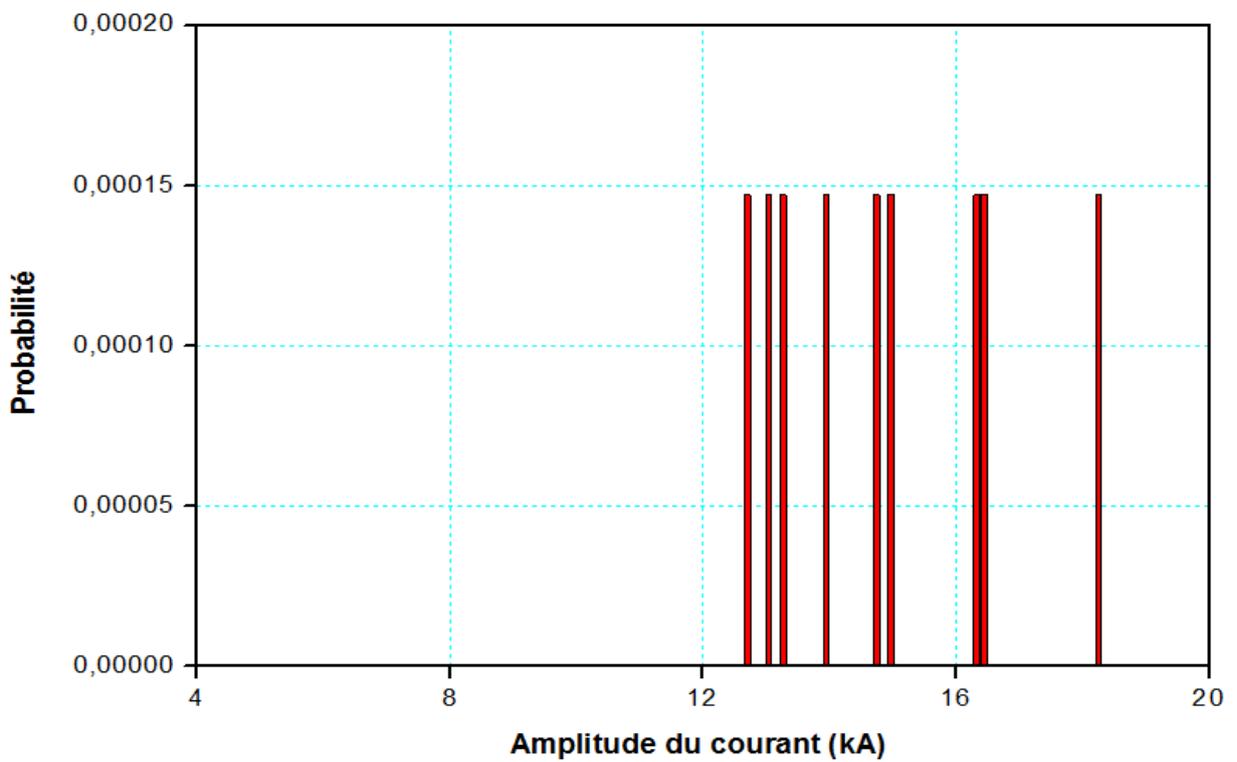


Figure 6.6 Distribution des coups de foudre sur le câble de garde qui ont causé un contournement



a- Parafoudres installés au niveau du poste



b- Parafoudres non installés

Figure 6.7 Distribution des coups de foudre sur le conducteur de phase qui ont causé un contournement

La figure 6.7 a montré qu'un seul coup de foudre a provoqué un contournement (Flashover - FO) parmi les 34 cas qui sont tombés sur le conducteur de phase. La probabilité de ce cas est de $1,66.10^{-5}$ pour un courant possédant une amplitude de 18 kA. Pour le cas d'un poste non protégé, un autre résultat a été enregistré concernant la distribution des coups de foudre sur le conducteur de phase qui causent un contournement (Figure 6.7.b), où nous avons remarqué que le nombre de ce dernier a augmenté à 9, ce qui explique que la protection installée au niveau du poste influe même sur le comportement des lignes de transmission connectées.

L'amplitude du courant est statistiquement liée au temps du front de la forme d'onde du courant. Une analyse de sensibilité a été effectuée pour déterminer la relation entre le contournement et le temps du front. Nous pouvons dire d'après la figure 6.8 que le temps du front joue un rôle important dans l'occurrence du contournement, la probabilité la plus élevée (0,0281) étant obtenue pour un temps du front allant de 2,5 μ s à 3 μ s, ce qui représente 425 cas. Par ailleurs, Nous pouvons observer que certains coups de foudre touchant la ligne de transmission avec un temps de front élevé n'ont pas provoqué de contournement, même possédant des amplitudes élevées.

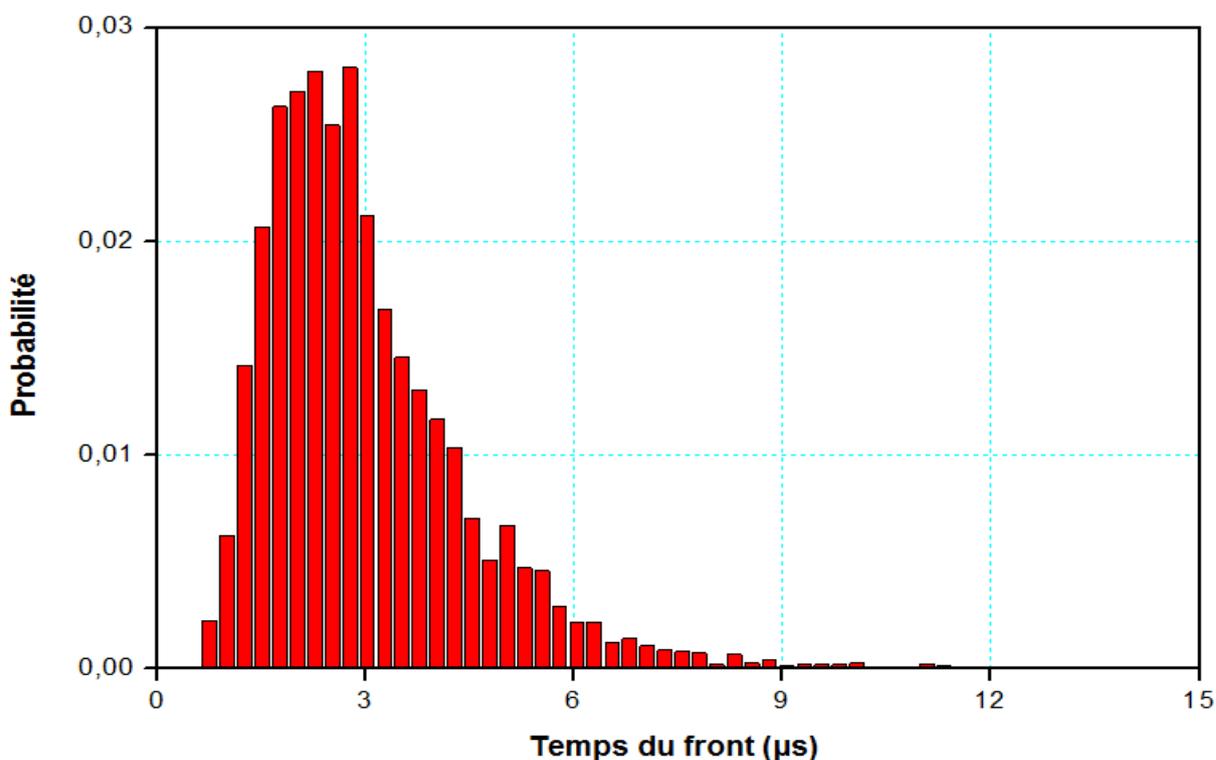


Figure 6.8 Distribution des temps du front des coups de foudre qui ont causé un contournement

La partie suivante consiste à estimer le MTBF des équipements du poste de transformation. Le MTBF est défini comme étant le temps moyen écoulé entre les défaillances inhérentes à un système en cours de fonctionnement. Il est également considéré comme une mesure de base de la fiabilité d'un système et il est généralement représenté en unités d'heures. En termes simples, plus le MTBF est élevé, plus la fiabilité du système serait.

Les résultats seront présentés dans le cas où la ligne 1 est foudroyée. L'emplacement approprié pour l'installation des parafoudres est un aspect important pour contrôler les surtensions en différents points dans le poste. Identifier les meilleures positions aura donc un effet important sur le coût du poste.

Le MTBF est calculé en considérant les scénarios suivants:

- a) Poste sans protection ;
- b) Protections au niveau des transformateurs de puissance ;
- c) Protections au niveau des transformateurs de puissance et à l'entrée du poste.

Le cas de sans protection a été introduit pour objectif de comparaison.

Les niveaux d'isolement fondamentaux 950 kV, 1050 kV, 1175 kV, 1300 kV et 1425 kV sont sélectionnés pour analyser les résultats de la partie suivante. Ils correspondent à la gamme de tension 400 kV. Pour chacune des 4690 surtensions entrantes dans le poste, nous avons enregistré les tensions dans plusieurs points fondamentaux du poste. Ces surtensions sont comparées avec les niveaux d'isolement cités ci-dessus dans le but de déterminer le nombre de défauts.

Le MTBF est obtenu en utilisant l'expression suivante [6.5, 6.6, 6.7]

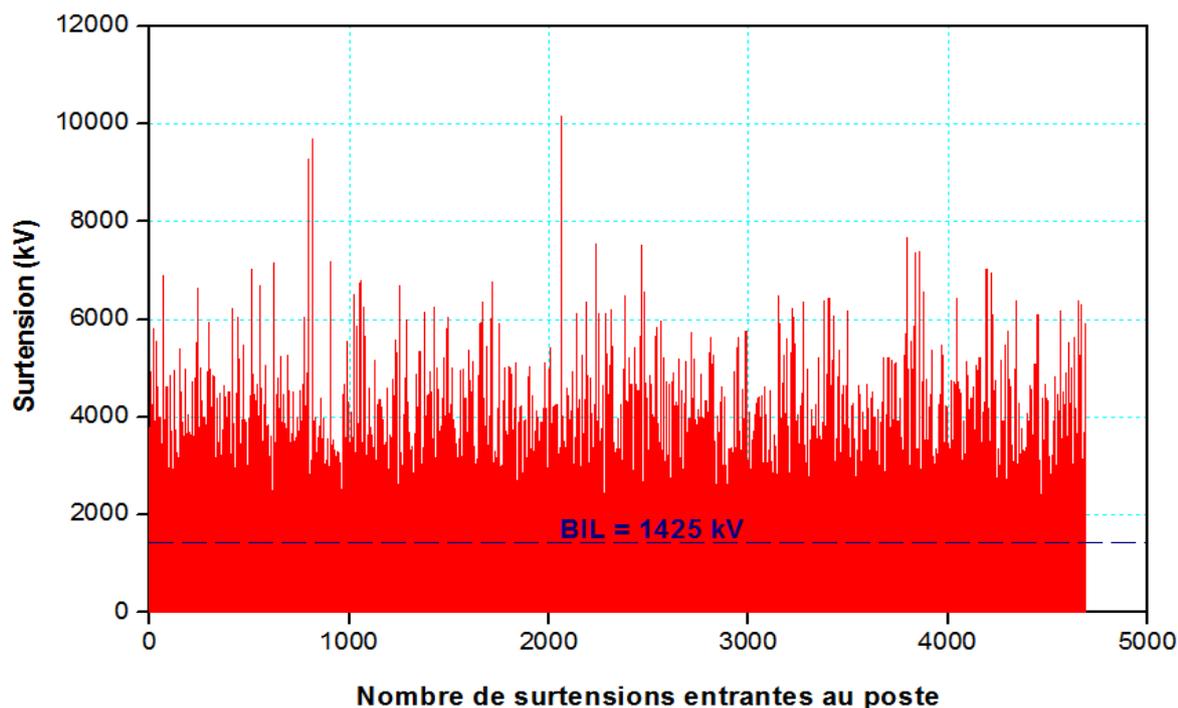
$$MTBF = \frac{Y_s}{n_f} \quad (6.1)$$

où Y_s est le nombre d'années durant lesquelles le système a été simulé et n_f est le nombre de défauts dans l'équipement du poste (le nombre de fois qu'une surtension à un équipement dans le poste dépasse son niveau d'isolement). Les MTBF's calculés au niveau de l'autotransformateur T_1 sont résumés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 Résultats de simulation - Autotransformateur T_1

	BIL (kV)	MTBF (Années)
Scénario 1	950	6,67
	1425	7,04
Scénario 2	950	35,45
	1050	97,06
	1175	433,37
	1300	3076,9
	1425	∞
Scénario 3	950	∞

Dans cette étude, nous nous contentons de présenter quelques résultats de simulations, car il est pratiquement impossible de les traiter tous en raison de leur grand nombre. Dans le premier exemple, les résultats donnant les surtensions au niveau de l'autotransformateur T_1 pour le cas sans protection sont montrés sur la figure 6.9. Comme nous pouvons constater que la majorité des surtensions enregistrées sont supérieures au BIL choisi malgré que sa valeur soit la plus grande (1425 kV), ce qui a conduit à un très faible MTBF (7 ans). Cela affectera la fiabilité requise du système.

**Figure 6.9** Surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T_1 - Scénario 1 -

La figure 6.10 montre la répartition des surtensions pour le scénario 2 pour le même équipement. Les résultats présentés sur cette figure indiquent que le nombre de surtensions enregistrées qui sont supérieures au BIL est d'autant plus faible que ce dernier est élevé. En particulier, toutes les surtensions enregistrées étaient inférieures à la valeur du BIL de 1425 kV. Ce qui est confirmé par la figure 6.11. Il est alors conclu qu'il y a une relation entre la valeur du MTBF et la valeur du BIL choisie (Tableau 6.1). Cela signifie que seulement l'autotransformateur T_1 est protégé dans ce poste. Cependant, on ne peut pas garantir une valeur élevée du MTBF pour le reste des points fondamentaux du poste et par suite la fiabilité du système.

Les surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T_1 pour le scénario 3 sont montrées sur la figure 6.12. Dans ce cas, il a été constaté que pour la valeur du BIL (950kV), toutes les surtensions enregistrées sont au-dessous de cette valeur conduisant à un MTBF infini. Cela indique que l'autotransformateur T_1 est bien protégé dans ce poste.

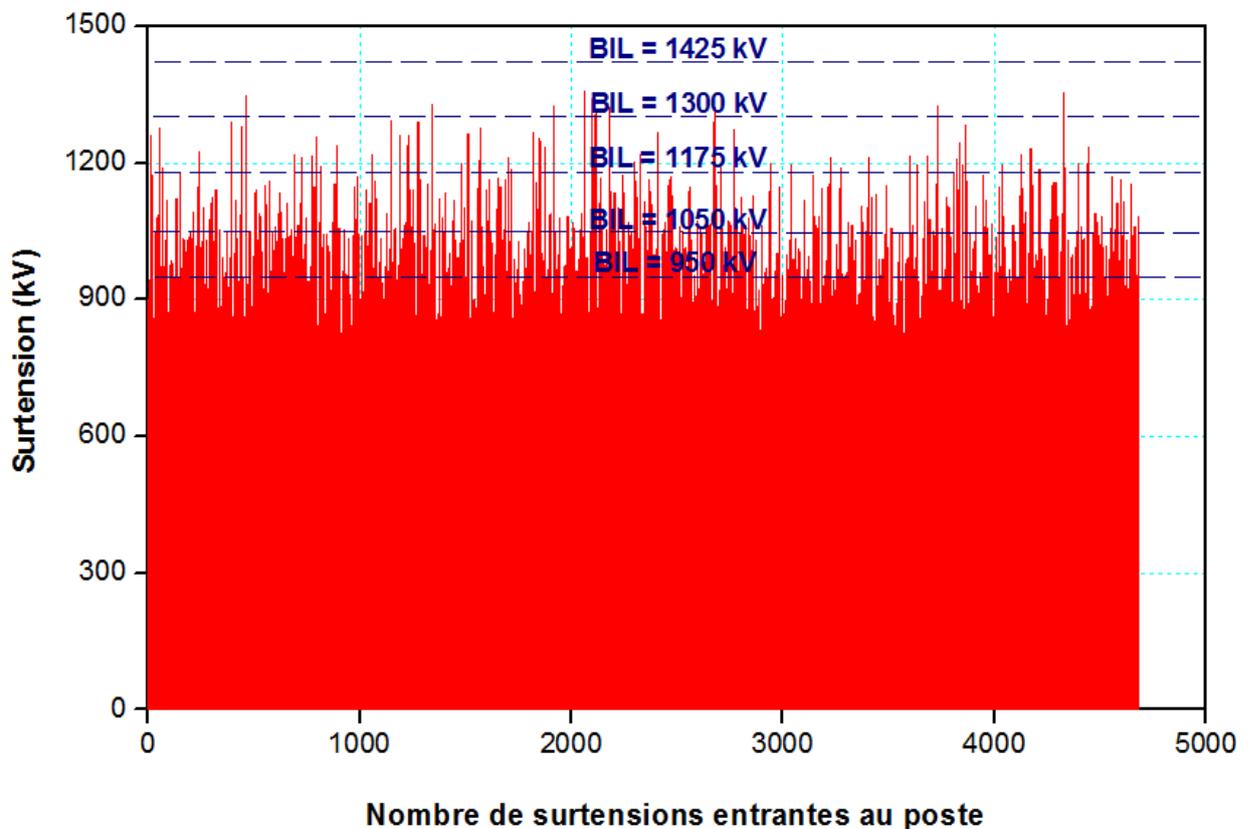


Figure 6.10 Surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T_1 - Scénario 2 -

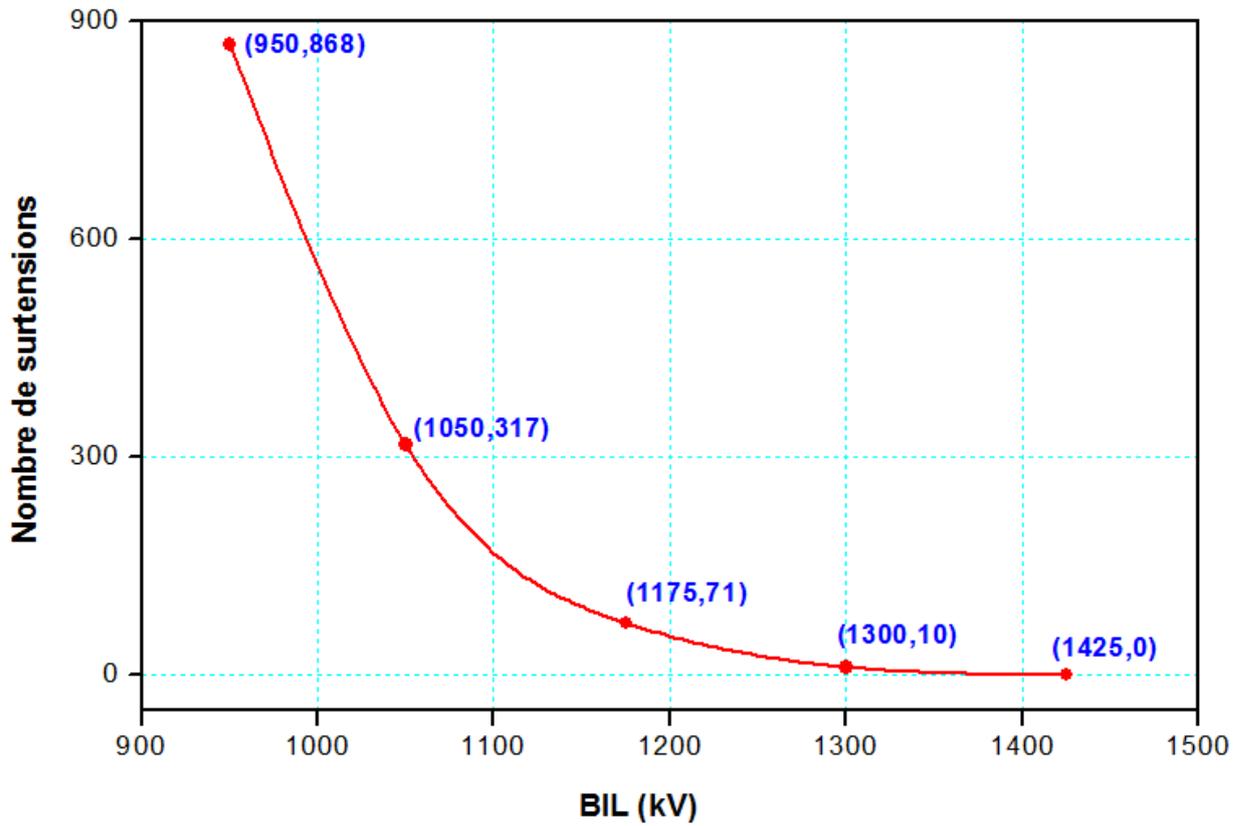


Figure 6.11 Relation entre les surtensions enregistrées et le BIL

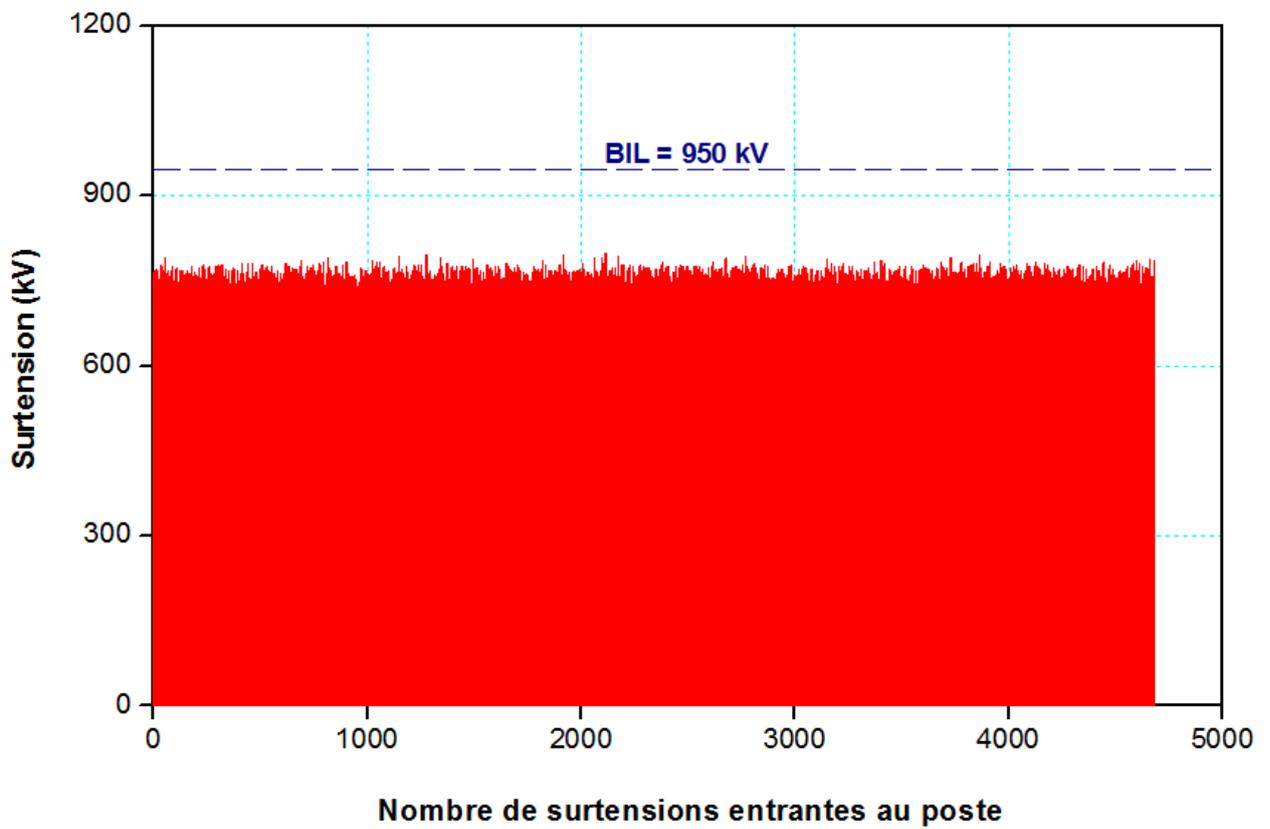


Figure 6.12 Surtensions enregistrées au niveau de l'autotransformateur T1 - Scénario 3 -

Cependant, encore une fois, on ne peut pas garantir une valeur élevée du MTBF pour le reste des points fondamentaux du poste et par suite la fiabilité du système. Cela nécessite de refaire le calcul pour l'ensemble du poste en considérant tous les points fondamentaux (entrée (M1), disjoncteur de la ligne (M2), jeu de barres 1 (M3), disjoncteur de l'autotransformateur 1 (M4), disjoncteur de l'autotransformateur 2 (M5), parafoudre 1 (M6), parafoudre 2 (M7), autotransformateur 1 (M8), autotransformateur 2 (M9)), comme il est montré sur la figure 6.3. Une fois le calcul fait, les valeurs du MTBF sont résumées dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2 Résultats de simulation – poste de transformation

	BIL (kV)	MTBF (Années)
Scénario 1	950	0,74
	1425	0,78
Scénario 2	950	1,95
	1050	2,69
	1175	3,76
	1300	5,08
	1425	6,65
Scénario 3	950	421,5
	1050	30769
	1175	∞

En examinant ce dernier, Nous pouvons conclure que le MTBF calculé pour l'ensemble du poste est favorablement élevé pour le scénario 3 que pour le scénario 2. Cela peut s'expliquer par le fait que les parafoudres installés équilibrent parfaitement les surtensions enregistrées à un niveau acceptable et assurent par suite une bonne protection [6.8].

D'autres paramètres tels que (le nombre d'années simulées, le taux de contournement de la ligne,...) peuvent être également calculés en utilisant les équations (6.2) à (6.4).

Les expressions principales sont présentées comme suit:

Le taux de contournement de la ligne pour une longueur de 100 km est :

$$F_{r100k} = \frac{F_r * 100}{L_l} \quad (6.2)$$

où F_r est le taux de contournement de la ligne et L_l est sa longueur.

Le taux de contournement de la ligne est calculé avec l'équation suivante :

$$F_r = \frac{C_n}{Y_s} \quad (6.3)$$

où C_n est le nombre de contournements dans la ligne.

Y_s est le nombre d'années simulées, donné par :

$$Y_s = \frac{1}{\left(\frac{A}{N}\right) * C_k} \quad (6.4)$$

Où A est la surface considérée par l'étude du point d'impact du coup de foudre, N est le nombre de simulations effectuées et C_k est la densité locale du coup de foudre.

Le tableau 6.3 présente quelques résultats de simulation supplémentaires:

Tableau 6.3 Résultats de simulation supplémentaires

	Paramètres	Valeur
Entrées	Nombre de simulations	60000
	Nombre d'années simulées	30769
	Nombre de processeurs utilisés	40
Résultats supplémentaires	Nombre de coups de foudre sur la ligne	9214
	Nombre de contournements	4690
	Taux de contournement	0,1524
	Taux de contournement pour 100 km	3,9083
Temps de calcul	Temps de calcul du modèle électro-géométrique	154 s
	Temps total de simulation	1008,7 s

6.4. Coordination des isolements

La coordination des isolements d'un poste très haute tension est nécessaire et il faut s'assurer de la bonne tenue diélectrique des éléments de la chaîne du système électrique. Ces éléments ont des niveaux de BIL différents, et concrètement se pose la question de la nécessité d'adjonction de parafoudres, et de leur définition (emplacement, dimensionnement).

La coordination des isolements nécessite une prédiction correcte des surtensions en différents points d'un poste de transformation suite à un coup de foudre tombant sur une

ligne à l'extérieur du poste du point de vue protection des équipements. Pour cet objectif, l'un des aspects les plus importants est de considérer les caractéristiques dynamiques des parafoudres ZnO.

Dans cette section plusieurs simulations seront faites pour la sélection des parafoudres et la détermination du MTBF et du BIL adéquat. A cet effet les scénarios suivants ont été considérés (Tableau 6.4) :

- Dans le premier, nous choisirons un BIL et un type de parafoudre et nous déterminerons le MTBF correspondant ;
- Le deuxième consiste à fixer la valeur du MTBF et le type de parafoudre puis déterminer le BIL ;
- Dans le troisième, nous déterminerons un type de parafoudre adéquat pour un MTBF et un BIL désirés.

Tableau 6.4 Les différents scénarios étudiés

	MTBF	BIL	PARAFOUDRE
MTBF	-	✓	✓
BIL	✓	-	✓
PARAFOUDRE	✓	✓	-

Comme il à été discuté dans le chapitre 5, le calcul des surtensions en différents points du système électrique étudié est réalisé par l'EMTP. De ce fait, toute modification dans la configuration de ce dernier influera sans doute sur les résultats de simulation et en particulier le choix du type de parafoudre. La partie MATLAB avait pour sa part, le calcul du MTBF et la sélection du BIL. En considérant la fiche technique des parafoudres ZnO pour le constructeur ABB, plusieurs types pour la gamme de tension 400 kV peuvent être utilisés (Tableau 6.5).

Tableau 6.5 Principales données des parafoudres ZnO (ABB)

Type de parafoudre	Tension nominale	Tension maximal de service	Capacité des surtensions temporelles		Tension résiduelle maximale (kV_{max})						
					30/60 μs			8/20 μs			
	U_r	U_c	1 s	10 s	1 kA	2 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
Parafoudre 1	330	267	382	363	644	667	684	714	751	823	901
Parafoudre 2	336	269	-	-	669	702	-	758	806	887	968
Parafoudre 3	360	291	417	396	702	728	746	779	819	897	983
Parafoudre 4	372	301	431	409	726	752	771	804	847	927	1021
Parafoudre 5	378	306	438	415	737	764	783	817	860	942	1037
Parafoudre 6	390	315	452	429	761	788	808	843	888	972	1070
Parafoudre 7	420	336	487	462	819	849	870	908	956	1051	1152

Dans cette étude, le modèle IEEE modifié présenté dans le chapitre 4 a été choisi. Ses paramètres constants sont calculés et résumés dans le tableau 6.6 et cela pour les différents parafoudres utilisés tout en tenant compte du parafoudre actuellement installé dans le poste.

Tableau 6.6 Paramètres des parafoudres utilisés

Type de parafoudre	Tension nominale		Paramètres électriques				
	U_r	R_0	L_0	R_1	L_1	C_1	C_2
	kV_{rms}	Ω	μH	Ω	μH	pF	pF
Parafoudre 1	330	324,5	0,649	210,925	48,67	15,4	15,4
Parafoudre 2	336	450	0,9	292,5	67,5	11,11	11,11
Parafoudre 3	360	485	0,97	315,25	72,75	10,3	10,3
Parafoudre 4	372	419	0,838	272,35	62,85	11,93	11,93
Parafoudre 5	378	485	0,97	315,25	72,75	10,3	10,3
Parafoudre 5	390	419	0,838	272,35	62,85	11,93	11,93
Parafoudre 7	420	419	0,838	272,35	62,85	11,93	11,93

La figure 6.13 présente les caractéristiques tension-courant des éléments non linéaires A_0 et A_1 pour les parafoudres considérés dans les simulations. Ces éléments ont été modélisés en adoptant le modèle statique de la résistance non linéaire type 92 à variation exponentielle.

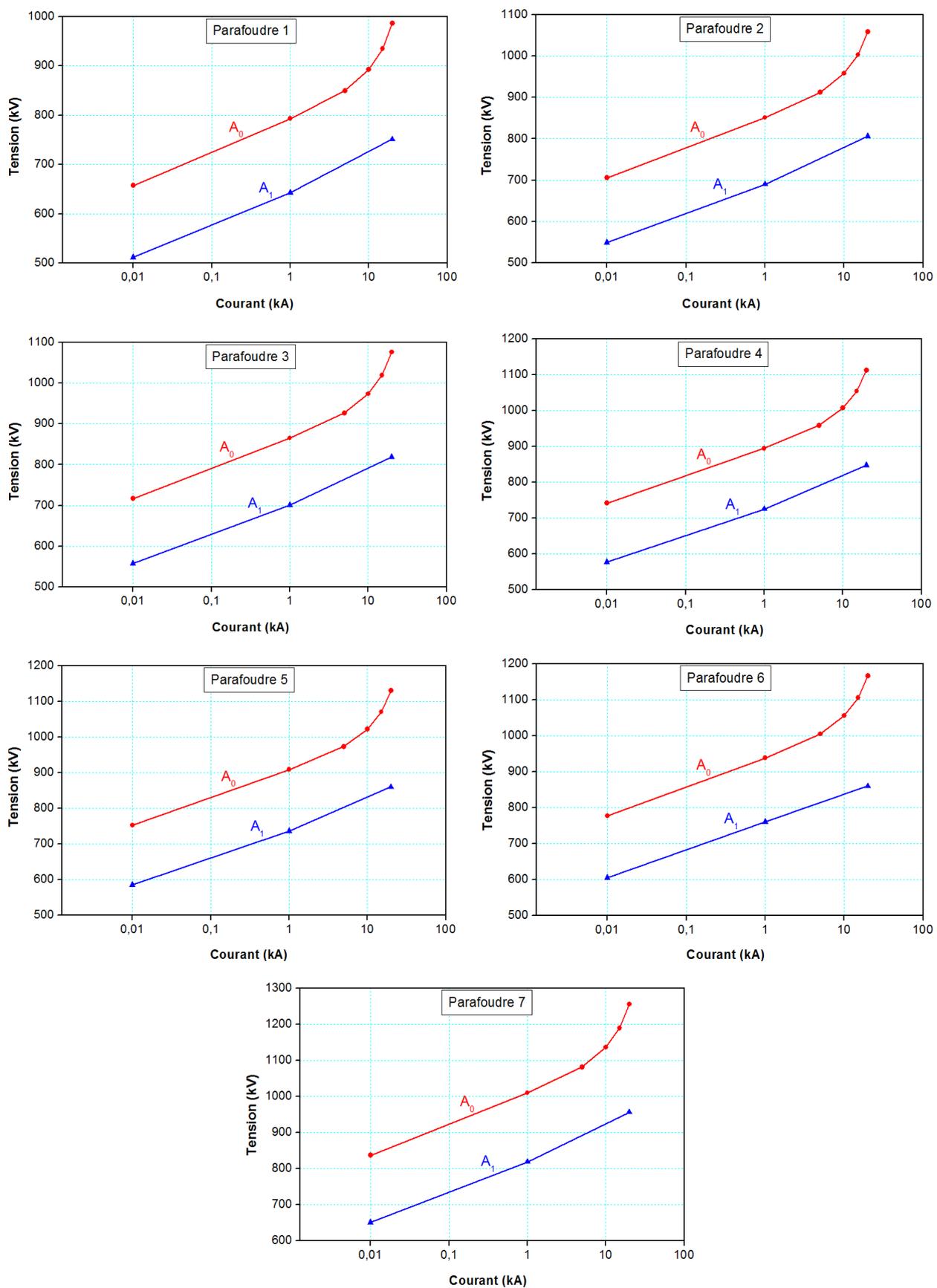


Figure 6.13 Caractéristiques VI des parafoudres utilisés

Les simulations ont été répétées pour les types des parafoudres considérés. Les tensions en différents points du poste de transformation pour les 4690 cas ont été enregistrées en considérant la protection des autotransformateurs seuls.

Le tableau 6.7 présente les tensions obtenues dans les points les plus importants. Ils correspondent au cas où le courant de foudre possède une amplitude de 18 kA et une onde de 1,04/133 μ s tombant sur la phase A de la portée 5 à une distance de 1560 m à partir du poste. En examinant ces résultats, nous pouvons constater que la tension au niveau de l'autotransformateur T_1 est de plus en plus contraignante au fur et à mesure que la tension nominale du parafoudre devient importante. Par ailleurs, ces mêmes résultats montrent que l'installation des parafoudres ZnO au niveau des autotransformateurs seuls n'apporte pas une solution rigoureuse. En effet, cette protection n'est que locale et les équipements raccordés en d'autres points du poste ne sont pas protégés.

Tableau 6.7 Tensions enregistrées dans le poste

Points de mesure	Parafoudre 1	Parafoudre 2	Parafoudre 3	Parafoudre 4	Parafoudre 5	Parafoudre 6	Parafoudre 7
M1	1145	1205	1230	1241	1264	1322	1190
M7	737	803	831	844	871	938	780
M9	780	848	875	889	915	983	827

6.4.1. Scénario_a

Comme il a été déjà mentionné, le premier scénario consiste à fixer la valeur du BIL et le type du parafoudre et ensuite déterminer le MTBF correspondant. Nous ne présenterons ici que quelques résultats.

La figure 6.14 présente les résultats de simulation dans le cas où le parafoudre 3 est utilisé pour deux valeurs du BIL prises égales aux valeurs normalisées de 1050 et 1175 kV respectivement. Il a été constaté que pour la zone d'exploitation recommandée par les standards internationaux qui exigent une marge de sécurité dans un intervalle compris entre 15 et 20% du BIL, le MTBF obtenu pour le BIL 1050 kV se range entre 4 et 35 ans. Cependant, celui correspondant au BIL 1175 kV est supérieur à 165 ans. Ce qui signifie dans ce cas, un renforcement de l'isolation qui n'est pas toujours une solution à retenir.

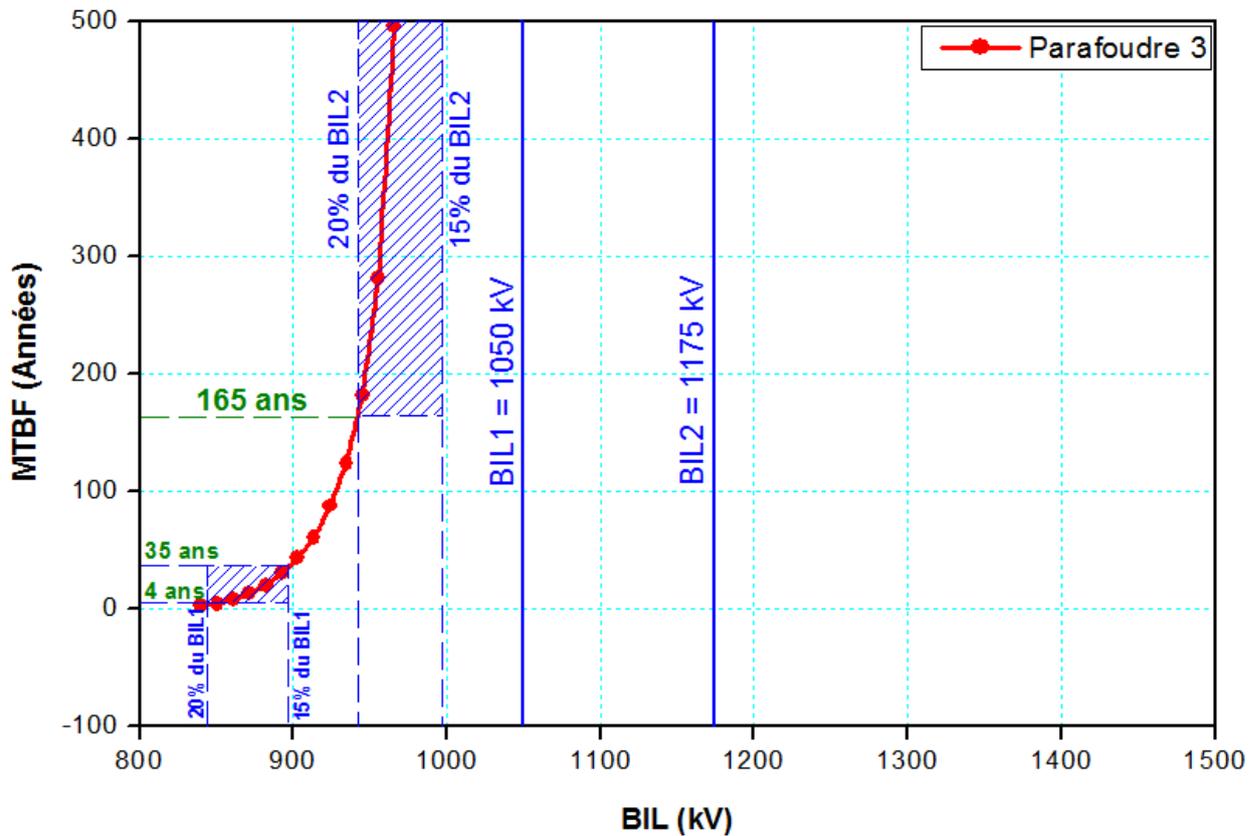


Figure 6.14 Sélection du MTBF correspondant à un BIL de 1050 kV et 1175 kV (cas du parafoudre 3)

Un deuxième exemple est choisi. Il s'agit du cas où le parafoudre 5 est installé. La valeur du BIL est maintenant prise égale à 1175 kV. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure 6.15.

En examinant cette figure, Il est bien clair que le MTBF se range entre 35 et 230 ans, en tenant compte bien sûr des marges de sécurité exigées par les standards internationaux.

Finalement un dernier exemple de ce scénario est présenté. Dans ce cas, le parafoudre 6 est installé en considérant un BIL de 1300 kV. La figure 6.16 présente les résultats obtenus. Comme on peut le voir, le MTBF est supérieur à 410 ans.

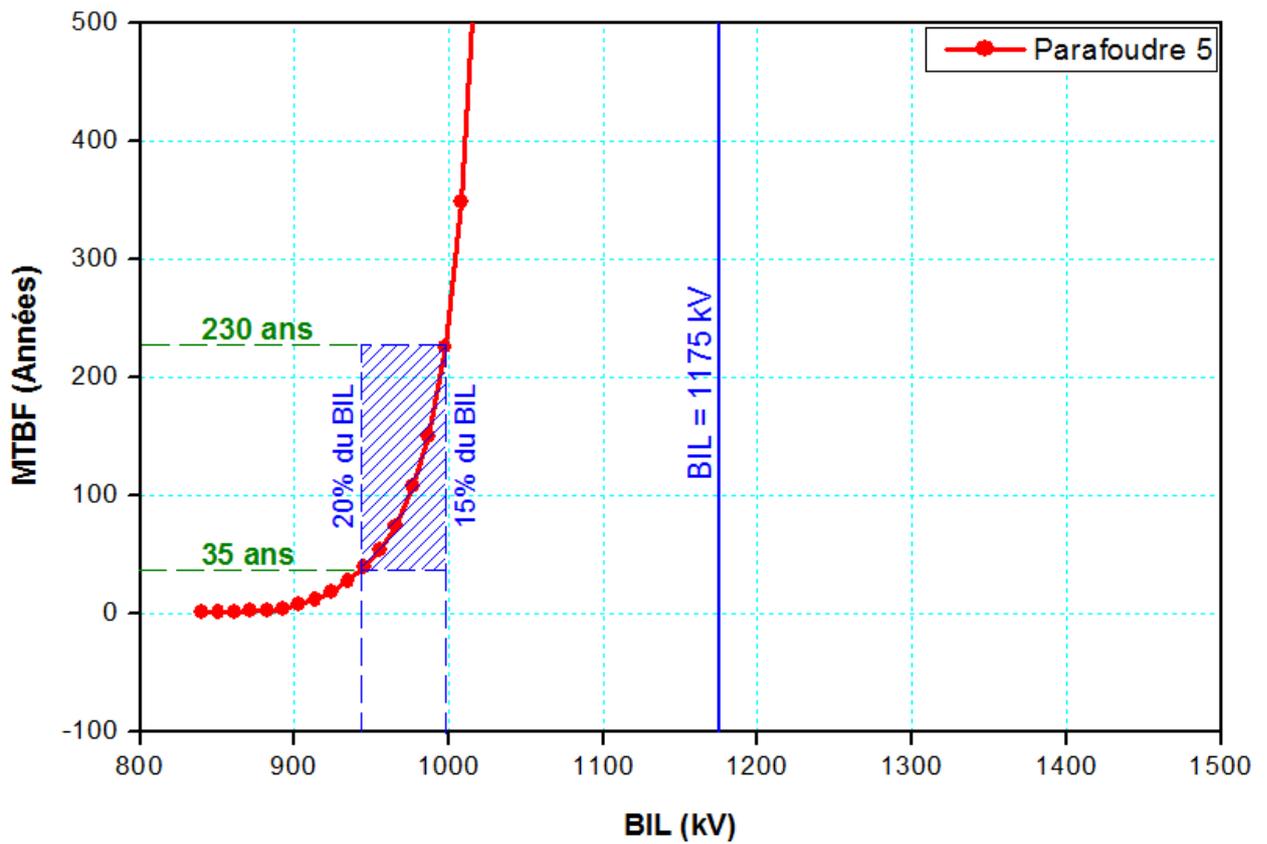


Figure 6.15 Sélection du MTBF correspondant à un BIL = 1175 kV (cas du parafoudre 5)

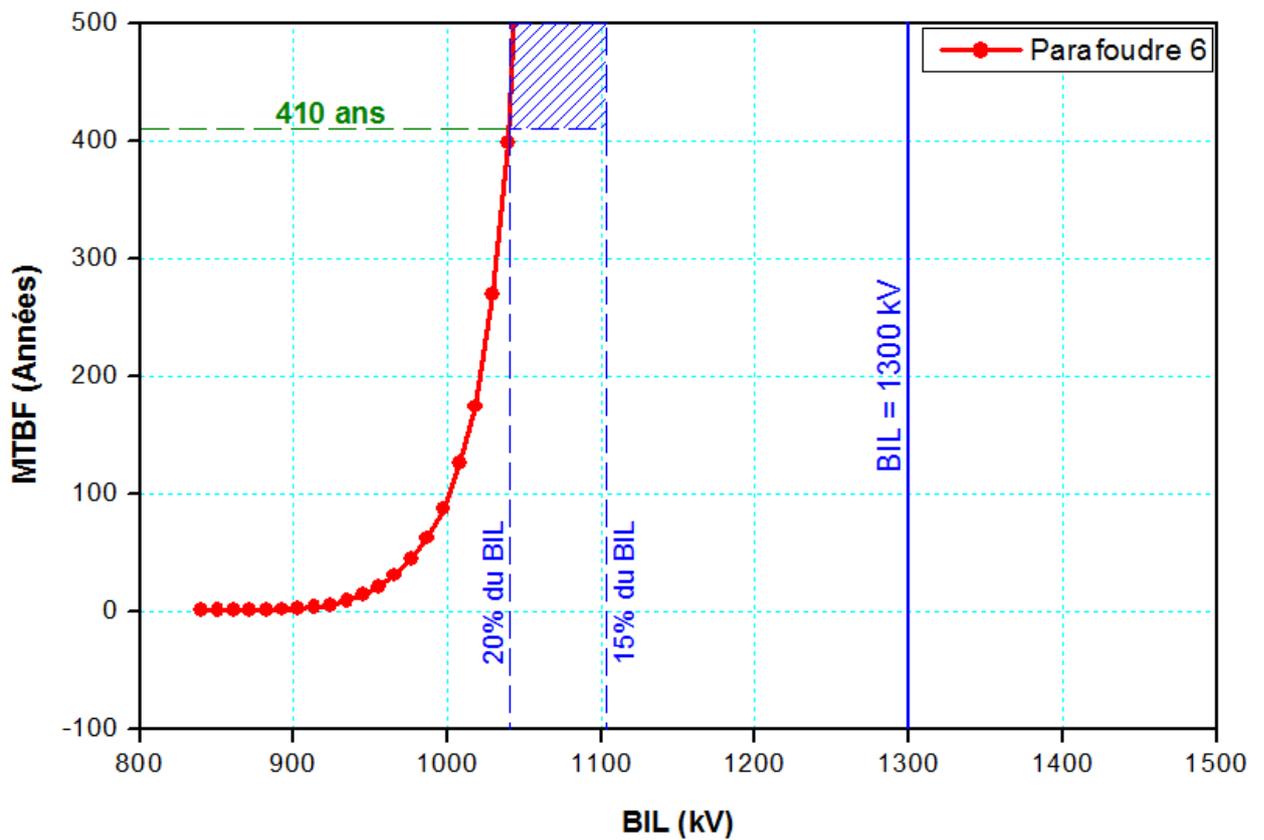


Figure 6.16 Sélection du MTBF correspondant à un BIL = 1300 kV (cas du parafoudre 6)

6.4.2. Scénario_b

Ce Scénario concerne le cas où la valeur désirée du MTBF est exigé avec un parafoudre choisi préalablement et la question qui se pose est : Quelle est la valeur du BIL adéquate ?

Dans une telle situation, le point (de fonctionnement) donnant le BIL nécessaire est le point où se croisent la droite horizontale représentant la valeur du MTBF désirée et la courbe donnant la variation du MTBF en fonction du BIL correspondant au parafoudre choisi.

La figure 6.17 montre le cas où le parafoudre 4 et le MTBF de 150 ans ont été choisis.

Dans ce cas, le BIL nécessaire correspondant aux exigences internationales est situé à l'intérieur de l'écart formé par les marges de sécurité (15 à 20%) de la valeur de BIL de 1175 kV. Ce BIL est donc sélectionné pour ce système.

Comme il peut également y avoir un cas où le point de fonctionnement n'est pas situé dans la zone de sécurité d'un BIL standard. Pour ce cas, la plus grande valeur du BIL standard est sélectionnée. Cette décision est acceptée seulement si ce point, relatif aux autres parafoudres, ne fait pas partie de la zone d'exploitation du BIL inférieur, sinon le BIL inférieur est choisi.

Sur la figure 6.18, le point de fonctionnement qui garantit l'utilisation du parafoudre 2 avec un MTBF de 125 ans se situe entre les écarts de sécurité des deux valeurs du BIL 1050 kV et 1175 kV. Comme l'emploi du parafoudre 1 a permis de le situer dans la zone de sécurité correspondant au BIL 1050 kV, cette valeur du BIL est adoptée.

Cependant, pour la figure 6.19, le point de fonctionnement du parafoudre 7 avec un MTBF de 300 ans se situe entre les écarts de sécurité des deux valeurs du BIL 1300 kV et 1425 kV. Comme l'emploi des autres parafoudres (1 à 6) n'a pas permis de le situer dans la zone de sécurité correspondante au BIL 1300 kV, il a été décidé qu'un renforcement de l'isolation est nécessaire et par suite le BIL 1425 kV est choisi.

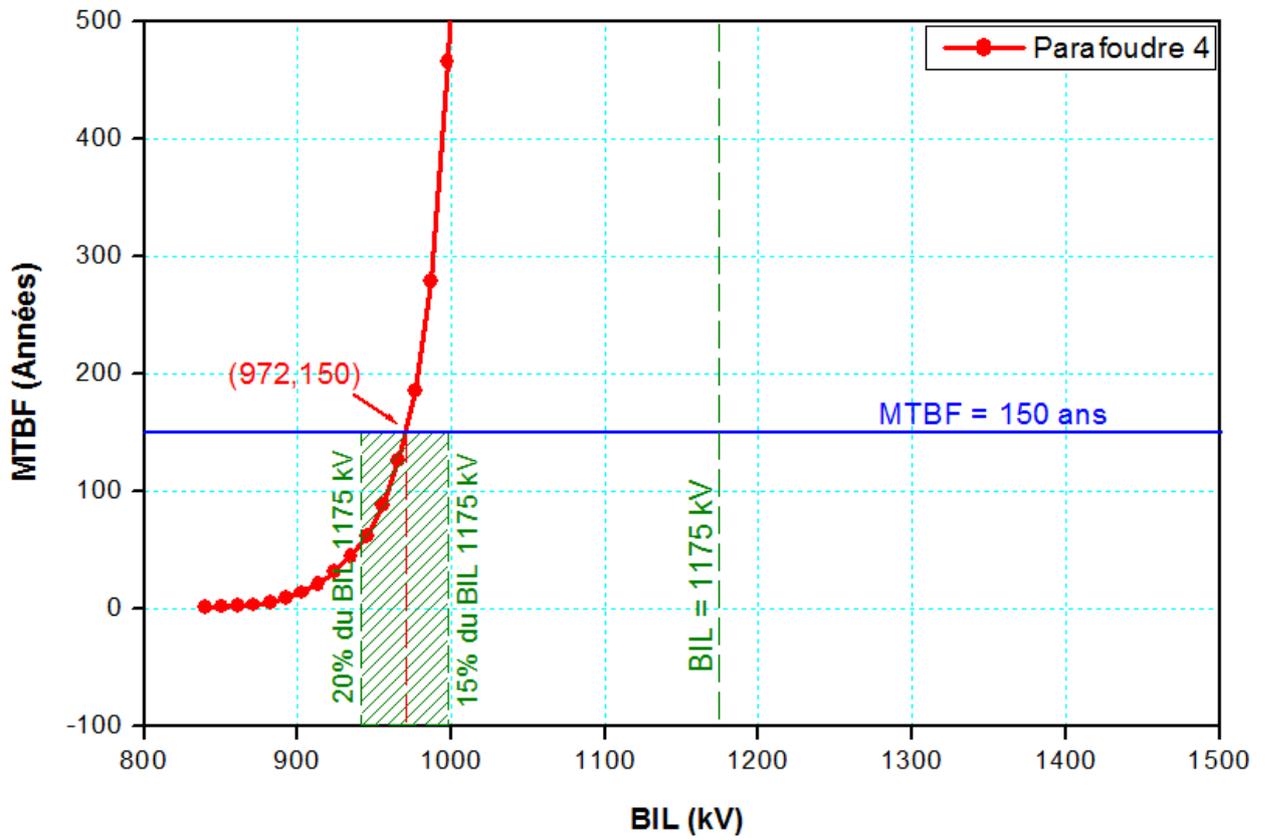


Figure 6.17 Sélection du BIL correspondant à un MTBF = 150 ans (cas du parafoudre 4)

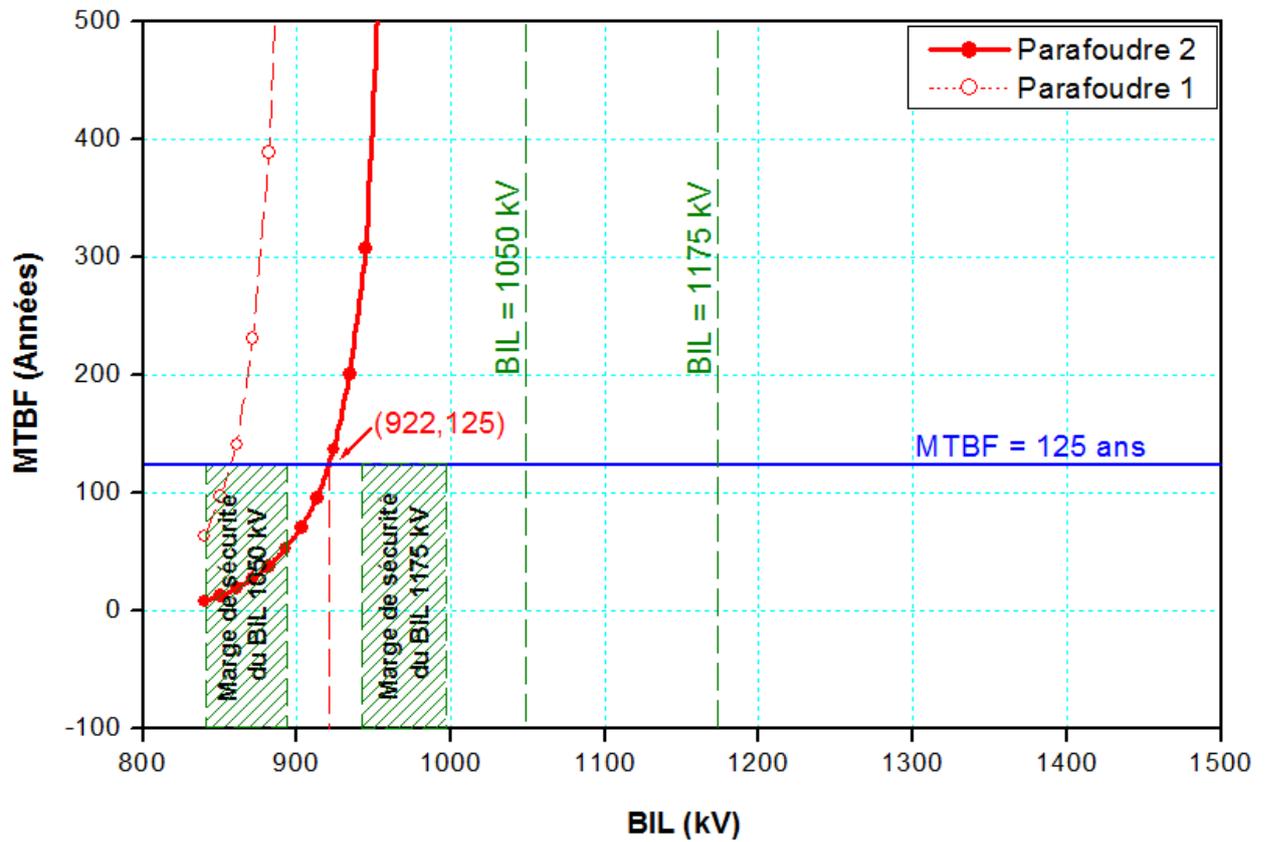


Figure 6.18 Sélection du BIL correspondant à un MTBF = 125 ans (cas du parafoudre 2)

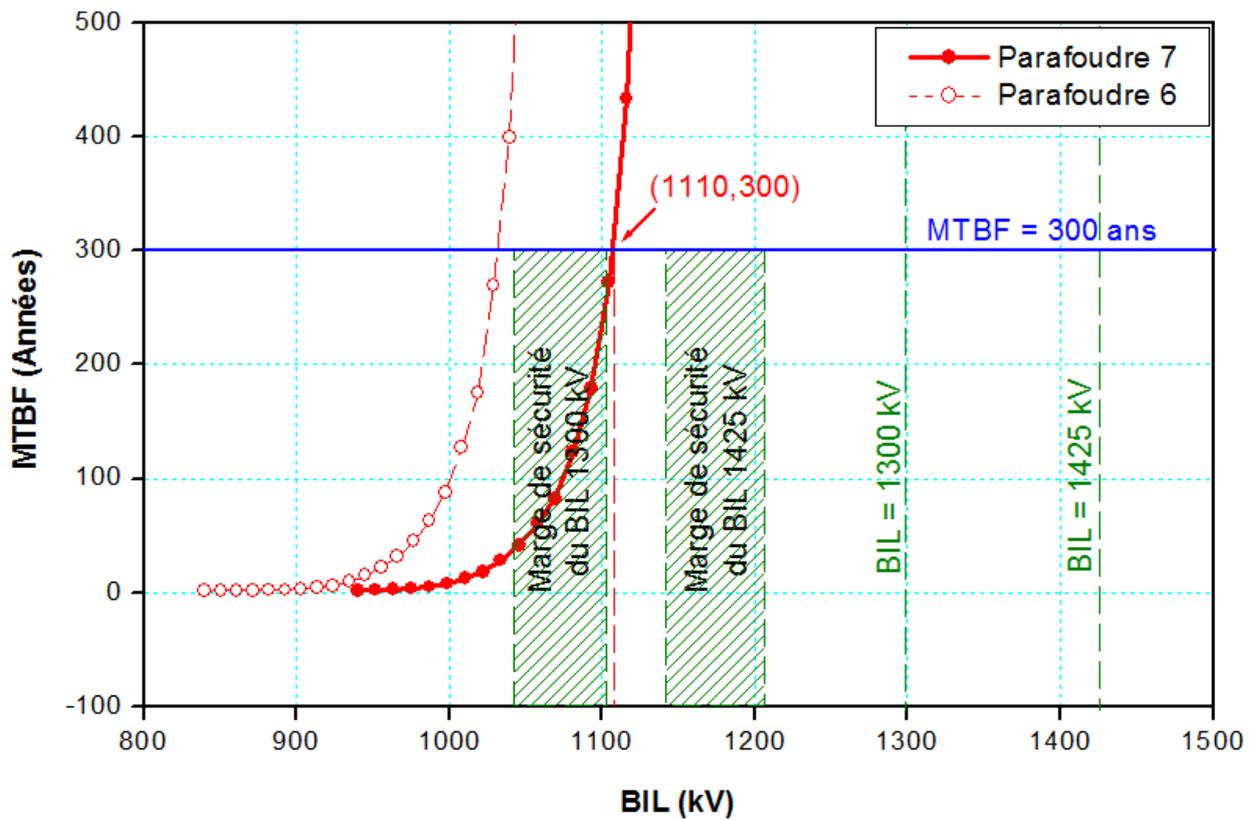


Figure 6.19 Sélection du BIL correspondant à un MTBF = 300 ans (cas du parafoudre 7)

6.4.3. Scénario_c

Enfin, il est possible dans la conception des postes de transformation d'exiger le BIL et également le MTBF et à partir de là, déterminer le type de parafoudre adéquat. Dans ce cas, il est nécessaire de simuler le système pour chaque type de parafoudre. Par conséquent, une famille de courbes donnant la variation du MTBF en fonction du BIL correspondant aux parafoudres utilisés est obtenue. Cette famille de courbes permettra de localiser le parafoudre qui correspond aux valeurs désirées de BIL et du MTBF.

Dans cette partie du travail, un ensemble de 7 parafoudres ont été évalués. A cet effet, trois exemples ont été choisis comme il est montré dans le tableau 6.8.

La figure 6.20 présente le premier cas où le BIL 1050 kV et le MTBF 200 ans sont sélectionnés. A partir de cette figure, il a été décidé que le parafoudre 1 est le mieux placé pour répondre aux exigences internationales.

Tableau 6.8 Exemples choisis

Cas étudié	MTBF (Années)	BIL (kV)
Cas1	200	1050
Cas 2	150	1175
Cas 3	100	1300

La figure 6.21 présente le second cas où le BIL sélectionné est de 1175 kV et le MTBF désiré est d'environ 150 ans. Dans ce cas de figure, les parafoudres 4 et 5 sont choisis.

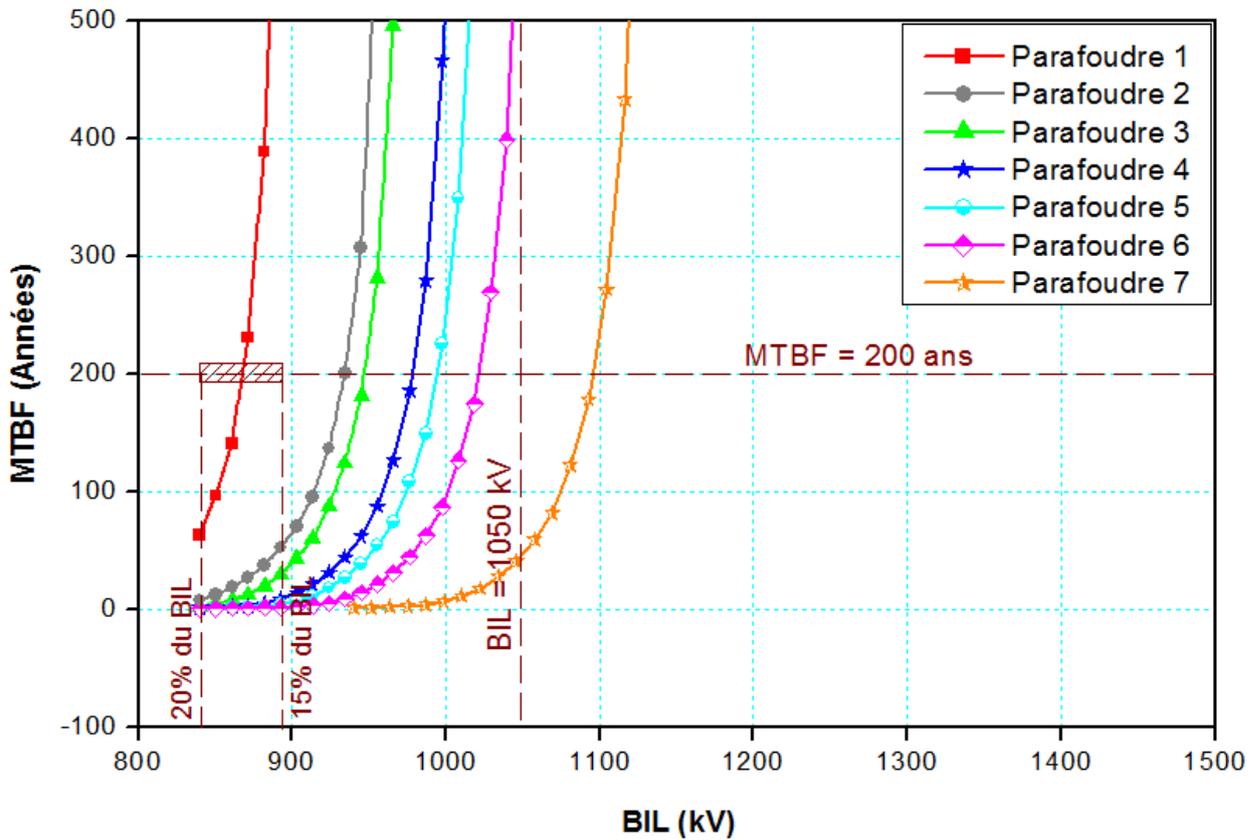


Figure 6.20 Sélection du parafoudre correspondant à un BIL = 1050 kV et MTBF = 200 ans

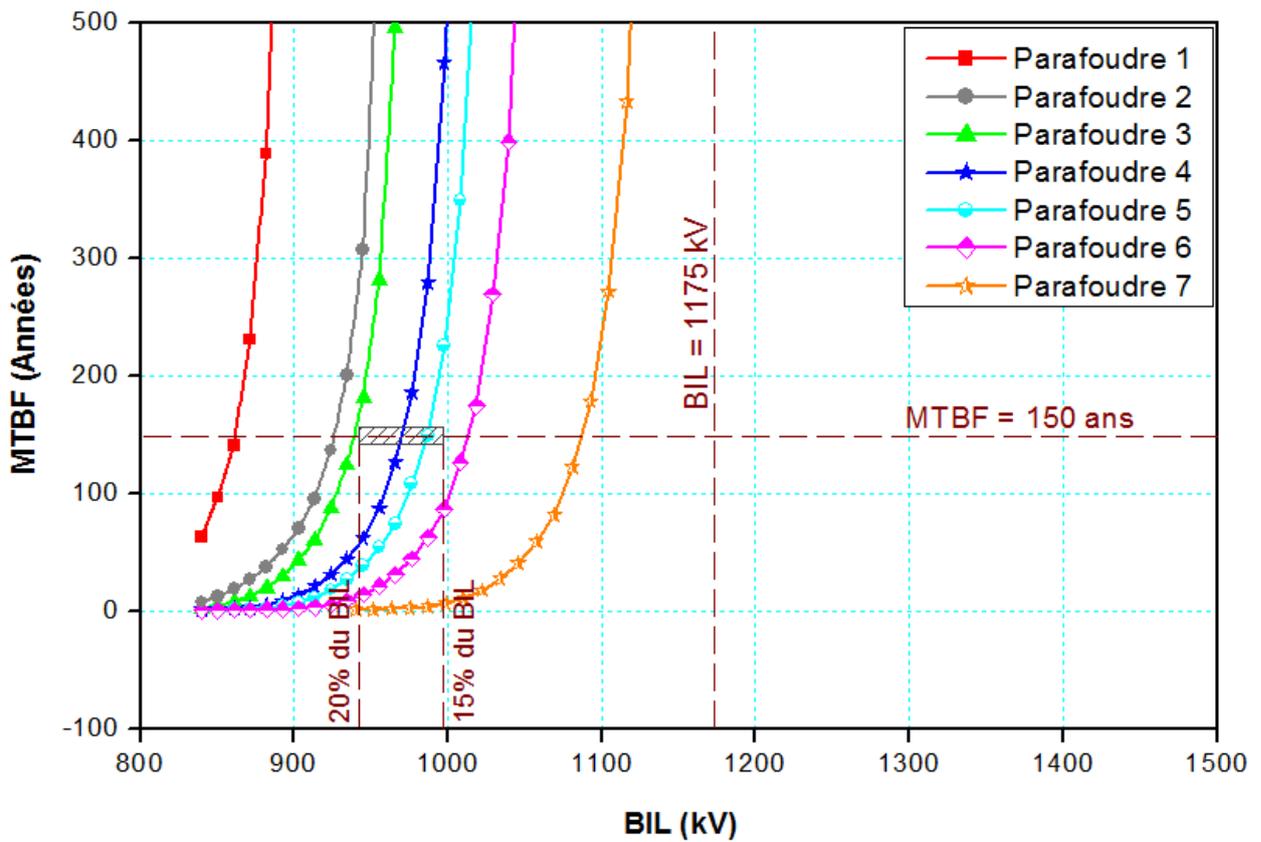


Figure 6.21 Sélection du parafoudre correspondant à un BIL = 1175 kV et MTBF = 150 ans

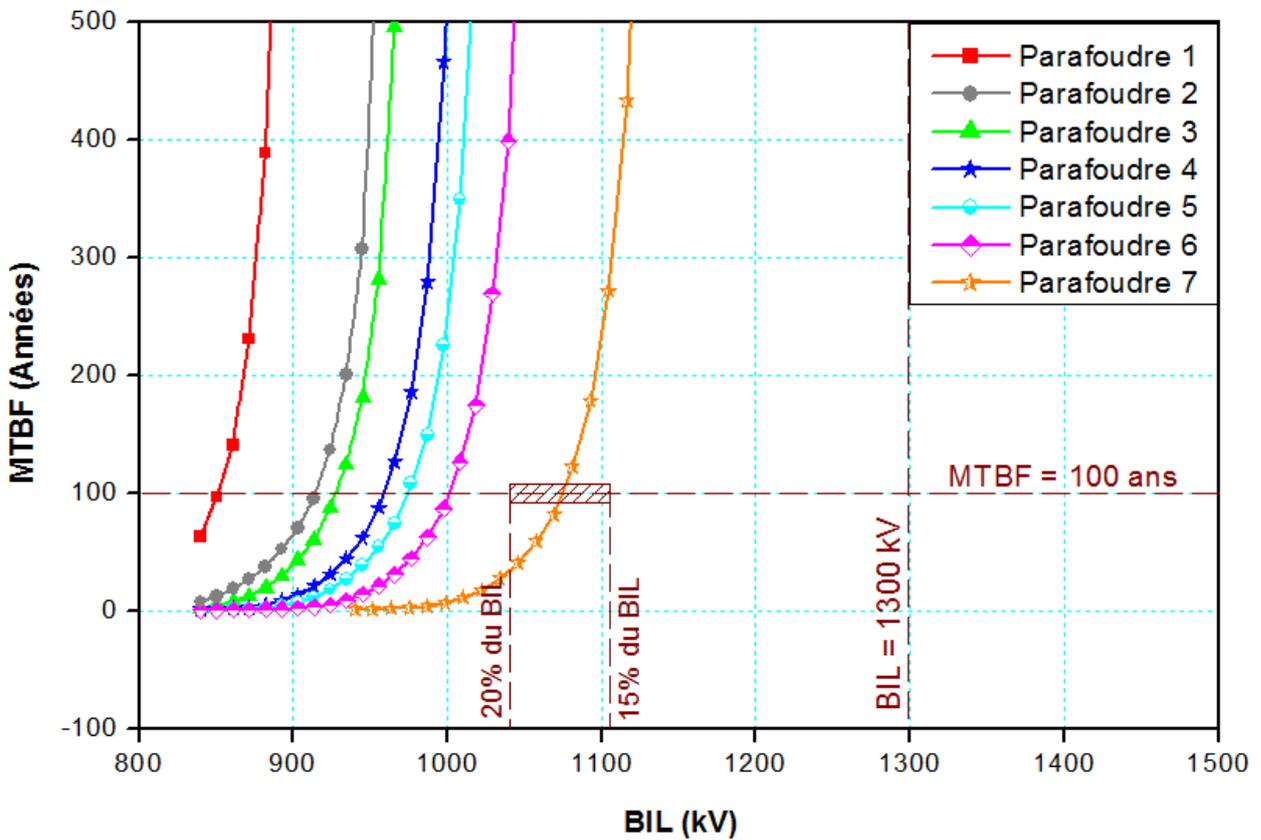


Figure 6.22 Sélection du parafoudre correspondant à un BIL = 1300 kV et MTBF = 100 ans

Le dernier exemple concerne le cas où les valeurs choisies du BIL et du MTBF sont respectivement 1300 kV et 100 ans. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure 6.22. Il est facile de voir que le parafoudre 7 répond positivement aux normes internationales.

En conclusion de cette partie, il est bien clair que le choix du parafoudre est étroitement lié aux valeurs du MTBF et du BIL.

6.5. Influence de l'effet couronne

Lorsqu'un coup de foudre tombe sur une ligne de transport, une surtension relativement élevée se propage sur les conducteurs dépassant la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne. Une certaine quantité d'énergie est extraite de l'onde de choc qui est dissipée dans les réactions d'ionisation des molécules d'air. Il en résulte une réduction des niveaux des surtensions, et une déformation notable de leur forme d'onde qui est principalement marquée par un changement considérable de la raideur du front d'onde. Ainsi, l'effet couronne constitue un facteur important dans les études de la coordination des isolements et du dimensionnement des réseaux électriques et, par conséquent, une réduction du coût.

Pour compléter cette étude, l'effet couronne a été introduit et représenté par le circuit équivalent montré sur la figure 4.6. Il est à signaler que le programme a été exécuté à deux reprises. La première en absence de l'effet couronne et la seconde en sa présence. Il est aussi important de souligner que le nombre de simulation et les points d'impact des coups de foudre ont été maintenus fixes. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 6.9.

Tableau 6.9 Influence de l'effet couronne

Scénario	Nombre de simulations (Nb de cas qui tombent sur la ligne)	Nombre de contournements	Taux de contournement (LFOR) (par 100 km et an)	MTBF (Années) (BIL=900kV)	Temps de simulation (s)
Sans l'effet couronne	9214	4786	3,9883	60	853
Avec l'effet couronne	9214	4690	3,9083	71	1008,7
Différence	0	96	0.08	11	155,7

Le nombre de contournements dépend de la valeur maximale du courant appliqué et de la forme d'onde correspondante. Dans le tableau 6.9, il est montré comment ce nombre dépend de l'effet couronne pour le système étudié. D'après les résultats présentés, une surestimation du nombre de contournements induits par la foudre est prédite, si l'effet couronne n'est pas inclus dans l'analyse. La prévision donne une différence égale à 96. Cela peut être expliqué par le fait que l'atténuation des surtensions au niveau de ligne suite à l'apparition de l'effet couronne diminue le nombre de défauts enregistrés au poste. En outre, la valeur du MBTF est plus faible que pour le cas où l'effet couronne est considéré.

6.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une procédure pour l'évaluation de la coordination des isolements du poste à isolation dans l'air à été proposée. Cette procédure est basée sur une application MATLAB-EMTP. MATLAB permet aux utilisateurs de créer des environnements ouverts qui tirent parti des capacités informatiques de haut niveau et de la possibilité d'utiliser le calcul parallèle, dont le calcul des surtensions en différents points du système électrique étudié est réalisé par l'EMTP. Un environnement multi processeur est élaboré pour accélérer les calculs dans lequel les simulations ATP étaient réparties entre 40 processeurs. Le temps de simulation nécessaire pour réaliser l'étude complète pour chaque cas était autour de 15 minutes. C'est un progrès significatif par rapport au cas d'un seul processeur qui nécessite environ 10 heures pour obtenir les mêmes résultats.

L'étude présentée ici a permis non seulement d'estimer le MTBF des équipements du poste mais également de sélectionner les parafoudres nécessaires et les BIL adéquats.

D'après les résultats présentés précédemment, le poste avec le BIL sélectionné (1425 kV) est surdimensionné, en d'autres termes le renforcement d'isolation adopté est inutile influant négativement sur le coût total du poste.

7.1. Introduction

L'un des principaux objectifs dans la conception des équipements des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique consiste à les rendre fiables quelque soient les conditions environnementales. De plus, dans les régions foudroyées, s'ajoute le problème de la décharge électrique. Cette dernière rend la tenue diélectrique des équipements électriques incapable et entraîne la diminution de la rigidité diélectrique du système d'isolation et ainsi la fiabilité des réseaux électriques.

Un calcul précis des surtensions dues à la foudre est donc un élément important pour l'analyse et la conception des postes et des lignes de transport aériennes qui y sont raccordées. Les différentes parties du système électrique impliquées dans les calculs de foudre doivent être représentées en prenant en compte les plages de fréquences des transitoires associées à la foudre. De plus, les procédures à utiliser dans ces calculs doivent être développées en tenant compte du caractère aléatoire des phénomènes de foudre. Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour estimer les performances de foudre des systèmes électriques. Les approches les plus courantes sont celles qui reposent sur une technique de simulation dans le domaine temporel pour laquelle des procédures et des modèles adéquats des équipements constituant le système doivent être développés.

7.2. Résumé des Résultats

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux contraintes de tension et à leurs pendants, les tenues diélectriques des matériels, tenues qui caractérisent la capacité d'une isolation à supporter certains niveaux de tension sans rupture diélectrique, c'est-à-dire, sans amorcer ainsi qu'aux effets électromagnétiques de la foudre et les dispositifs de protection des systèmes électriques. Il est apparu de cette investigation que si on veut améliorer la qualité du service, il est nécessaire de faire un choix rationnel des isollements. Ce qui impose donc à la fois, la connaissance des diverses contraintes

électriques apparaissant dans un réseau, la connaissance de la réponse des isolations à ces contraintes, celle des caractéristiques de l'appareillage de protection et enfin celle des concepts et des méthodologies utilisées pour la mise en œuvre pratique de la coordination de l'isolement. Un second volet a été réalisé et qui consistait à traiter les points essentiels pour les études de la coordination des isolements. Le processus de la coordination des isolements permet d'obtenir un ensemble de tensions de tenues qui constituent le niveau d'isolement normalisé à spécifier dans les équipements du poste. Nous avons, par ailleurs, montré que l'une des difficultés essentielles du processus de coordination de l'isolement réside dans le fait que tant les contraintes de tension appliquées aux matériels que les tenues diélectriques de ces matériels sont de nature probabiliste ; cette double incertitude rend délicat l'ajustement des tenues diélectriques à spécifier par rapport aux contraintes. Cependant, il a été conclu que la méthode statistique de la coordination des isolements permet d'estimer le taux de défaillance en fonction des facteurs de conception. Un diagramme pour la procédure de détermination des niveaux d'isolement standard est présenté. Pour mener à bien cette étude, il était nécessaire de modéliser le réseau électrique test. Nous nous sommes intéressés alors à la représentation des différents éléments du poste de transformation y compris la ligne de transmission qui y est connectée en utilisant l'EMTP. Par ailleurs, nous avons aussi présenté, discuté et analysé la procédure complète pour englober le phénomène dans sa complexité où il est conclu qu'avant de pouvoir atteindre le stade de la formulation statistique de ce processus aléatoire (stochastique), celui-ci doit être "phénoménologiquement connu". C'est dans cet ordre d'idée que le caractère aléatoire est pris en considération dans le développement de cette application sous environnement MATLAB en se basant sur l'utilisation des méthodes statistiques. Nous avons présenté et discuté des concepts et des définitions nécessaires à l'utilisation de cette méthode et à son adaptation au cas de la foudre. Particulièrement la corrélation qui existe entre l'amplitude du courant et son temps du front pour laquelle le taux du contournement est très sensible. De ce fait, elle est prise en considération dans la présente étude.

Enfin la dernière partie réalisée concerne les résultats obtenus et leurs discussions.

Les simulations effectuées ont montré que les amplitudes de courant qui tombent sur les conducteurs de phase étaient toujours inférieures à 20 kA, et qu'un seul cas

causant un contournement a été observé. Cependant, le nombre de coups de foudre sur le câble de garde était beaucoup plus élevé dont les amplitudes de courant qui provoquent des contournements sont supérieures à 47 kA.

Selon les résultats présentés, il est intéressant d'indiquer qu'il y a des coups de foudre sur le pylône ou sur le câble de garde avec des amplitudes de courant élevées qui n'ont pas provoqué des contournements; ceci est essentiellement dû au temps du front des crêtes importants associés à ces amplitudes durant le processus de génération.

L'étude présentée ici a montré aussi qu'une surestimation du nombre de contournements induits par la foudre est prédite, si l'effet couronne n'est pas inclus dans l'analyse conduisant à un BIL plus faible que pour le cas où l'effet couronne est considéré.

Cette étude a, par ailleurs, permis non seulement d'estimer le MTBF des équipements du poste mais également de sélectionner les parafoudres nécessaires et les BIL adéquats.

Un environnement multi processeur est élaboré pour accélérer les calculs dans lequel les simulations ATP étaient réparties entre 40 processeurs. Le temps de simulation nécessaire pour réaliser l'étude complète pour chaque cas était autour de 15 minutes. C'est un gain en temps significatif par rapport au cas d'un seul processeur qui nécessite environ 10 heures pour obtenir les mêmes résultats.

7.3. Recommandations de recherche futures

Dans cette étude une application MATLAB-EMTP a été développée pour l'étude de la coordination des isolements. La présente étude a montré aussi qu'une estimation du nombre de contournements induits par la foudre est prédite. Elle a, par ailleurs, permis non seulement d'estimer le MTBF mais également de sélectionner les parafoudres nécessaires et les BIL adéquats. L'application fait appel à un environnement multi processeur pour accélérer les calculs dans lequel les simulations ATP étaient réparties entre 40 processeurs.

Cependant, certains aspects peuvent encore affecter les performances de cette application et des recherches supplémentaires sont suggérées pour optimiser ses performances.

- Quelques parties du système impliquées dans les calculs doivent être développées d'une manière plus élaborée, tel que l'effet couronne, en prenant en compte les plages de fréquences des transitoires mis en jeu.
- Les procédures à utiliser pour la mise en œuvre pratique de la coordination des isolements doivent être développées en tenant compte du caractère aléatoire et de la phénoménologie de la foudre.
- Les résultats peuvent aussi être améliorés davantage si l'approche est raffinée. Dans ce cas, elle doit reposer sur une technique de simulation dans le domaine temporel pour laquelle la procédure prendra en considération les amorçages entre phases qui peuvent survenir dans le système.

Annexe A.

Caractéristiques Générales du transformateur de OUED EL-ATHMANIA 400kV

VATECH JST			
Nombre de phase 3	IEC_60067	F = 50 Hz	Année 2004
	THT	HT	MT
Tension nominale	400000 V	225000 V	30000 V
Courant nominal	722 A	1283 A	9612 A
Tension de tenue au choc	1425 kV	1050 kV	630 kV
Puissance nominale	THT/HT 166,67MVA	THT/HT 166,67MVA	HT/MT 166.67MVA
Tension de Court circuit	166,67 MVA 166,67 MVA 166,67 MVA		15,21 14,75 14,7
Symbole de couplage Echauffement d'huile Echauffement des enroulements Mode refroidissement		YNaOd11 50 °K 55 °K ONAN/ONAF/ODAF	

Caractéristiques des chaînes d'isolateurs 400kV

	Nombre d'assiette	pas	La longueur totale de la chaîne
Chaîne double de suspension	35	0,16m	5,6m
Chaîne double d'ancrage	35	0,16m	5,6m

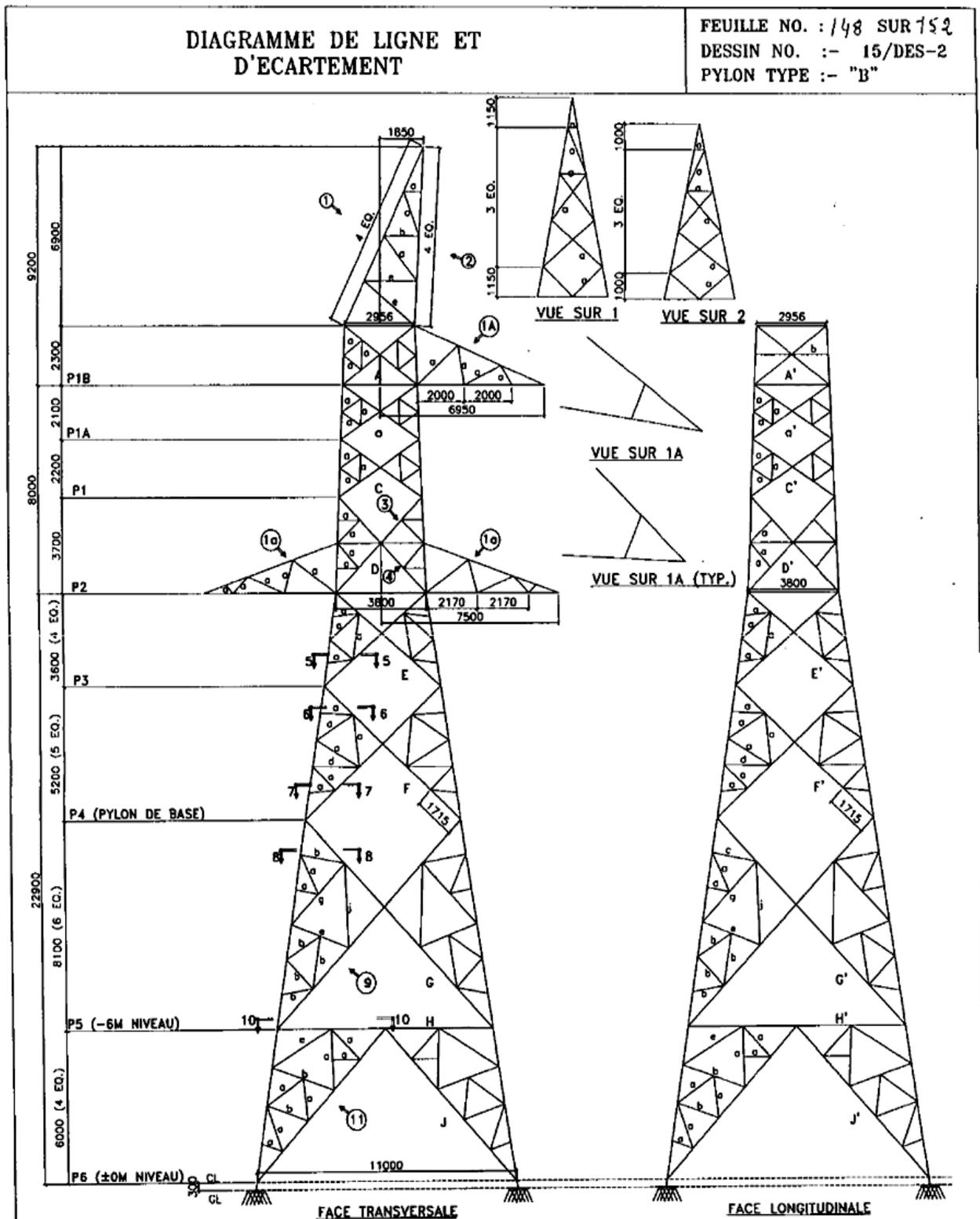
Caractéristiques des jeux de barres du poste de OUED EL-ATHMANIA 400kV

Type	AGS
Diamètre intérieur	180mm
Diamètre extérieur	200mm
Epaisseur de la paroi	10mm
La flèche	Négligeable

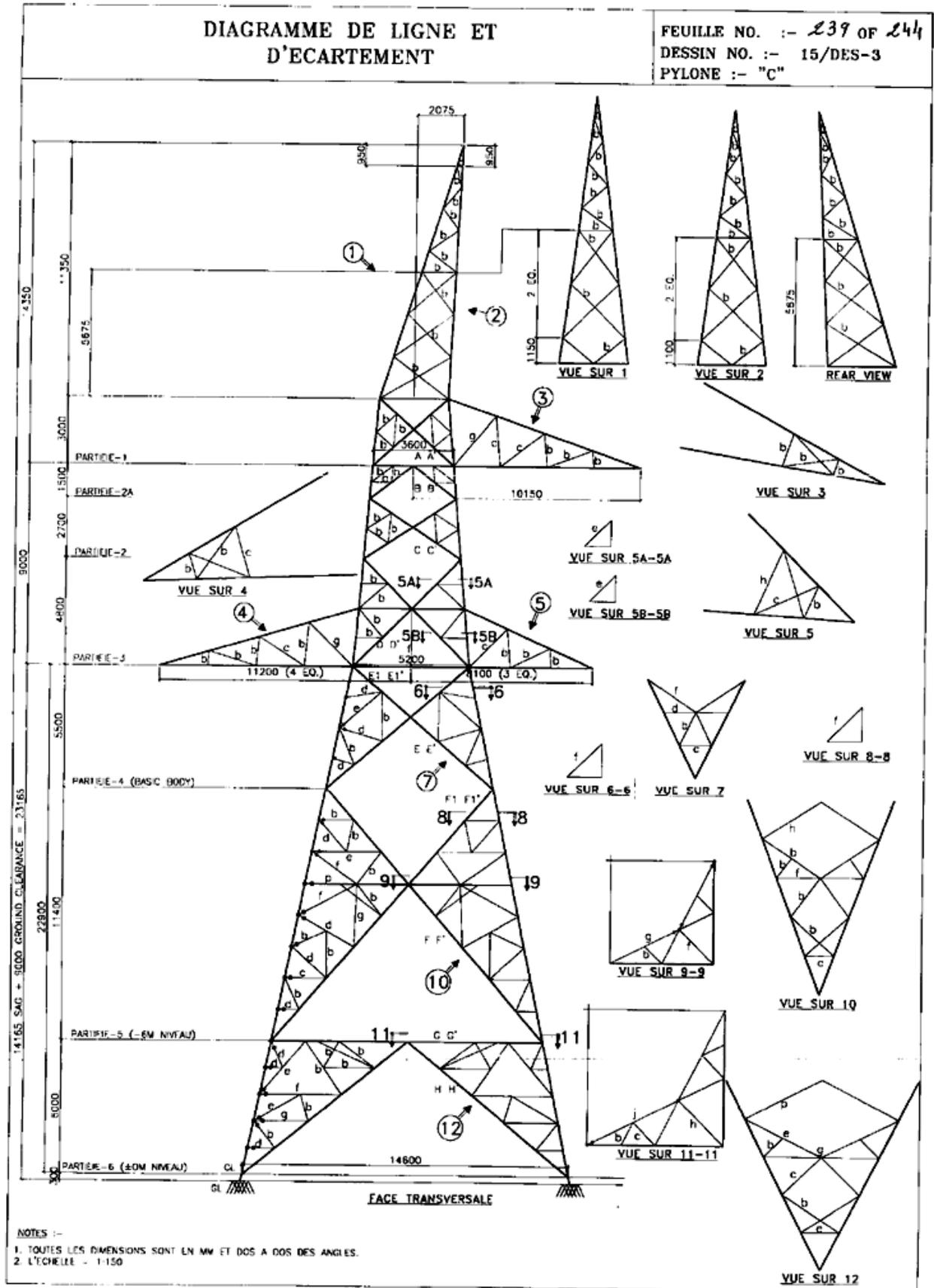
Caractéristiques des parafoudres 400kV

Constructeur	SIEMENS
Type	3EP33336-3PH43-2CB1
Tension de régime permanent	268 KV
Tension assignée du parafoudre	336 KV
Courant nominal de décharge	20 KA
Tension résiduelle de 1/2 μ s à 10kA 8/20 μ s à 10kA 30/80 μ s à 1kA	949 KV 806 KV 677 KV
Tension de tenue diélectrique au sec : Sous pluie :	
Tension de tenue à l'onde 1.2/50 μ s	2313 KV
Tension de tenue aux ondes de courant de longue durée	1200 A
Classe de décharge en pouvoir d'absorption d'énergie	4 (10Kj/KV)
Classe du limiter de pression	A 65 KA
Caractéristique d'isolement	Porcelaine
Bornes HT : -Type et nature -Dimensions -dispositions	Boulon Ø80mm x 30mm Verticale
Line de fuite	14025 mm
Effort en tête	6900 N
Poids	694 kg

Pylône type B. 400 kV



Pylône type C. 400 kV



Caractéristique mécanique des parafoudres

Tension maximale du système	Tension nominale	Enveloppe	Ligne de fuite	Isolation externe	Dimensions								
	Um				Ur	1.2/50 μ s sec	50 Hz humide (60s)	60 Hz humide (10s)	250/2500 μ s humide	Masse	A _{max}	B	C
	kV _{rms}		mm	kV crête	kV _{rms}	kV _{rms}	kV crête	kg	mm	mm	mm	mm	
420	330-360	GM420	8864	1548	756	718	1232	325	3245	1200	1000	600	5
	330-336	GH420	11002	1946	934	905	1540	405	4190	1800	1000	1000	6
	360-372	GH420	11002	1946	934	905	1540	405	4190	1400	1000	700	6
	378-420	GH420	11002	1946	934	905	1540	405	4190	1200	1000	600	6
	330-396	GV420	13296	2322	1134	1077	1848	460	4850	1600	1000	1000	6
	420	GV420	13296	2322	1134	1077	1848	460	4850	1400	1000	700	6

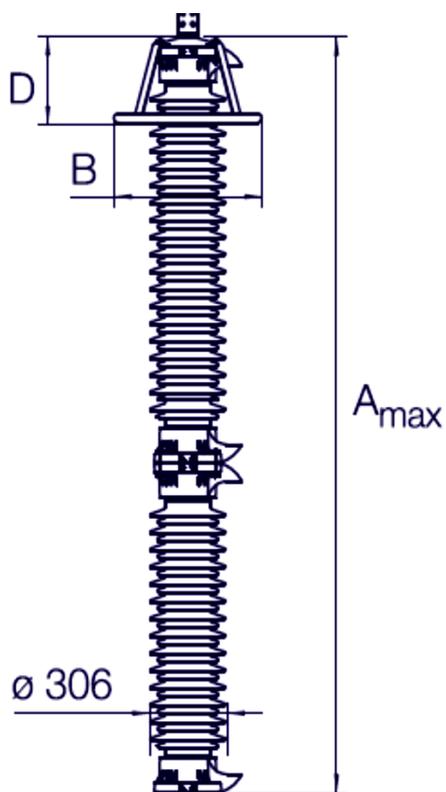


Figure 5

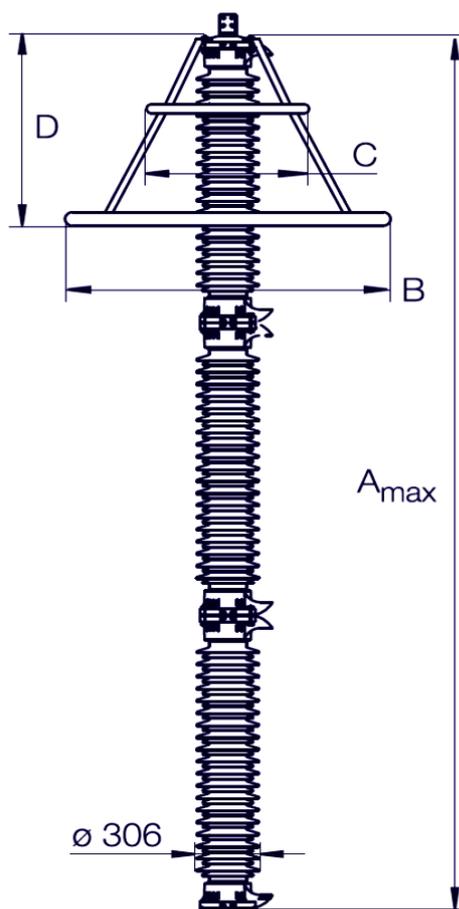


Figure 6

Niveaux d'isolement standard pour U>245 kV [1.1]

Tension maximale de l'équipement (r.m.s.kV)	Tension standard de tenue au choc de manœuvre			Tension standard de tenue au choc de foudre (kV)
	Isolation longitudinale (kV)	Phase-terre (kV)	Phase-phase (taux)	
300	750	750	1,5	850
				950
	750	850	1,5	950
				1050
362	850	850	1,5	950
				1050
	850	950	1,5	1050
				1175
420	850	850	1,6	1050
				1175
	950	950	1,5	1175
				1300
				1300
950	1050	1,5	1425	
			1425	
550	950	950	1,7	1175
				1300
	950	1050	1,6	1300
				1425
				1425
1050	1175	1,5	1550	
1550				
800	1175	1300	1,7	1675
				1800
	1175	1425	1,7	1800
				1950
				1950
1300	1550	1,6	2100	
2100				

Références Bibliographiques

Chapitre 1

- [1.1] **BS EN 60071-1**, “Insulation Co-ordination part 1, Definition, Principles and Rules”, 2006.
- [1.2] **BS EN 60071-2**, “Insulation Co-ordination part 2, Application Guide”, 1997.
- [1.3] **PD IEC TR 60071-4**, “Insulation-Coordination, Part 4: Computational Guide to Insulation-Co-Ordination and Modelling of Electrical Networks”, 2004.
- [1.4] **CIGRE WG 33-01**, “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, CIGRE Brochure 63, 1991.
- [1.5] **J. Takami, S. Okabe, E. Zaima**, “Study of lightning surge overvoltages at substations due to direct lightning strokes to phase conductors”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 25, N^o. 1, pp. 425–433, 2010.
- [1.6] **W. Nowak, R. Tarko**, “Computer modelling and analysis of lightning surges in HV substations due to shielding failure”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 25, N^o. 2, pp. 1138–1145, 2010.
- [1.7] **A.R. Hileman**, “Insulation Coordination for Power Systems”, Marcel Dekker, 1999.
- [1.8] **P.Alto**, “Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above”, Second Edition, Electric Power Research Institute, California, 1982.
- [1.9] **J.A. Martinez, F. Castro-Aranda**, “Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 20, N^o. 3, pp. 2200–2210, 2005.
- [1.10] **Benoît de Metz–Noblat**, “La foudre et les installations électriques HT”, Cahier Technique Merlin Gerin, N^o 168 / p.5, édition juillet 1993.
- [1.11] **H.W. Dommel**, “Electromagnetic Transients Program Theory Book”, BPA, Portland, USA, 1986.

Chapitre 2

- [2.1] **Djalel Dib**, “Impact de la foudre sur les réseaux électriques étude, analyse et modélisation”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [2.2] **Joel estuardo zambrano bonilla**, “Análisis de la Coordinación de Aislamiento de la Línea Quixal Tactic”, Trabajo de Graduación, Universidad de San Carlos, Guatemala, 2011.
-

- [2.3] **Louis-Jonardan Gallin**, “Caratérisation acoustique des éclairs d’orage”, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Paris, 2014.
- [2.4] **J.Affolter**, “Haute Tension”, IEVD (école d’Ingénieurs du Canton de Vaud) Yverdon-les-Bains, Octobre 2000.
- [2.5] **F. Maciela**, “Parafoudres”, Technique de l’ingénieur, [D4755], 1998.
- [2.6] **BS EN 60099-4**, “Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems”, incorporating amendment N°1 Surge arresters Part 4, 1993.
- [2.7] **Christophe Séraudie**, “Surtensions et parafoudres en BT-coordination de l’isolement en BT-” Cahier Technique Merlin Gerin, N° 179 / p.15, édition septembre 1995.
- [2.8] **Volker Hinrichsen**, “Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Transmission and Distribution Systems”, Siemens PTD, Berlin 2001.

Chapitre 3

- [3.1] **D. Fulchiron**, “Overvoltages and insulation coordination in MV and HV”, Cahier Technique Merlin Gerin, N° 151 / p.3, édition Février, 1995.
- [3.2] **A. Sabot et J.Michaud**, “Lignes et postes Choix et coordination des isolements”, D-4750 Techniques de l’ingénieur, traité Génie Électrique, 1987.
- [3.3] **AYORA Paúl**, “Selección y Coordinación de Aislamiento, Diseño de Alto Voltaje”, Quito, Clases Dictadas, 2008.
- [3.4] **Tomasz Chmielewski, Akram Abdel-Latif**, “Coordination de l’isolement dans les postes à haute tension”, ABB REVIEW, 2017.
- [3.5] **Nathali Elizabeth Morales Marino**, “Coordination de Aislamiento en surestaciones a Nivel de 500 kV”, proyecto previo a la obtención del título de ingeniera eléctrica, April, 2008.

Chapitre 4

- [4.1] **Sonelgaz Engineering Subcommittee**, “Specifications for the Construction of HV Electrical Substations”, 2004.
- [4.2] **M. T. Correia de Barros, J. Festas, H. Milheiras, N. Felizardo, M. Fernandes**, “Methodologies for evaluating the lightning performance of transmission lines”, (IST - Universidade Técnica de Lisboa / Instituto da Energia - INTERG), Rede Eléctrica Nacional (REN).

- [4.3] Masaru Ishii, Tatsuo Kawamura, Teruya Kouno, Eiichi Ohsaki, Kazuyuki Shiokawa Kaneyoshi Murotani and Takemitsu Higuchi, “Multistory transmission Tower Model For Lightning Surge Analysis”, IEEE Transactions on Power Delivery ,vol. 6, N^o. 3, pp. 1327-1335, July, 1991.
- [4.4] Y. Baba, M. Ishii, “Numerical electromagnetic field analysis on lightning surge response of tower with shield wire”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 15, N^o. 3, pp. 1010–1015, 2000.
- [4.5] T. Hara and O. Yamamoto, “Modeling of a transmission tower for lightning surge analysis”, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, N^o. 3, May, 1996.
- [4.6] L. Grcev, M. Popov,” On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 20, N^o. 2, pp. 1598–1603, 2005.
- [4.7] A.M. Mousa, “The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 9, N^o. 3, pp. 1669–1677, 1994.
- [4.8] T. Shindo, and T. Suzuki, “A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps”, IEEE Transactions on Power Apparatus System, vol. PAS-104, N^o. 6, pp. 1556-1563, June, 1985.
- [4.9] T. Harada, et al, “V-t Characteristics of Air Gaps for steep Front Impulses”, ISH-Milan, vol. 52, N^o. 06, 1979.
- [4.10] S. Bedoui, “Atténuation des surtensions dans les postes de transformation haute tension par l’emploi des parafoudres ZnO ”, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2008.
- [4.11] S. Bedoui, A. Bayadi, “Lightning protection of substation using new surge arrester model with lead wires connection effect”, International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control(ICEEAC), Setif, 2013.
- [4.12] H. Motoyama, A. Ametani, “A development of a linear model of corona wave deformation and its effects on lightning surges”, Electrical Engineering in Japan, vol. 107, N^o. 2, 1987.
- [4.13] IEEE TF on Fast Front Transients, “Modelling guidelines for fast transients”, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 11, N^o. 1, pp. 493–506, 1996.

- [4.14] **A. Bayadi**, “Contribution à l’étude des performances des parafoudres à base d’Oxyde de Zinc soumis à des contraintes transitoires rapides dans les systèmes électriques”, Thèse de Doctorat d’Etat, Université de Sétif, 2005.
- [4.15] **A. Bayadi**, “Parameter identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms”, *Electrical Power System Research*, vol. 78, N^o. 7, pp. 1204–1209, 2008.
- [4.16] **Bedoui S, Bayadi A, Haddad A,** ”Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: case of an HV 220kV double circuit line”, 45th International universities’ power engineering Conference, UPEC 2010, Cardiff, Wales, UK, September 2010.
- [4.17] **IEEE Working Group 3.4.11**, “Modeling Of Metal Oxide Surge Arresters”, *IEEE Transactions on power Delivery*, vol. 7, N^o. 1, pp. 302-309, 1992.
- [4.18] **C. F. Wagner and A. R. Hileman**, “The Lightning Stroke II”, *IEEE Transactions on Power Apparatus System*, pp. 622-642, 1961.
- [4.19] **F. S. Young, J. M. Clayton, and A. R. Hileman**, “Shielding of Transmission Lines”, *American Institute of Electrical Engineers Transaction*, pp. 132-154, 1951.
- [4.20] **G. E. Brown and E. R. Whitehead**, “Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding II”, *IEEE Transactions on Power Apparatus System*, pp. 617-626, 1969.
- [4.21] **E. R. Love**, “Improvements on the Lightning Stroke Modeling and Application to Design of EHV and UHV Transmission Lines”, M.Sc. thesis, University of Colorado, 1973.
- [4.22] **IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines**, “A Simplified Method for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus System*, pp. 919-932, 1985.
- [4.23] **IEEE Working Group**, “Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines II- updates to Analytical Models”, *IEEE Transactions on power Delivery*, pp. 1254-1267, 1993.
- [4.24] **A. M. Mousa and K. D. Srivastava**, “A Revised Electrogeometric Model for the Termination of Lightning Strokes on Grounded Objects”, *Proceedings of International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity*, Oklahoma City, pp. 342-352, 1988.
- [4.25] **IEEE Standard 998-1996**, “IEEE Guide for Direct Stroke Shielding of Substations”.
- [4.26] **A. J. Eriksson**, “An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis,” *IEEE Transactions on power Delivery*, pp. 871-886, 1987.

Chapitre 5

- [5.1] **MEDOUAKH Fatima Zahra**, "Méthodes de Monte-Carlo", mémoire de master en mathématiques, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [5.2] **J . M. Hammersley, D.C. Handscand**, "Monte Carlo Methods", Oxford University, 1964.
- [5.3] **Enrico Zio**, "The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis", Springer Series in Reliability Engineering, Politecnico di Milano Italy, 2013.
- [5.4] **Victor(Wai Kin) Chan**, "Theory and applications of Monte Carlo Simulaions", 2013.
- [5.5] **Nikolova ND, Toneva D, Tenekedjieva A-M**, "Statistical Procedures for Finding Distribution Fits over Datasets with Applications in Biochemistry", Bioautomation, 2009.
- [5.6] **Tenekedjiev K, Dimitrakiev D, Nikolova ND**, "Building Frequentist Distribution of Continuous Random Variables. Machine Mechanics", 2002.
- [5.7] **Gujarati DN**, "Basic Econometrics", Third Edition, USA, 1995.
- [5.8] **Finch SR**, "Extreme Value Constants", Cambridge University Press, England, 2003.
- [5.9] **Hanke JE, Reitsch AG**, "Understanding Business Statistics", USA, 1991.
- [5.10] **IEEE TF on Parameters of Lightning Strokes**, "Parameters of lightning strokes: a review", IEEE Transactions on power Delivery, vol. 20, N^o. 1, pp. 346–358, 2005.
- [5.11] **Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Mario Paolone**, "An improved procedure for the assessment of overhead line indirect lightning performance and its comparison meteorological with the IEEE Std. 1410 method", IEEE Transactions on power Delivery, vol. 22, N^o. 1, pp. 684–692, 2007.

Chapitre 6

- [6.1] **M. Buehren**, "MATLAB Library for Parallel Processing on Multiple Cores", Copyright 2007.
- [6.2] **Juan A. Martínez-Velasco**, "Coordinacion de Aislamiento en Redes Electricas de Alta Tension", Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2012.
- [6.3] **J.A. Martínez-Velasco, J.A. Corea-Araujo, and S. Bedoui**, "Lightning performance analysis of transmission lines using parallel computing", EEUG 2016, Birmingham (UK), September 2016.
- [6.4] **Walter A. Lyons, et al.**, "Large Peak Current Cloud to Ground Lightning Flashes During

the Summer Months in the Contiguous United States”, American Society, 1997.

[6.5] Juan A. Martínez-Velasco, “Transient Analysis of power Systems. Solution Techniques, Tools and Application”, IEEE power and Energy General Meeting, Minneapolis, 2010.

[6.6] Juan A. Martínez-Velasco, Javier A. Corea-Araujo, S.Bedoui, “Insulation Coordination Studies of Air-Insulated Substations Using a Parallel MATLAB-ATP Environment”, EEUG 2017, Kiel, Germany, 2017.

[6.7] Juan A. Martínez-Velasco, Javier A. Corea-Araujo, S.Bedoui, “Lightning performance analysis of transmission lines using the Monte Carlo method and parallel computing”, Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 26, N°. 3, pp. 398-409, 2018.

[6.8] Bedoui S, Bayadi A , “Probabilistic evaluation of the substation performance under incoming lightning surges”, Electric Power Systems Research, vol. 162, pp. 125–133, 2018.

ملخص:

يُعرّف تنسيق العزل بأنه تحديد قوة عزل المعدات بالنسبة إلى الجهد الذي قد يظهر في النظام أين يتم تعيين الجهاز بالأخذ بعين الاعتبار بيئة الخدمة ومراعاة خصائص الأجهزة الوقائية المتوفرة. في دراسة تنسيق العزل، يتم تحديد مستويات التوتر لمعدات نظام الطاقة من أجل ضمان حماية هذه المعدات ضد التوتر الزائد. في هذه الأطروحة، تم إجراء دراسة تنسيقية للعزل من أجل التوتر الزائد للصواعق في محطة تحويل للجهد العالي 400 كيلوفولت في شرق الجزائر. اقترحت عدة طرق لدراسة التوتر الزائد الناتج عن ضربات الصواعق على خطوط النقل المتصلة بمحطة تحويل الكهرباء. نظرا للطبيعة العشوائية لظاهرة البرق، يجب أن تكون الدراسة إحصائية، وعموماً يتم استخدام طريقة مونت كارلو كحل لهذا النوع من الدراسات. في الجزء الأول، تم تقديم طريقة إحصائية تعتمد على تقنية مونت كارلو لتقييم أثر الصاعقة على محطة تحويل كاملة ذات عزل هوائي اعتمادا على قدرة أدوات المحاكاة. تم ترميز هذه التقنية في MATLAB وربطها ببرنامج EMTP/ATP لتنفيذ محاكاة الشبكة. بتنفيذ عمليات المحاكاة بفرض العديد من سيناريوهات الوقاية، تبين أن تركيب أجهزة الوقاية من الصواعق بأكسيد الزنك عند مدخل خط التحويل وعلى مقربة من محولات الطاقة يعطي وقت متوسط مقبول بين الأعطال (MTBF) عند نقاط مختلفة على مستوى محطة التحويل ومن ثم توفير حماية كافية. بما أن الدراسات المقدمة في الجزء الثاني تهدف إلى تقدير الوقت المتوسط بين الأعطال لمعدات محطة التحويل، يمكن أيضاً استخدام الطريقة المقترحة لتحديد أجهزة الوقاية ضد الصواعق أو مستوى العزل القاعدي (BIL)، بمجرد تحديد الوقت المتوسط المطلوب بين الأعطال واختيار مواقع أجهزة الوقاية ضد الصواعق، يمكن الأخذ بعين الاعتبار فقط صنف أجهزة الوقاية ضد الصواعق التي يتجاوز عندها الوقت المتوسط بين الأعطال القيمة المرجعية. سمحت ميزة الحوسبة المتوازية في MATLAB بنتبؤات أكثر دقة حول التوتر الزائد عند نقاط مختلفة في محطة التحويل وتقليل وقت تشغيل وحدة المعالجة المركزية لطريقة الحل.

كلمات مفتاحية: تنسيق العزل، الصواعق، التوتر الزائد، مونت كارلو، MTBF، BIL، EMTP/ATP، MATLAB، الحوسبة المتوازية.

Résumé :

La coordination des isolements est définie comme la sélection de la rigidité diélectrique de l'équipement par rapport aux tensions qui peuvent apparaître sur le système auquel l'équipement est destiné, et en tenant compte de l'environnement de service et des caractéristiques des dispositifs de protection disponibles. Dans une étude de coordination des isolements, les niveaux de tension de l'équipement du système de puissance sont déterminés afin d'assurer la protection de l'équipement contre les surtensions. Dans cette thèse, une étude de coordination des isolements est réalisée pour des surtensions de foudre dans le poste haute tension de 400 kV dans l'EST de l'Algérie. Plusieurs approches ont été proposées pour étudier les surtensions causées par les coups de foudre qui impactent une ligne connectée à un poste. En ce qui concerne le caractère aléatoire du phénomène de foudre, la procédure doit être statistique et la méthode de Monte Carlo est généralement utilisée comme solution pour ce type d'études. Dans la première partie, une méthode statistique basée sur la technique de Monte Carlo pour évaluer la performance de la foudre d'un poste complet avec une isolation par l'air (AIS) en utilisant la capacité des outils de simulation est présentée. Cette technique a été codée dans MATLAB et liée au programme EMTP / ATP pour effectuer les simulations de réseau. Les simulations sont réalisées en considérant plusieurs scénarios de protection. Il est corroboré que l'installation des parafoudres ZnO à l'entrée de la ligne et à proximité de l'autotransformateur donne un temps moyen entre défaillances (MTBF) acceptable à différents points dans le poste et assure ensuite une protection adéquate. Bien que les études présentées dans la deuxième partie visent à estimer l'MTBF de l'équipement du poste, la procédure peut également être utilisée pour sélectionner les parafoudres ou les BIL adéquats, une fois que l'MTBF désiré est fixé et que les emplacements des parafoudres ont été sélectionnés; seuls les parafoudres avec lesquels l'MTBF dépasse la valeur spécifiée doivent être pris en compte. La fonction de calcul parallèle de MATLAB a permis une prédiction plus précise des surtensions à différents points dans le poste et réduit d'une manière significative le temps d'exécution du processus global de la solution.

Mots Clés : Coordination d'isolation, foudre, surtension, Monte Carlo, MTBF, BIL, poste, EMTP / ATP, MATLAB, Calcul Parallèle.

Abstract:

Insulation coordination is defined as the selection of the dielectric strength of equipment in relation to the voltages which can appear on the system for which the equipment is intended and taking into account the service environment and the characteristics of the available protective devices. In an insulation coordination study, the voltage levels of power system equipment are determined in order to ensure the protection of equipment against overvoltages. In this thesis, an insulation coordination study is performed for lightning overvoltages in 400 kV substations in Algeria High Voltage Electricity System. Several approaches have been proposed to study the overvoltages caused by lightning strokes that impact a line connected to a substation. Regarding the random nature of the lightning phenomenon, the procedure must be statistical and generally the Monte Carlo method is used as the solution for this type of studies. In the first part, a statistical method based on Monte Carlo technique for evaluating lightning performance of a complete air insulation substation (AIS) using the capability of simulation tools is presented. This technique has been coded in MATLAB and linked to EMTP/ATP program to perform the network simulations. The simulations are carried out considering several protection scenarios. It is corroborated that the installation of ZnO arresters at line input and in the vicinity of the autotransformer gives an acceptable mean time between failures (MTBF) at different points in the substation and then provides an adequate protection. Although the studies presented in the second part were aimed at estimating substation equipment MTBF, the procedure can also be used to select surge arresters or substation BILs, once the desired MTBF is fixed and arrester locations have been selected, the surge arrester ratings can be selected by following the detailed procedure; only those surge arresters with which the MTBF exceeds the specified value should be considered. The parallel computing feature of MATLAB has permitted a more accurate prediction of the overvoltages at different points in the substation and significantly reduces the CPU run time of the overall solution process.

Key Words: Insulation coordination, lightning, overvoltage, Monte Carlo, MTBF, substation, EMTP/ATP, MATLAB, Parallel Computing.