

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 de département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Option: Réseaux Electriques

Par

M<sup>elle</sup> Zahira ANANE

## THÈME

**Modèle dynamique de l'effet couronne pour l'étude de  
la propagation de la surtension le long des lignes de  
transmission HT en utilisant l'EMTP**

Soutenue le 19/12/2018 devant le Jury:

Dr. Ahmed GHERBI	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
Dr. Abdelhafid BAYADI	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
Dr. Hamou NOURI	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
Dr. Hocine MOULAI	Professeur	Univ. Des Sciences et Technologies-USTHB, Alger	Examineur
Dr. Madjid TEGUAR	Professeur	Ecole nationale polytechnique, Alger	Examineur
Dr. Abdelouahab Mekhaldi	Professeur	Ecole nationale polytechnique, Alger	Examineur
Dr. Noureddine HARID	Professeur	Univ. Khalifa University of Science and Technology, UAE	Invité

---

## ملخص:

أغلبية أقسام هذه الأطروحة تهتم بدراسة وتحليل ظاهرة الكورونا ( الإكليل أو الحلقة أو الهالة) التي تظهر نتيجة للجهد الزائد على مستوى خطوط نقل الطاقة الكهربائية, لأسباب قد تكون خارجية مثل حدوث الصواعق الكهربائية أو داخلية مثل الأعطاب, وهذا ما أدى بنا إلى تقسيم هذا العمل إلى جزأين أساسيين يمكن تلخيصهما كما يلي :

**الجزء الأول:** تمثل الصاعقة الكهربائية أهم خطر كهربائي على مستوى شبكة خطوط النقل الكهربائية حيث تبلغ سعة تيارها حتى 200kA في بضع ثوانٍ, مما يؤدي إلى حدوث الجهد الزائد على خطوط النقل و بالتالي حدوث ظاهرة الكورونا, حيث قمنا بعمل نموذج رياضي ديناميكي والذي يتماشى مع كل أشكال النواقل الكهربائية وكذا معظم أنواع أمواج الجهد الزائد المطبق مثل : الأمواج ذات النبض الأسي و الأسي المضاعف و كذا التذبذبية. فيعتبر عمل نموذج لهذه الظاهرة في برنامج الظواهر الكهرومغناطيسية العابرة ATP/EMTP ميزة هذا الجزء ومدخل مهم للجزء الثاني من هذا العمل.

**الجزء الثاني:** بعد تطوير وتمثيل ظاهرة الكورونا بنموذج ديناميكي في برنامج ATP/EMTP قمنا بإعادة إدخاله في عنصر غير خطي ملحق بلغة MODELS في برنامج ATP/EMTP من أجل إدماجه في خطوط النقل للطاقة الكهربائية وكان ذلك بغرض تحليل تنقل أمواج الجهد العالي على مستوى هذه الخطوط, حيث أثبتت الدراسة فعالية النموذج الديناميكي المعتمد للكورونا ودوره المهم في تخميد وتشويه أمواج الجهد الزائد على خطوط النقل و بالتالي حماية باقي أجزاء الشبكة من خطر الجهد الزائد.

**الكلمات المفتاحية:** فرط التوتر , ظاهرة الهالة, النموذج الديناميكي, EMTP, MODELS, خط النقل, التوهين

والتشويه.

## Résumé

La majorité des sections de cette thèse concerne par l'étude et l'analyse du phénomène couronne (ou corona) qui apparaissent à la suite des surtensions au niveau des lignes de transport d'énergie électrique, pour des raisons peut être externe, comme l'apparition de la foudre électrique ou interne, comme les défauts, ce qui est nous a conduit à diviser le travail en deux grandes parties qui peuvent être résumé comme suit:

**Partie I:** La foudre représente le risque électrique le plus important au niveau de réseau des lignes de transmission électrique où sa valeur de crête peut atteindre jusqu'à 200 kA en quelques secondes, ce qui conduit à l'apparition d'une surtension sur les lignes de transmission et donc un phénomène couronne se produit. Nous avons fait un modèle mathématique dynamique, ce qui est conforme à toutes configurations des conducteurs électriques, ainsi que la plupart des formes d'ondes de surtension appliquées, telles que: les ondes exponentielles, multiples et oscillatoires. Un modèle de ce phénomène dans le programme ATP / EMTP est l'avantage de cette partie et un apport important à la deuxième partie de ce travail.

**Partie II:** Après le développement et la représentation du phénomène couronne par un modèle dynamique dans le programme ATP / EMTP, nous avons de l'entrée de nouveau dans un élément non-linéaire additionné au langage MODELES dans le programme ATP / EMTP pour l'intégration dans les lignes de transport d'énergie électrique, et qui était dans le but d'analyser la propagation des ondes de surtensions niveau de ces lignes , où l'étude a prouvé l'efficacité du modèle dynamique de l'effet couronne approuvé et son rôle important dans l'atténuation et la distorsion des ondes de surtension sur les lignes de transmission et ainsi protéger le reste des parties du réseau au risque de ces surtensions.

**Mots clés :** Surtensions, Effet couronne, EMTP, MODELS, Ligne de transmission, Atténuation et déformation.

**Abstract:**

The majority of the sections of this thesis concerned with the study and analysis of corona phenomenon that appear as a result of overvoltages on electric power lines level, for reasons may be external, such as the appearance of lightning strike or internal, such as the faults, which is led us to divide this work into two major parts which can be summarized as follows:

**Part I:** Lightning is the most important electrical risk at level of power transmission lines network where its peak value can reach up to 200 kA in a few seconds, leading to the occurrence of a surge on transmission lines and therefore a corona phenomenon occurs, where we made a dynamic mathematical model, which is consistent with all configurations of electrical conductors, as well as most applied surge waveforms, such as: exponential waves, multiple and oscillatory impulses. A modeling of this phenomenon in the electromagnetic transients program ATP / EMTP is the advantage of this part and an important contribution to the second part of this work.

**Part II:** After the development and the representation of the corona phenomenon by a dynamic model in the ATP / EMTP program, we have entered it again into a nonlinear element of the MODELES language in the ATP / EMTP program for the integration into power transmission lines, and that was in order to analyze the propagation of surge waves at the level of these lines, where the study proved the effectiveness of the dynamic model of the approved corona effect and its important role in the attenuation and distortion of surge waves on the transmission lines and thus protect the rest of the network parts from the risk of these overvoltage's.

**Key words:** Overvoltages, Corona effect, MODELS, EMTP, Transmission line, Attenuation and deformation.

## **Déclaration**

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

Signé ..... (Zahira ANANE)

## **Déclaration 1**

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

Signé ..... (Zahira ANANE)

## **Déclaration 2**

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 ..... (Zahira ANANE)

## **LISTE DES PUBLICATIONS**

### **Publications Internationales**

1. Z. Anane, A. Bayadi, N. Harid, 'A dynamic corona model for EMTP computation of multiple and non-standard impulses on transmission lines using a type-94 circuit component', Electric Power Systems Research, Vol. 163, Part A, PP.133–139, 2018.
2. Z. Anane, A. Bayadi, K. Huang, 'Distortion phenomena on transmission lines using corona modeling ATP/EMTP', IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.25, Issue. 2, pp 383 – 389, April 2018.

3. Z. Anane, A. Bayadi, A. Bernadić, 'Analysis of lightning strike with corona on OHTL near the substation by EMTP', Advances in Engineering an International Journal (ADEIJ), Vol. 1, No.1, September 2016.

### **Communication internationales**

1. Anane. Z, Bayadi. A,' Implantation Of A Static Model Of The Corona Effect In The ATP-EMTP Software', WOSSPA 2011, The 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications, ENP, Alger, Mai 2011.
2. Anane. Z, Bayadi. A, 'Simulation Of Surge Corona On Three-Phase Transmission Lines', 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), London, 2012.
3. Anane. Z, Bayadi. A, 'Studies On The Influence Of Corona On Overvoltage Surges By Simulation Using The ATP/EMTP ', ICM2012, 24th International Conference on Microelectronics (ICM), 2012.
4. Anane. Z, Bayadi. A, 'Corona Discharge Under Atmospheric Conditions', The 3<sup>rd</sup> International conference On Information And Electrical Engineering, Tebessa, Nov.2014.
5. Anane. Z, Bayadi. A, 'Non Linear Corona Discharge Simulation', International Electrical and Computer Engineering Conference IECEC'15, Setif, May 2015.
6. Anane. Z, Bayadi. A,' Non-Linear Modeling Corona Due To Lightning Strike On Transmission Lines ', La 10<sup>ème</sup> conference de la société française d'électrostatique (SFE'2016), Poitiers, Aout 2016.

### **Communication nationales**

1. Anane. Z, Bayadi. A,' Modeling and Simulation of the Corona Effect in the EMTP Software', CGE'07: 7<sup>ème</sup> Conférence sur le Génie Electrique, EMP, Alger, Avril. 2011.
2. Anane. Z, Bayadi. A,' Corona Characteristics Under Non-standard Lightning Impulses', 9<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la Haute Tension, Laghouat (CNHT'2013), Avril 2013.

3. Anane. Z, Bayadi. A,' Electric field in HV Transmission lines', CGE'08, 8<sup>ième</sup> Conférence sur le Génie Electrique, EMP, Alger, Avril 2013.
4. Anane. Z, Bayadi. A,'Non Linear Modeling of Corona Discharge under Atmospheric Conditions', Algerian Large Electrical Network Conference, Hilton, Alger, Mars 2015.
5. Anane. Z, Bayadi. A, 'Overhead Transmission Lines and Corona Power Losses', Algerian Large Electrical Network Conference, Hilton, Alger, Mars 2015.
6. Anane. Z, Bayadi. A,'Lightning Corona Model for Electromagnetic Transient Calculations', CGE'09, 9<sup>ième</sup> Conférence sur le Génie Electrique, EMP, Alger, Avril 2015.
7. Anane. Z, Bayadi. A,' Corona current and corona losses computation on HVOTL using ATP/EMTP', 10<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la Haute Tension, USTHB (CNHT'2016), Mai 2016.

### **Journées des Doctorants**

1. Anane. Z, Bayadi. A, 'Participation au Journées des Doctorants' Université Sétif, Avril 2012.
2. Anane. Z, Bayadi. A, 'Participation au Journées des Doctorants' Université Sétif, Avril 2013.
3. Anane. Z, Bayadi. A, 'Participation au Journées des Doctorants' Université Sétif, Avril 2014.
4. Anane. Z, Bayadi. A, 'Participation au Journées des Doctorants' Université Sétif, Mai 2015.

## *Dédicaces*

---

---

A mes très chers parents,

A mes très chères sœurs et frères,

A toute ma famille,

A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

**Zahira ANANE.**

## ***Remerciements***

---

---

Je remercie avant tout « **ALLAH** », tout puissant, de m'avoir donné la force pour suivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Tout d'abord, Je tiens, à remercier avec ma profonde gratitude, mon directeur de thèse Pr. A. BAYADI, pour sa disponibilité, sa confiance, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien la réalisation de ces travaux. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Ahmed GHERBI, Professeur à l'Université de Sétif-1, d'avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Nouri HAMOU, Professeur à l'Université de Sétif-1, Monsieur Hocine MOULAI, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies-USTHB, Alger, Monsieur Madjid TEGUAR et Monsieur Abdelouahab MEKHALDI, Professeurs à l'École nationale polytechnique, Alger, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury de soutenance.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Nouredine HARID Professeur à l'Université des Sciences et Technologies –Khalifa-UAE pour m'avoir fait bénéficier de sa compétence et de ses connaissances scientifiques et d'accepter notre invitation d'être examinateur et d'avoir participé au jury de soutenance.

Un grand merci aux tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

**Zahira ANANE.**

---

---

# TABLE DES MATIÈRES

Abréviations et symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

## *CHAPITRE 01*

### INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte général .....	1.1
1.2. Objectif .....	1.2
1.3. Contribution du travail actuel .....	1.3
1.4. Originalité du sujet .....	1.3
1.5. Structure de la thèse .....	1.5

## *CHAPITRE 02*

### ASPECTS PHYSIQUES DE LA DECHARGE

#### COURONNE

2.1. Introduction.....	2.1
2.2. Développement de la décharge couronne pour différentes polarité de tension appliquée .....	2.1
2.3. Conditions d'apparition couronne.....	2.3
2.4. Application et utilisation de l'effet couronne .....	2.7
2.5. Effets indésirables de la décharge couronne .....	2.8
2.5.1. Pertes d'énergie .....	2.8
2.5.2. Interférences radio – télévision .....	2.10
2.5.3. Bruit audible.....	2.11
2.5.4. Vent ionique .....	2.11
2.5.5. Vibrations mécaniques des conducteurs .....	2.12
2.5.6. Production des gaz .....	2.12
2.6. Conclusion .....	2.13

## *CHAPITRE 03*

### APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION COURONNE

3.1. Introduction.....	3.1
3.2. Etat d'art sur le développement des modèles couronne .....	3.2
3.3. Caractéristiques générales de la décharge couronne Q-V .....	3.6
3.4. Modélisation de l'effet couronne .....	3.8
3.4.1. Modèles de circuiteries ou analogiques.....	3.8
3.4.2. Modèles analytiques .....	3.14
3.5. Conclusion .....	3.21

## *CHAPITRE 04*

### MODELISATION DYNAMIQUE

4.1. Introduction.....	4.1
4.2. Aperçu sur le logiciel EMTP .....	4.1
4.3. Mise en équations des modèles couronne dans l' EMTP .....	4.3
4.4. Modèle statique de coques de charge : Mise en équations .....	4.4
4.5. Modèle dynamique de coques de charge.....	4.13
4.5.1. Hypothèses adoptés pour ce modèle .....	4.14
4.5.2. Mise en équations du modèle dynamique .....	4.14
4.5.3. Résultats de Simulation.....	4.17
4.5.3.1. Caractéristiques Q-V sous des impulsions de tension exponentielle .....	4.19
4.5.3.2. Application au cas de surtensions à impulsions multiples.....	4.24
4.5.3.3. Caractéristiques Q-V sous des impulsions oscillatoires .....	4.26
4.5.4. L'utilisation du composant électrique (élément de circuit) Type-94 .....	4.33
4.6. Conclusion .....	4.36

---

**CHAPITRE 05****PROPAGATION DES ONDES DE SURTENSIONS SUR  
LES LIGNES DE TRANSMISSION**

5.1. Introduction.....	5.1
5.2. Comparaisons entre les différents modèles de ligne .....	5.2
5.3. Modélisation de ligne de transmission.....	5.4
5.3.1. Pylônes.....	5.8
5.3.2. La résistance de terre.....	5.11
5.3.3. Isolateur .....	5.13
5.3.4. Modélisation des coups de foudre.....	5.16
5.4. Résultats de simulation .....	5.18
5.4.1. Cas d'absence de l'effet couronne.....	5.20
5.4.2. Cas de présence de l'effet couronne .....	5.20
5.4.3. Effet de la longueur de section.....	5.22
5.4.4. Effet de l'amplitude de la tension appliquée .....	5.24
5.5. Conclusion .....	5.27

**CHAPITRE 06****CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES**

6.1. Résumés des Résultats.....	6.2
6.2. Recommandations de recherche futures .....	6.2

## Liste des figures

<b>Figure 2.1</b> : Effet couronne sur les lignes de transmission .....	2.3
<b>Figure 2.2</b> : Setup : cage couronne et système de mesure numérique .....	2.4
<b>Figure 2.3</b> : Montage de mesure utilisé par F.W. Peek .....	2.5
<b>Figure 2.4</b> : Mécanismes ionique à la base du vent ionique pour les décharges couronnes positive et négative .....	2.12
<b>Figure 3.1</b> : Circuit des Modèles Couronne et ces Réponse : <b>a.</b> Courbes typiques Q- V, <b>b.</b> Circuit de modèle analogique .....	3.10
<b>Figure 3.2</b> : Circuit couronne équivalent proposé par Kudyan et Shih .....	3.10
<b>Figure 3.3</b> : Modèle proposé par Motoyama et al .....	3.11
<b>Figure 3.4</b> : Circuit du Modèle Couronne de Portela .....	3.12
<b>Figure 3.5</b> : Modèle proposé par Correia de Barros .....	3.13
<b>Figure 3.6</b> : Modèle proposé par Santiago et Castellanos .....	3.13
<b>Figure 3.7</b> : Modèle proposé par Lee .....	3.17
<b>Figure 3.8</b> : Représentation schématique d'un cycle Q-V .....	3.20
<b>Figure 4.1</b> : Structure de ATP/EMTP .....	4.3
<b>Figure 4.2</b> : Organigramme de calcul du modèle Couronne statique.....	4.5
<b>Figure 4.3</b> : Configuration coaxiale .....	4.6
<b>Figure 4.4</b> : Position de coque de charge couronne autour du conducteur .....	4.8
<b>Figure 4.5</b> : Caractéristiques charge-tension calculée et mesurée de [4].....	4.9
<b>Figure 4.6</b> : Variation non linéaire de la capacité couronne .....	4.10
<b>Figure 4.7</b> : Configuration conducteur au dessus du sol.....	4.10
<b>Figure 4.8</b> : Les courbes Q-V pour une onde de 1300 kV, 1,2/50 $\mu$ s.....	4.12
<b>Figure 4.9</b> : Les courbes Q-V pour une onde de 1230 kV, 10/75 $\mu$ s .....	4.12

---

<b>Figure 4.10</b> : Influence du front d'onde sur la réponse du modèle .....	4.13
<b>Figure 4.11</b> : Processus de décharge couronne .....	4.15
<b>Figure 4.12</b> : Organigramme de calcul du modèle dynamique de l'effet couronne .....	4.18
<b>Figure 4.13</b> : Courbes Q-V Calculées et mesurées pour une géométrie coaxiale .....	4.19
<b>Figure 4.14</b> : Configuration faisceau de deux conducteurs.....	4.21
<b>Figure 4.15</b> : Caractéristiques Q-V pour un faisceau à deux conducteurs.....	4.21
<b>Figure 4.16</b> : Effet du rayon de conducteur.....	4.22
<b>Figure 4.17</b> : Variation de la capacité couronne et du rayon des coques de charges .....	4.24
<b>Figure 4.18</b> : Effet de la hauteur du conducteur .....	4.24
<b>Figure 4.19</b> : Impulsions de tensions multiples .....	4.25
<b>Figure 4.20</b> : Tension avec trois impulsions successives .....	4.26
<b>Figure 4.21</b> : Effet de la taille du conducteur sur la charge couronne .....	4.27
<b>Figure 4.22</b> : Effet de la hauteur du conducteur sur les caractéristiques Q-V ....	4.27
<b>Figure 4.23</b> : Impulsion oscillatoire .....	4.28
<b>Figure 4.24</b> : Courbes Charge-voltage pour l'impulsion oscillatoire .....	4.30
<b>Figure 4.25</b> : Courbes dynamiques Q-V, 33kHz, 270kV.....	4.30
<b>Figure 4.26</b> : Variation de la charge sous les fréquences de 50 kHz et 135 kHz.	4.32
<b>Figure 4.27</b> : Effet de la fréquence sur les caractéristiques Q-V.....	4.32
<b>Figure 4.28</b> : Effet de la fréquence sur les courbes Q-V pour une configuration conducteur au dessus du sol .....	4.33
<b>Figure 4.29</b> : Composant non-linéaire de Type-94 de l'ATP- EMTP, <b>a.</b> Interface entre le composant de circuit Thevenin Type-94 de l'ATP- EMTP , <b>b.</b> Interface entre le composant de circuit Norton Type-94 de l'ATP- EMTP.....	4.35

<b>Figure 5.1</b> : Tranche de 3 pylônes modélisée avec ATP-EMTP .....	5.5
<b>Figure 5.2</b> : Caractéristiques de la ligne de transmission de J. Marti.....	5.8
<b>Figure 5.3</b> : Modèle multi étage du pylône 220/ 400 kV .....	5.10
<b>Figure 5.4</b> : Modèle de la résistance de terre .....	5.13
<b>Figure 5.5</b> : Modèle de l'isolateur utilisé avec contournement .....	5.13
<b>Figure 5.6</b> : Modèle de coup de foudre de type Heidler .....	5.18
<b>Figure 5.7</b> : Les modèles des Lignes implantés dans l'EMTP, <b>a.</b> La ligne d'OAT-El Hassi de 220 kV soumise a une surtension de 1200 kV, <b>b.</b> La ligne d'OAT- Saleh Bay de 400 kV soumise a une surtension de 3000 kV, <b>c.</b> Présentation d'une portée .....	5.19
<b>Figure 5.8</b> : Propagation des ondes de surtensions en absence de l'effet couronne .....	5.22
<b>Figure 5.9</b> : Propagation des ondes de surtensions en présence de l'effet couronne . .....	5.22
<b>Figure 5.10</b> : Surtensions enregistrées en différentes positions de la ligne .....	5.22
<b>Figure 5.11</b> : Evolution de la crête de tension avec la distance de propagation (s=30m).....	5.23
<b>Figure 5.12</b> : Evolution du temps à la crête de tension avec la distance de propagation (s=30m).....	5.23
<b>Figure 5.13</b> : Effet de la longueur de section s sur les formes d'ondes (d=300m) .....	5.23
<b>Figure 5.14</b> : Evolution du temps à la crête de tension avec la longueur d'une section s.....	5.24
<b>Figure 5.15</b> : Evolution de la crête de tension avec la longueur d'une section s.	5.25
<b>Figure 5.16</b> : Effet de la crête de la tension appliquée sur les formes d'ondes (d=300m) .....	5.25

<b>Figure 5.17</b> : Variation de la crête de tension en fonction de la crête de la tension appliquée.....	5.25
<b>Figure 5.18</b> : Evolution du temps à la crête de tension avec la crête de tension appliquée.....	5.26

---

---

## *Liste des tableaux*

---

---

<b>Tableau 4.1</b> : Données de la configuration coaxiale .....	4.8
<b>Tableau 4.2</b> : Comparaison des résultats avec les mesures et les données publiées.....	4.23
<b>Tableau 5.1</b> : Résumé des principaux modèles de ligne de transmission.....	5.3
<b>Tableau 5.2</b> : Caractéristiques de la ligne OAT-HASSI 220 kV [153] .....	5.6
<b>Tableau 5.3</b> : Caractéristiques de la ligne OAT- SALEH BAY 400 kV [153] .....	5.7
<b>Tableau 5.4</b> : L'impédance caractéristique de surtension de pylône.....	5.9
<b>Tableau 5.5</b> : Paramètres Equivalents du model multi étages .....	5.11
<b>Tableau 5.6</b> : Différents modèles des prises de terre .....	5.12
<b>Tableau 5.7</b> : Modèles de développement d'arc.....	5.14
<b>Tableau 5.8</b> : Les différents modèles représentant le canal du coup de foudre ..	5.17

---



---

## *Listes des Acronymes et Symboles*

---



---

### Acronymes

EDP	Equations aux dérivées partielles.
ODE	Equations Différentielles Ordinaires.
ATP	Alternative Transients Program.
EMTP	ElectroMagnetic Transients Program.
IREQ	Institut de Recherche Hydro-Québec.
EDF	Electricité de France.
Q-V	Courbes expérimentales de Charge – Tension.
HVDC	High Voltage Direct Current.
HT	haute tension.
SF6	Hexafluorure de Soufre.
EFCOR	Effet Corona.
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi.
DC	Direct Current.
R-C	Resistance- Capacité.
CEM	La compatibilité ElectroMagnétique.
WF	Fonctions de pondération.
HV	High Voltage.
CEI	La Commission Electrotechnique Internationale.
GMR	Le rayon moyen géométrique du faisceau

### Symboles

$\partial v / \partial t$	Vitesse / temps.
$I$	Courant électrique(A).
$I_0$	Courant initial (A).
$d$	Distance inter électrode (m).
$E_c$	Champ critique, en kv/cm.

---

$E_p$	Champ superficiel, $E_p = 31 \text{ kV/cm}$ .
$K$	Coefficient, $K = 0,308$ .
$r_0$	Rayon intérieur de l'électrode cylindrique coaxial, en cm.
$\delta$	Densité relative de l'air.
$T$	Température, en °C.
$P$	Pression de l'air, en cm Hg.
$m$	Coefficient d'état de surface du conducteur.
$E_0$	Champ critique minimum.
$b$	Constante empirique variant entre 0,5 et 0,67.
$E_0^+$	Champ électrique en polarité positive, en [KV/cm].
$A$	Constante déterminée expérimentalement.
$dv/dt$	Raideur du front de l'onde de tension appliquée, en [kV/s].
$U_0$	Tension critique de l'apparition couronne.
$r_b$	Rayon extérieur de l'électrode cylindrique coaxial.
$P_c$	Pertes par effet de couronne.
$f$	Fréquence d'alimentation (de service) en [Hz].
$V$	Tension de phase-neutre en [kV].
$V_d$	Tension critique disruptive en [kV].
$r$	Rayon du conducteur en [cm].
$D$	Distance entre les conducteurs en [cm].
$f_x$	Facteur qui varie le rapport $V/V_d$ .
$V$	Tension de phase en kV.
$M_0$	Coefficient d'état de surface.
$C_{cor}$	Capacité couronne.
$C_0$	Capacité naturelle ou géométrique du conducteur.
$\beta$	Paramètre qui dépend sur le nombre des conducteurs par faisceau et sur la polarité de tension.
$v_{crit}$	Tension critique.
$rc$	Rayon du conducteur.
$i_c$	Courant couronne.
$g_1$	Paramètre déterminé par la concordance avec les courbes $Q-V$

---

---

	mesurées sur des conducteurs sujets à des chocs de tension.
$g_2$	Paramètre déterminé par la concordance avec les courbes $Q-V$ mesurées sur des conducteurs sujets à des chocs de tension.
$V_{iR}$	Eléments non linéaires introduite par Lee et C. B.
$K_R$	Constante trouvée.
$V_{C0}$	Tension d'apparition couronne.
$\delta_G$	Constante des pertes couronne.
$I_R$	Eléments non linéaires sont introduits par Lee et C. B.
$C_c$	Capacité couronne.
$V_c$	Tension d'apparition couronne.
$C_0$	Capacité géométrique de la ligne.
$\eta$	Coefficient.
$C_g$	Capacité géométrique du conducteur.
$V_0$	Tension d'apparition de la couronne.
$q_{sc}$	Charge d'espace.
$\epsilon_0$	Permittivité diélectrique.
$rc$	Rayon de la coque couronne.
$E_c$	Champ critique des streamers.
$E_0$	Champ électique critique.
$Q_i(t)$	Charge induite.
$\bar{V}(r_j, t)$	Le potentiel en p.u de la $j^{\text{ème}}$ coques de rayon $r_j$ .
$Q_{sc}(j)$	La charge d'espace portée par la $j^{\text{ème}}$ coque.
$H$	Humidité absolue en $[g/m^3]$ .
$Q(t)$	Charge électrique totale.
$Q_{sp}(t)$	La charge d'espace totale existante autour du conducteur à l'instant $t$ .
$V(t)$	La tension appliquée.
$C_{dyn}$	La capacité dynamique (couronne).
$\Delta Q(t)$	La charge d'espace a un 'instant $\Delta t$ .
$\Delta V(t)$	La tension appliquée a un 'instant $\Delta t$ .

---

---

$r_{eq}$	Rayon équivalent en [cm].
$r_f$	Le rayon moyen géométrique (GMR) du faisceau, en [cm].
$n$	Nombre de conducteurs élémentaires.
<i>Coef</i>	Coefficient de correction.
$V_{max}$	Valeur pic de tension, en [kV].
$t_0$	L'instant initial de l'application de la surtension en [ $\mu$ s].
$t$	La longueur d'onde, en [ $\mu$ s].
Ri	Les résistances des tronçons de conducteur en [ $\Omega$ ].
$Z_i$	Les impédances des tronçons de conducteur.
$\gamma$	Coefficient d'atténuation, sa valeur peut être prise égale à 0,8.
Li	Les inductances des tronçons en [mH].
vt	Vitesse de propagation en [m/s].
$\alpha$	Coefficient d'amortissement.
$R_t$	La résistance actuelle de la terre ( $\Omega$ ).
$R_0$	Résistance de terre à faible courant et faible fréquence ( $\Omega$ ).
$I_g$	La valeur seuil du courant suffisante pour commencer l'ionisation du sol (A).
$I$	Le courant de foudre à travers le pylône (A).
$\rho$	La résistivité du sol.
$E_0$	Le champ d'ionisation du sol (de 300 à 400 kV/m).
$i(t)$	Le courant électrique.
k	Nombre multiplicatif en (A) de la fonction ne représente pas exactement l'amplitude.
$\tau$	La durée du choc en (s).
n	Représente un facteur influençant la raideur de la fonction.
$\Delta t$	Pas de temps.

# Chapitre 01

## INTRODUCTION GENERALE

---

### 1.1. Contexte général

La protection contre les surtensions et la coordination de l'isolement des lignes de transmission et des sous-stations nécessitent une connaissance précise des grandeurs et des formes d'onde des surtensions dues au manœuvre et à la foudre. Pour les lignes de transport d'énergie électrique, la haute tension peut provoquer un fort champ électrique près de la surface des conducteurs, lorsque son intensité dépasse une certaine valeur critique, des décharges couronne se produisent. Ce phénomène est lié à un problème environnemental électromagnétique au voisinage des lignes de transmission.

Dans la pratique, il est souvent nécessaire de traiter l'effet couronne car il introduit une non-linéarité distribuée dans les lignes de transmission. Bien que le problème de la propagation des ondes sur ces lignes avec l'effet couronne a été étudié depuis longtemps, les progrès ont été lents et il reste encore beaucoup à faire. Un compte rendu détaillé du travail le plus pertinent dans les lignes de transmission avec l'effet couronne, depuis ses débuts, est donné dans un document d'étude par Carneiro [1].

La minimisation de l'effet couronne par des systèmes de transmission surdimensionnés serait extrêmement coûteux et, de plus, elle ne pourrait pas être souhaitable. L'effet couronne a tendance d'atténuer les parties d'une forme d'onde qui sont au-dessus du niveau de seuil de la décharge couronne à un taux beaucoup plus élevé. Cependant, pour amener ce phénomène dans les considérations de conception, les techniques d'analyse de ces caractéristiques non linéaires devraient être amenées à un niveau de développement similaire à celui de leur modélisation linéaire équivalente. Il y a actuellement plusieurs

difficultés. Premièrement, le phénomène de l'effet couronne est très compliqué et reste un champ de recherche très actif. Deuxièmement, des résultats fiables sur le terrain et en laboratoire sont très difficiles à obtenir et, par conséquent, rares. Troisièmement, une théorie de ligne non linéaire devrait être beaucoup plus compliquée que la théorie linéaire. Le travail rapporté dans cette thèse se concentre sur la modélisation dynamique du phénomène couronne dans un langage très important dans les systèmes transitoires électromagnétique ATP/AMTP, par une méthodologie de conception établie.

La modélisation de la décharge couronne serait un outil précieux pour l'analyse de la propagation des ondes de surtension sur les lignes de transmission pour faire avancer le sujet. Un aperçu des caractéristiques requises des modèles de l'effet couronne se basant sur des hypothèses, d'aider à la conception des modèles et à l'interprétation de leurs résultats et d'aider à établir, quels paramètres des modèles couronne sont pertinents pour les études transitoires.

## 1.2. Objectifs

Il semble à partir de la section précédente qu'un nouveau modèle non linéaire de l'effet couronne, soit nécessaire pour simuler le phénomène transitoire de l'effet couronne sous différentes formes d'ondes de tensions.

L'objectif principal de la présente thèse consiste à étudier l'effet couronne, afin d'en améliorer la modélisation dynamique pour l'analyse de la propagation des ondes des surtensions, sur les lignes de transmission aériennes.

Pour comprendre les mécanismes physiques et pour expliquer les résultats obtenus expérimentalement, la modélisation numérique de la décharge couronne doit être effectuée. Il est prévu que le modèle numérique développé, fournira une description précise de la physique de l'effet couronne pour des conditions spécifiées. L'analyse globale et la description mathématique du modèle de simulation sera d'une grande utilité pour résoudre les problèmes de conception d'équipement de la haute tension à grande échelle.

Les étapes suivantes ont été entreprises:

- Étudier le mécanisme de la décharge couronne.
- Développer un modèle numérique dynamique, en n'adoptant que les hypothèses de développement de ce phénomène sont nécessaires.
- Simulations de l'effet couronne sous des tensions standard, répétitives et non standard.
- Vérification des résultats de la simulation par rapport aux résultats de mesure trouvés dans la littérature.
- Implantation du modèle couronne en utilisant le composant de circuit Type-94.
- Etude et analyse de la propagation des ondes de choc de surtension sur les lignes de transmission en présence du modèle couronne.

### 1.3. Originalité du sujet

L'apport scientifique de cette thèse est d'étudier l'influence de la décharge couronne sur la propagation des ondes de choc dues aux surtensions de la foudre sur les lignes de transmission. Les travaux de simulation réalisés ont pour but de modéliser le phénomène complexe et non linéaire de la décharge couronne d'une manière dynamique dans le langage MODELS de l'ATP/EMTP.

Notre modèle est capable d'être utilisé pour différentes configurations de la ligne :

- ❖ La configuration du conducteur coaxiale,
- ❖ La configuration d'un conducteur-plan,
- ❖ La configuration de conducteur en faisceau.

La difficulté de la modélisation du phénomène couronne réside dans la prise en considération des différents phénomènes qui lui sont associés tel que l'ionisation, attachement, recombinaison...

Les résultats trouvés dans cette simulation ont été comparés avec ceux trouvés expérimentalement par [2-4] où une très bonne concordance a été

obtenue entre eux.

Nous savons que l'effet couronne à un effet bénéfique dans l'atténuation et la distorsion des ondes de surtension, donc elle a un rôle de protection contre ces surtensions avant qu'elles n'atteignent le poste de transformation.

Les résultats de modélisation nous ont permis d'introduire notre modèle dynamique dans un autre type de composants non linéaires qui est un type de modèle itératif: l'élément Type-94.

L'étude d'atténuation et de distorsion des ondes de chocs se propageant sur la ligne de transmission a été faite par introduction de notre modèle dynamique dans le composant non linéaire Type-94.

#### 1.4. Contribution du travail actuel

De tout ce qui précède, les objectifs de la recherche rapportés dans cette thèse sont les suivants:

- ✓ La modélisation du phénomène complexe de la décharge couronne par deux types (statique et dynamique) a été faite à travers une étude approfondie sur les différents modèles existants dans la littérature, en se basant sur différentes hypothèses du processus couronne.
- ✓ Implantation du modèle couronne dans le logiciel de simulation des systèmes électromagnétiques transitoires ATP/EMTP à l'aide de son langage MODELS.
- ✓ Les caractéristiques charge-tension de l'effet couronne sont obtenues, par ces deux modèles, avec une très bonne concordance avec celles mesurées disponibles dans la littérature. Ces caractéristiques sont obtenues pour différents types de surtensions appliquées, tels que les impulsions standards exponentielles, multiples et impulsions non standard oscillatoires et pour différents types de configurations du conducteur.
- ✓ L'analyse de la propagation des ondes de choc des surtensions dues à la foudre, sur les lignes de transmission aérienne en présence d'un modèle

---

couronne. Ce dernier a été implanté dans un composant non linéaire de type-94 dans l'ATP/EMTP.

### 1.5. Structure de la thèse

Cette recherche a été divisée en six étapes principales:

- ❖ Le chapitre 1 présente le contexte général relatif à la problématique, les objectifs de recherche et offre une brève description de la méthodologie de cette thèse de doctorat.
- ❖ On précisera dans le deuxième chapitre un aperçu général sur les types de l'effet couronne pour différents types de polarités de tension appliquée, les conséquences de ce phénomène, et le seuil critique d'apparition de l'effet couronne, leurs conséquences et leurs utilisations dans l'industrie et dans le domaine des systèmes d'énergie électrique.
- ❖ Le troisième chapitre présente une étude bibliographique sur les caractéristiques de la décharge couronne et les différents modèles de l'effet couronne existant dans la littérature, tel que les modèles analytiques et analogiques.
- ❖ Le quatrième chapitre représente la mise en équations des modèles de coques de charges de l'effet couronne, et il est consacré à l'implantation des modèles de coques de charges statique et dynamique de l'effet couronne dans le logiciel de simulation ATP/EMTP utilisant l'interface MODELS avec interprétation des résultats trouvés.
- ❖ Le cinquième chapitre montre comment l'effet couronne affecte la propagation des ondes de choc de surtensions sur les lignes de transmission, en obtenant l'atténuation et la distorsion de ces ondes de choc.
- ❖ Le chapitre six présente les conclusions générales de ce travail et souligne également plusieurs recommandations pour les recherches futures.

# Chapitre 02

## ASPECTS PHYSIQUES DE LA DECHARGE COURONNE

---

### 2.1. Introduction

Avec le développement des réseaux électriques et la répartition inégale de l'énergie dans le monde, des lignes de transport de haute tension sont construites pour transporter l'énergie vers le consommateur, et sous l'effet de surtensions dues à la foudre ou aux opérations de manœuvre, les défauts dans les lignes de transmission sont souvent accompagnés d'une décharge couronne.

Cette dernière se produit autour de la surface des conducteurs et est accompagnée avec des perturbations d'énergie électrique le long des lignes de transmission aériennes, production des gaz (Ozone), vibration des conducteurs, bruit audibles et interférences radiotélévision.

Cependant le phénomène de l'effet couronne possède un effet bénéfique sur la réduction des surtensions transitoires se propageant sur les lignes de transmission.

L'aspect physique de développement de la décharge couronne et une description sur les différents types de décharges dans l'air ainsi que ses utilisations dans l'industrie, ses avantages et ses inconvénients sont présentés dans ce chapitre.

### 2.2. Développement de la décharge couronne pour différentes polarités de la tension appliquée

Selon la polarité de l'électrode et l'intensité du champ électrique, la décharge couronne peut être positive ou négative. On distingue, en effet plusieurs modes de décharges couronnes.

Pour une polarité positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense, ainsi ils sont rapidement captés par l'anode, ce qui a pour effet de laisser dans l'espace entre les électrodes les ions positifs, autre produit des avalanches électroniques, ces ions positifs sont plus lourds et plus lents que les électrons et forment la charge d'espace positive qui se déplace vers la cathode, où le champ électrique est moins intense [5-7].

Cependant dans le cas d'une polarité négative, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques sont repoussés par la cathode vers la zone de champ électrique plus faible. Ceux-ci se recombinent rapidement avec les molécules neutres et forment des ions négatifs. Pendant ce temps, les ions positifs créés lors des avalanches électroniques s'approchent de la cathode dans la zone de champ intense. Ils sont captés avant que les ions négatifs ne s'éloignent suffisamment de la cathode pour ne plus modifier le champ électrique dans la zone active. Les ions négatifs forment alors la charge d'espace négative.

Physiquement en tension alternative, c.à.d dans le cas où y'a les deux polarités de tension : positive et négative, il est possible de voir apparaître tous les modes de décharge couronne en tension continue. Les alternances positives et négatives peuvent donner lieu à leurs modes de décharge respectifs [5]. Cependant, il faut considérer le temps d'évacuation des charges d'espace formées pendant une alternance pour prévoir les modes qui seront possibles pendant l'alternance suivante. La distance entre les électrodes ainsi que le gradient de tension déterminent le temps de migration des ions et leur effet sur les décharges. Si les ions n'ont pas le temps d'être évacués avant le changement de polarité de la tension appliquée, ceux-ci réduiront le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue. [5-10].

### 2.3. Conditions d'apparition de l'effet couronne

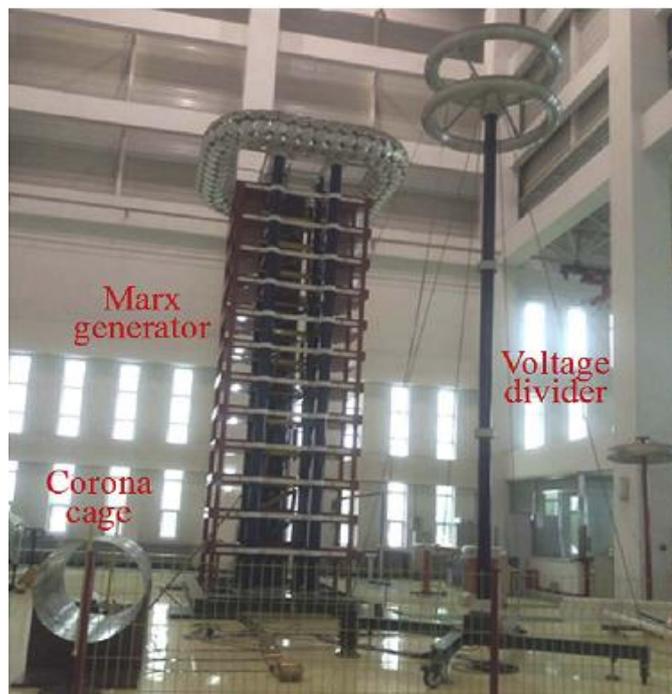
Si le potentiel appliqué entre conducteurs d'une ligne de transmission ou entre des cylindres concentriques augmente progressivement, une tension est finalement atteinte à laquelle un bruit de sifflement est entendu et s'il fait sombre, une lumière violette pâle est visualisée autour des conducteurs (Figure 2.1). Cette tension s'appelle le point critique visuel de la couronne. La perte augmente très rapidement lorsque la tension augmente au-dessus de ce point. La lueur ou la panne commence en premier près de la surface du conducteur, car la densité ou le gradient de flux diélectrique est le plus important.

Les premières enquêtes sur la couronne ont été publiées par le pionnier F. W. Peek (1881-1933) en 1911 [11]. Parce que l'effet couronne est devenu un sujet important pour l'intérêt de la recherche, des investigations considérables ont été faites pour mieux comprendre ce phénomène. Dans de nombreux pays, des recherches expérimentales ont été réalisées sur l'environnement électromagnétique des lignes HVDC [4, 10, 12-16], des recherches ont produit de nombreuses formules empiriques pour le calcul de la perte couronne, du bruit audible et des interférences radio.

Un certain nombre d'études expérimentales a été effectuée, utilisant une configuration cylindrique concentrique pour déterminer le gradient de transition couronne de conducteurs cylindriques lisses [12, 15, 16] à l'aide d'un générateur de haute tension et de matériels de mesure et de protection. La Figure 2.2 en présente un exemple.



**Figure 2.1** Effet couronne sur les lignes de transmission.



**Figure 2.2** Setup : cage couronne et système de mesure numérique

Une formule empirique des conducteurs sur un cylindre lisse est en fonction d'un champ superficiel, de rayon du conducteur et de la densité de l'air, a été développée par Peek [11], donnant le champ électrique critique pour l'apparition couronne où cette formule a été trouvée quand Peek a utilisé le setup de mesure illustré sur la Figure 2.3.

$$E_c = E_p \delta \left( 1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r_0}} \right) \quad (2.1)$$

Où:  $E_c$  : est le champ critique, en kV/cm ;

$E_p$  : est le champ superficiel,  $E_p = 31$  kV/cm ;

$K$  : est égale à 0,308 ;

$r_0$  : est le rayon du conducteur, en cm ;

$\delta$  : est la densité relative de l'air ;

$$\delta = \frac{3,92 P}{273 + T} \quad (2.2)$$

$\delta = 1$  pour  $P=76$  cm Hg et  $T = 25$  °C ;

$T$  : est la température, en °C ;

$P$  : est la pression de l'air, en cm Hg.



**Figure 2.3** Montage de mesure utilisé par F.W.PEEK.

Cette formule, reliée à l'effet de couronne, montre un effet non-négligeable de la température ambiante sur le champ critique  $E_c$  [6, 17-19], ainsi que l'état de surface du conducteur qui est très important dans la détermination du champ électrique.

La rugosité superficielle réduit le champ critique, et on rend compte de cet

effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental 'm' inférieur ou égal à 1, appelé coefficient d'état de surface [9, 11].

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

$$E_0 = mE_c \quad (2.3)$$

En 1972, Waters [13, 20], après des recherches expérimentales, avait proposé une formule empirique permettant d'évaluer le champ critique minimum  $E_0$ , en kV/cm, sous des chocs de tension pour un conducteur cylindrique.

$$E_0 = 23,8m \left[ 1 + \frac{0,67}{r_0^{0,45}} \right] \quad (2.4)$$

Où :

$r_0$  : est le rayon du conducteur, en [cm].

$m$  : est le coefficient d'état de surface du conducteur.

Ce champ varie en fonction de la densité de l'air et de la tension critique. Il peut être déterminé par :

$$E_0(\delta) = E_0 \delta^b \quad (2.5)$$

Où :

$b$ : est une constante empirique variant entre 0,5 et 0,67.

D'autre part, En 1976, Beohem [17] développait une expression empirique pour le calcul du champ d'apparition couronne sous des impulsions de tension positives en fonction de la raideur de front. Cette expression est :

$$E_0^+ = 22,8 \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt[3]{r_0}} + \frac{A}{r_0} \sqrt{\frac{dv}{dt}} \right] \quad (2.6)$$

Où :

$E_0^+$  : Le champ électrique en polarité positive, en [kV/cm] ;

$r_0$  : est le rayon de courbure, en [cm] ;

$A$  : est une constante déterminée expérimentalement ;

$dv/dt$  : est la raideur du front de l'onde de tension appliquée, en [kV/s].

D'une manière générale, les surtensions impulsionnelles survenant sur les lignes de transport sont susceptibles de provoquer une décharge couronne dans la plupart des cas, car la tension d'apparition couronne est presque toujours dépassée. Cette tension est un paramètre important tandis que les ingénieurs concepteurs considèrent pour optimiser les dimensions et les configurations des conducteurs de faisceau, et elle est également importante pour les études d'atténuation de surtension. Diverses formules empiriques ont été proposées dans la littérature pour calculer la tension d'amorçage des conducteurs cylindriques. La formule modifiée de Peek [11] est utilisée pour une configuration coaxiale et elle est donnée par la formule suivante:

$$U_0 = 31 \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{r_0}} \right) r_0 \ln \frac{r_b}{r_0} \quad (2.7)$$

Où :  $r_b$  et  $r_0$  sont respectivement le rayon intérieur et extérieur de l'électrode cylindrique coaxial.

Pour une configuration conducteur au dessus du sol, la formule suivante est utilisée [13]:

$$U_0 = E_0 r_0 \left( \frac{2h - r_0}{2h} \right) \ln \left( \frac{2h - r_0}{2h} \right) \quad (2.8)$$

$h$  : est la hauteur du conducteur par rapport au solen [m].

#### 2.4. Application et utilisation de l'effet couronne

La génération des charges électriques dans le phénomène d'effet de

couronne est utilisée dans plusieurs procédés industriels intéressants tels que les précipitateurs électrostatiques, destruction des polluants, la vaporisation électrostatique, la dépollution des gaz, la séparation électrostatique, traitement de surface, charger électriquement des isolants sous forme de plaques ou de granulés, générateur d'ozone, comme elle est utilisée dans l'élimination de l'électricité statique dans les photocopieuses ou les imprimantes à jet d'encre, et dans les neutraliseurs [19-24].

Le chargement des particules ciblées à l'aide des charges électriques générées par l'effet de couronne, peut recueillir des poussières nuisibles avant leur évacuation dans l'air ou encore expulser de fines particules (ex: peinture) à un débit très précis et régulier. [19-26].

Quant aux cas des lignes électriques, lorsqu'une surtension transitoire survient sur une ligne en raison d'une foudre ou d'une opération de manœuvre, elle se propage dans les deux directions et peut devenir néfaste pour l'équipement de la ligne et de station. Des études appropriées de coordination d'isolement doivent être faites pour s'assurer que ces surtensions sont effectivement atténuées avant qu'elles ne touchent les terminaux d'équipement. A cet égard, l'effet couronne est connu pour son effet bénéfique puisqu'il aide à atténuer l'énergie contenue dans la surtension de déplacement.

## **2.5. Effets indésirables de la décharge couronne**

Au niveau du transport de l'énergie électrique et sur les composantes des lignes de transmission à haute tension, l'effet couronne peut apparaître de façon indésirable, où il représente une source des pertes électriques, d'interférences radiophoniques, de bruits audibles, de la détérioration de l'état de surface des composants et de vibrations mécaniques des conducteurs. De plus, les sous-produits de l'effet couronne dans les milieux isolants de certains disjoncteurs (SF<sub>6</sub>) et transformateurs (huile), diminuent leur pureté et leurs propriétés isolantes. Les décharges électriques génèrent aussi des gaz dans l'air environnant

comme l'ozone, qui est un gaz irritant. [26, 27].

De ce fait minimiser l'effet de couronne demeure un défi de taille dans la conception des composants de la haute tension.

### 2.5.1. Pertes d'énergie

Les pertes d'énergie annuelles causées par l'effet couronne sont relativement faibles, surtout en période de mauvais temps que ces pertes elles deviennent importantes.

Les pertes maximales pendant des courtes périodes perturbées, par exemple sous la pluie ou la neige, peuvent atteindre des centaines de kW/km. Cette augmentation des pertes a une influence négative sur la livraison d'énergie, surtout pendant les périodes de pointes.

Les pertes entraînées par l'effet couronne augmentent avec le niveau de tension. En vue de réduire les pertes d'énergie très élevées, les concepteurs des lignes de transport déterminent les diamètres des conducteurs en fonction du champ critique  $E_0$ .

En pratique, des abaques basés sur  $E_0$  et l'intensité des précipitations (moyenne et maximale) permettent d'estimer facilement les pertes par effet de couronne [9, 10, 26, 27, 29-31].

Peek [11] a noté que les pertes de puissance sous les conditions atmosphériques dues à l'effet couronne sont données par :

$$P_c = 2435 \left( \frac{f + 25}{\delta} \right) \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_d)^2 10^{-5} \quad (2.9)$$

Où

$f$  : est la fréquence d'alimentation en [Hz] ;

$V$  : est la tension de phase-neutre en [kV] ;

$V_d$  : est la tension disruptive par phase en [kV] ;

$r$  : est rayon du conducteur en [cm] ;

$D$  : est la distance entre les conducteurs en [cm] ;

$\delta$  : est la densité relative de l'air, donnée par l'équation (2.2).

A partir de la formule de Peek, il est clair que les pertes couronne est une fonction de facteur de correction de la densité d'air  $\delta$  qui apparaît directement dans le dénominateur de l'expression (2.9) et indirectement dans la valeur de tension critique disruptive donnée par la formule suivante [17].

$$V_d = 21,2 m_0 \delta r \ln \frac{D}{r} \quad (2.10)$$

Les mauvaises conditions atmosphériques comme la pluie, la grêle et la neige réduisent la tension critique disruptive et donc augmente l'effet couronne et par conséquent augmente les pertes d'énergie.

La formule empirique dérivée par Peek a certaines limitations est donnée des résultats corrects si le rapport  $V/V_d$  est supérieur à 1,8, la fréquence doit être dans l'intervalle 25-125 Hz, et le rayon du conducteur doit être plus grand que 0,25 cm. Cependant, la formule de Peterson donne de meilleurs résultats quand la valeur du rapport  $V/V_d$  est inférieure à 1,8 [17]. Cette formule est identifiée comme suit:

$$P_c = \frac{21 \cdot 10^{-6} f_x V^2}{(\log_{10} \frac{D}{r})^2} f \quad (2.11)$$

$f_x$ : est le facteur de correction pour le rapport  $V/V_d$ ;

$V$  : est la tension de phase en kV.

Le code de calcul EFCOR (Effet CORona) [32], développé par EDF (Electricité De France) pour analyser la formation des pertes est considéré comme un outil remarquable, car il permet de suivre physiquement le mécanisme des pertes. Au-delà, les méthodes pratiques dérivées d'EFCOR permettent une prévision plus que satisfaisante au niveau des pertes sous pluie, précisément dans les conditions où elles sont économiquement les plus gênantes [18].

### 2.5.2. Interférences radio - télévision

Proches aux lignes de transport d'énergie électrique, des interférences peuvent être également captées par les antennes des récepteurs lors des décharges couronne [33-36].

Il est même probable que l'énergie de ces charges peut se propager et se réfléchir sur les structures métalliques et les grilles dans l'air libre pour se rendre aux antennes éloignées. Cette possibilité est encore plus probable en temps perturbé. [9, 27, 29, 30, 35-37].

Les courants induits peuvent être conduits par les inductions électromagnétiques sur le conducteur neutre et peuvent atteindre les récepteurs (radio et TV) et créer des perturbations des interférences radio – télévision. [38].

### 2.5.3. Bruit audible

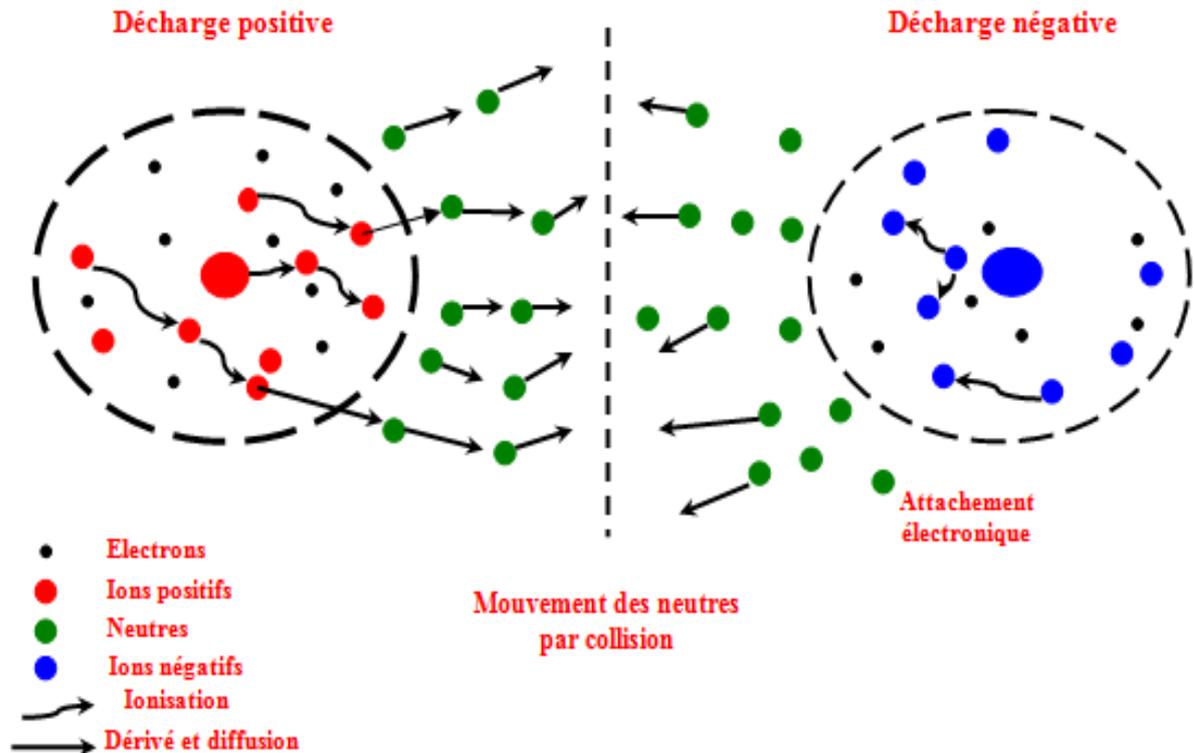
Pendant la pluie, l'effet de couronne donne des impressions acoustiques de crépitement et de sifflements. Dans les lignes de transport d'énergie, pour une tension qui dépasse la valeur 500 kV, les bruits audibles constituent un problème important [9, 27, 29, 30, 35, 39]. Les perturbations provoquent à l'échelle locale une augmentation du champ électrique provoquant ainsi un court-circuit électrique de molécules d'air à la zone voisine, et par conséquent une décharge partielle.

Les travaux de Pakala [40, 41] poussent les mesures du bruit couronne pour un plus haut voltage de 640 à 800 kV à l'aide des antennes placées à 60m aux lignes hautes tensions. Ces mesures montrent que la puissance de ce bruit diminue quand sa fréquence augmente.

### 2.5.4. Vent ionique

Le phénomène de vent ionique est connu depuis le début de 18<sup>ème</sup> siècle. Les ions créés par la décharge couronne continuent de dériver et accélérés sous l'effet du champ électrique. Le vent ionique est la mise en mouvement globale des molécules du gaz par ces collisions [9, 42-45].

L'apparition du vent ionique est directement liée à l'existence de la zone unipolaire. La représentation schématique de ce phénomène est montrée sur la Figure 2.4.



**Figure 2.4** Mécanismes ioniques à la base du vent ionique pour les décharges couronnes positives et négatives.

### 2.5.5. Vibrations mécaniques des conducteurs

En présence de pluie, de brouillard ou de neige mouillée, sous la présence d'un champ électrique élevé, des vibrations mécaniques induites par l'effet couronne sur les conducteurs portés à la haute tension sont observées. L'étude des vibrations induites par l'effet couronne, menée depuis quelques années à l'Université du Québec à Chicoutimi, a permis d'identifier et de vérifier expérimentalement les mécanismes de vibrations [30, 46-49].

Ce type de vibration est associé à la décharge par effet couronne des gouttes d'eau suspendues en dessous des conducteurs [27, 29, 30, 50].

Les causes principales du phénomène de vibration par l'effet couronne sont : la présence de la charge d'espace et du vent ionique.

### 2.5.6. Production des gaz

Les lignes à haute tension peuvent être aériennes, souterraines ou sous-marines. Ils sont souvent utilisées pour transport des longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques, ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques. [27].

La décharge couronne, est accompagnée d'un dégagement d'odeur due à la formation de l'ozone. En présence de l'humidité où pour le cas des lignes sous-marines, un liquide se produit qui est l'acide nitrique et cause de la corrosion du conducteur [27, 51,52].

La génération d'ozone dépend du matériel diélectrique, de la configuration des électrodes, et de la source d'énergie utilisée.

### 2.6. Conclusion

On a donné des informations d'ordre général sur l'effet couronne et les conditions de son apparition et les différents modes de décharge couronne pour tous les types des polarités appliquées.

L'utilisation de l'effet couronne dans l'industrie et les lignes de transmission, ainsi les conséquences négatifs et les différents facteurs influent sur la décharge couronne ont été aussi illustrés.

L'effet couronne ou décharge couronne a un effet bénéfique pour les systèmes de transport d'énergie car elle fait l'atténuation et la distorsion des ondes de surtension qui se propagent sur les lignes de transmission. Pour cette raison on va citer avec une étude approfondie les différents modèles de l'effet couronne existents dans la littérature dans le prochain chapitre.

# Chapitre 03

## APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION COURONNE

---

### 3.1. Introduction

Dans une ligne de transmission d'énergie électrique, une décharge couronne se produit à la surface d'un conducteur lorsque l'intensité du champ électrique sur cette surface dépasse la valeur critique de claquage d'air.

Le phénomène de la décharge couronne a été étudié depuis longtemps par plusieurs auteurs sur le plan aussi bien expérimental que sur le plan de la modélisation.

Un certain nombre de mesures a été pris et des explications physiques ont été formulées pour mieux comprendre les caractéristiques couronne dans les lignes de transmission [53-62]. Cependant, la complexité physique du phénomène a rendu difficile la formulation des modèles simples qui peuvent être utilisés dans le cadre de simulations des transitoires au niveau du système à usage général, comme par exemple dans le programme EMTP.

En raison de la difficulté du travail et des expériences dans les laboratoires à haute tension et pour gagner du temps et maintenir la sécurité des équipements et des éléments utilisés dans les expériences de laboratoire, plusieurs auteurs ont simulé des modèles analogiques de circuiterie et analytiques basés sur des caractéristiques de charge en fonction de la tension mesurées expérimentalement (courbes Q-V). Cependant, quand la description physique est dérivée analytiquement ou mesurée expérimentalement, elle doit encore être traduite en un modèle de circuit efficace et pratique pour la simulation de système de transmission.

Dans le présent chapitre, nous allons présenter une synthèse sommaire sur

---

les différentes caractéristiques de la décharge couronne ainsi les modèles approuvés et adoptés par différents auteurs et chercheurs existant dans la littérature. Les modèles analogiques et numériques sont classés chronologiquement dans la suite de ce chapitre.

### **3.2. Etat d'art sur le développement des modèles couronne**

Les phénomènes transitoires et les surtensions dues aux manœuvres ou aux coups de foudre ont été étudiés depuis l'installation des réseaux de transport et de distribution. Ces surtensions se propagent le long des lignes de transmission et peuvent entraîner des dégâts considérables dans le système d'isolation et des appareils de protection. Plusieurs investigations expérimentales et théoriques ont étudié les effets de ces phénomènes sur les équipements électriques [11].

L'impact de l'effet couronne sur les surtensions de choc a été étudié par plusieurs chercheurs depuis les années 1911[11]. Sachant que la décharge couronne se produit lorsque le champ électrique appliqué dépasse l'intensité maximale du champ disruptif de l'air. Peek est le premier pionnier dans ce domaine. Il était publié ses résultats de recherche qui sont toujours en vigueur, comme sa loi bien connue sur l'apparition de l'effet couronne [11]. Pendant les années 1911 à 1930 les progrès étaient lents. L'effet couronne se développe autour de la surface d'un conducteur soumis à des surtensions, et absorbe une quantité d'énergie de l'onde de choc durant sa propagation le long du conducteur. Cette énergie se traduit par des pertes dans les mécanismes d'ionisation et de mouvement des particules qui accompagné par une augmentation de la capacité du conducteur et est responsable de l'atténuation et la distorsion des ondes de surtensions de choc.

Quelques autres résultats importants sont la détermination de la caractéristique hystérétique de l'effet couronne par Ryan et Henline en 1924 [63] et les études initiales de la distorsion d'onde due à l'effet couronne sont publiés par Skilling et Dykes en 1937 [64]. Dans les années 50, Wagner, Lloyd et Gross ont mené un vaste programme de recherche sur la décharge couronne et ses

effets sur la propagation des ondes de choc [65, 66]. Ils ont fait plusieurs tests sur une ligne de transmission courte. Leurs résultats, sont publiés en 1954 [65], et sont souvent pris comme référence pour des nouvelles méthodes de simulation. Wagner et Lloyd ont également fait des expériences visant à la caractérisation du phénomène de l'effet couronne [66]. C'est peut-être à cause des limites de leur équipement de mesure qu'ils ont conclu à tort que la décharge couronne était un phénomène essentiellement statique. Dans ce contexte, on dit qu'un phénomène ou sa représentation est statique lorsque la charge spatiale est fonction uniquement de la tension instantanée et non de sa vitesse de variation par rapport au temps " $\partial v/\partial t$ ". Si, d'autre part, la charge spatiale dépend aussi de  $\partial v/\partial t$ , le phénomène ou sa représentation est dit dynamique. Des expériences récentes montrent que l'effet couronne est dynamique [2, 67-69]; cependant, malgré l'équipement et les techniques modernes, l'effet de  $\partial v/\partial t$  ne semble pas encore entièrement déterminé.

Wagner et Lloyd ont également proposé une technique de différence finie pour évaluer la distorsion d'onde progressive due à l'effet couronne [66]. Il semble que c'est la première application d'un ordinateur numérique à ce type de problème. Une autre technique numérique a été proposée plus tard, en 1965, par Stafford, Evans et Hingorani [70]. Ces auteurs ont suggéré que les développements ultérieurs utilisent les courbes caractéristiques des équations aux dérivées partielles (EDP) des lignes de transmission.

Ces courbes, appelées caractéristiques, ont comme propriété que, où EDP se transforme en équations différentielles ordinaires (ODE). En 1970 Zielinsky a présenté une méthode graphique basée sur ces caractéristiques [71]. Son applicabilité était cependant très limitée.

Dans les années 70 et jusqu'au milieu des années 80, l'accent de la recherche sur les systèmes transitoires de puissance était orienté vers les modèles de lignes linéaires.

Deux techniques complémentaires ont émergé. L'une basée sur des méthodes de domaine de fréquence [72, 73] et, l'autre, sur des méthodes de

domaine temporel [74-76]. Plusieurs développements réussis ont conduit au développement du programme électromagnétique transitoire (EMTP) qui est devenu l'un des programmes les plus utilisés dans son genre [74]. Sa disponibilité, ainsi que le fait que le domaine temporel est beaucoup mieux adapté au traitement des non-linéarités, a encouragé le développement de techniques compatibles EMTP pour simuler des lignes avec l'effet couronne. Parmi eux, il y a celui proposé par KC Lee [77], celui de Semlyen et Wei-Gang [78, 79], celui de Hamadani-Zadeh [80], celui de Carneiro, J. Martie Dommel et Ghallegher [67, 81, 82], plus récemment [68].

De nouveaux progrès dans le sujet nécessitent une compréhension profonde du phénomène couronne. Certaines connaissances ont été fournies par les expériences menées à L'Institut de Recherche Hydro-Québec (IREQ) [69] et à Electricité de France (EDF) [83]. Cependant, beaucoup d'autres expériences sont nécessaires. Parce que, ils sont très difficiles et coûteux à réaliser, il peut être pratique de les coordonner avec le développement des modèles mathématiques de l'effet couronne basés sur les processus physiques réels. Un exemple d'un tel modèle mathématique / physique est celui proposé par Abdel-Salam et Stanek [84]. D'autre part, la simulation des transitoires nécessite moins de calculs dans les modèles couronne intensifs. Des modèles plus simples qui visent à préserver les fonctionnalités pertinentes pour la propagation des ondes transitoires ont déjà été proposés. Parmi eux, les modèles couronne statiques de Gary, Dragan et Cristescu [85], le modèle dynamique basé sur des coques de charge spatiale par Harrington et Afghahi [86], le modèle raffiné de coques par Semlyen et Wei-Gang [78] et le modèle dynamique basé sur le retard de la formation de la charge par Li, Malik et Zhao [77]. Celles-ci les modèles devraient encore être soumis à d'autres tests qui établiraient leur gamme de validité. Les tests nécessiteraient toutefois une méthode très fiable et flexible pour calculer les transitoires non linéaires ainsi qu'un ensemble d'expériences de lignes bien documentées, tels que les expériences sur les lignes menées par Wagner, Lloyd et Gross.

Il y a seulement quelques autres qui sont bien documentés. Parmi eux, sont ceux rapportés par Gary, Dragan et Cristescu [83], ceux d'Ouyang et Kendall [88]

et ceux d'Inoue [89, 90]. Plus d'expériences sont nécessaires et il est souhaitable que certains d'entre eux impliquent des ondes avec de multiples pics et / ou réflexions [91].

Récemment d'autres modèles ont été proposés par [3, 4, 12, 13, 92-94] ces modèles sont basés sur les propriétés physiques du phénomène et donne des bons résultats.

Pour résoudre la non-linéarité de la décharge couronne, certains chercheurs se sont tournés vers des représentations de circuits, dans lesquelles l'effet couronne était considérée par une branche non linéaire composée d'une diode et d'un condensateur [95-97]. Dans d'autres travaux, ils consistaient en une diode, une résistance et un condensateur [12, 98-99]. Pendant ce temps, certains auteurs ont utilisé des courbes expérimentales de charge -tension (Q-V) pour évaluer les paramètres du circuit équivalent [4, 93, 96, 100-105]. Le modèle numérique adopté dans les articles précédents avait pour but d'évaluer les courbes Q-V et de prédire les pertes d'énergie dues à l'effet couronne. Comme la décharge couronne est un phénomène hautement non linéaire et, par conséquent, sa modélisation pour le calcul de l'atténuation et de la distorsion est très complexe.

En raison des différences trouvées dans les modèles cités dans la littérature, il a été nécessaire de trouver d'autres modèles qui simulent le phénomène d'une manière physique qui nous rapproche au phénomène couronne en raison de la difficulté de représenter et de simuler les phénomènes qui sont associés comme: l'ionisation, l'attachement, recombinaison etc...

Des recherches approfondies sur les méthodes numériques pour la simulation de lignes avec l'effet couronne ont été menées à [94], et concernant les techniques dans la modélisation pour calculer et analyser la propagation des ondes de surtension sur les lignes de transmission électriques, des chercheurs ont proposés d'intégrer le processus de décharge couronne avec les équations de la ligne proposée à l'aide des équations télégraphes [75, 76]. D'autres chercheurs ont proposés d'introduire le phénomène comme une capacité linéaire dans chaque

section de la ligne divisée a des courtes sections, mais ils ont trouvés des oscillations numériques dans leurs résultats [78, 82, 12, 98-100] , récemment, et a titre de rectifier ces oscillations y'a d'autres auteurs qu'ils sont introduit cette capacité mais d'une manière non linéaire par des équations qui se base sur les propriétés physiques du phénomène comme les travaux de [67, 94, 106, 107], utilisant le logiciel ATP/EMTP des régimes transitoires, et pour plus de précision dans la présentation du phénomène les auteurs de [94, 106] utilisent un composant non linéaire d'ATP/EMTP, de type-94, qu'est similaire au composant réel, et de l'implanté dans chaque section de la ligne de transmission, et par conséquence les résultats trouvés sont plus précises et sont trouvés de bonne concordance avec les mesures.

Plusieurs résultats importants sont issus de ce travail. En premier lieu, il a été établi que l'effet couronne à un effet bénéfique sur la propagation des ondes de choc transitoires [108]. Deuxièmement, les effets de la dépendance en fréquence sont traités avec des ondes oscillatoire, troisièmes le modèle adopté dans ce travail est développé pour l'introduit dans les lignes de transmission pour l'analyse des surtensions propageant sur la ligne.

### 3.3. Caractéristiques générales de la décharge couronne Q-V

Dans l'analyse des surtensions, l'effet couronne est généralement considéré par les caractéristiques charge -tension (Q-V) utilisés pour décrire le phénomène de la décharge couronne [89, 13, 93-94, 96, 108-111].

Les caractéristiques couronne dans les lignes de transmission sont habituellement obtenues grâce à des mesures expérimentales. Il existe deux types de mesures de base: 1) les courbes Q-V, qui sont des fragments de charge en fonction de la tension, et 2) des mesures des ondes de tension qui se propageant le long d'une ligne de transmission [61].

Ces caractéristiques ont permis aux chercheurs de modéliser le phénomène de la décharge couronne. Les modèles ont été groupés en deux familles :

- Analogiques de circuiteries.
- Analytiques qui sont basés sur les propriétés physiques du phénomène.

L'un des principaux obstacles à la modélisation de l'effet couronne est la difficulté de décrire ses caractéristiques physiques. Plusieurs processus de particules se produisent en même temps et une distribution compliquée du champ électrique crée autour du conducteur. Malgré cela, certaines hypothèses de base peuvent être faites à partir d'un point de vue de simulation, dont plusieurs ont été utilisés par d'autres chercheurs:

- ✚ L'effet de couronne peut être décrit comme un cylindre d'air ionisé. Ce cylindre est confiné à un certain rayon et entour le conducteur, à son centre.
- ✚ Les principales caractéristiques de l'effet couronne sont liées à trois processus de particules, la première : l'ionisation, qui produit des électrons libres et des ions positifs, la deuxième : l'attachement, et la troisième : la recombinaison, qui produisent des ions négatifs [112, 113].
- ✚ Pendant l'état initial de la couronne, l'avalanche électronique est la composante principale du courant couronne. Ce dernier présente un temps de montée rapide et une forte chute (une chute encore plus nette se produit si le nuage d'électrons a une très faible propagation dans l'espace comme cela se produit pour les surtensions très rapides) [106, 112, 114].
- ✚ La constante de temps des avalanches électroniques est très faible par rapport aux constantes de temps des autres processus [112, 113]
- ✚ La tension d'apparition couronne  $V_i$  est constante pour un conducteur et une configuration physique de la ligne de transmission donnés. L'augmentation apparente dans la tension d'apparition couronne est due aux caractéristiques dynamiques du processus d'avalanche (décalage statistique et temps de retard de formation de la charge d'espace [106, 13].
- ✚ Après un certain temps, le courant couronne est principalement causé par l'écoulement d'ions négatifs et positifs [105, 112, 113].

- ✚ La capacitance totale de la section ionisée augmente à la suite de la redistribution des particules [74].

Une brève revue sur les différents modèles de phénomène couronne existent dans la littérature. Elle est présentée dans la partie suivante.

### 3.4. Modélisation de l'effet couronne

Une approche générale dans la modélisation de l'effet couronne consiste à représenter la décharge couronne comme une branche de dérivation groupée, insérée entre les sections de la ligne de transmission, utilisant un modèle de circuit équivalent, en se basant sur l'idée de rajouter une capacité supplémentaire au-dessus de la tension d'apparition couronne.

Cette augmentation dans la capacité du conducteur, est dite "capacité couronne" due à la production des charges d'espace autour du conducteur, qui est une fonction de l'amplitude et de la forme d'onde de choc, ainsi que de la géométrie de la ligne.

C'est ce qui permet aux chercheurs de faire un certain nombre des modèles pour représenter le phénomène couronne. Certains modèles sont des modèles de circuiterie simples contenant une capacité ayant pour valeur les valeurs trouvés par des expériences dans les laboratoires.

Cependant, d'autres chercheurs ont adopté des modèles numériques. En utilisant des suppositions extraites par des expériences dans le laboratoire et de nombreuses études physiques.

Dans la suite, une explication détaillé sur le développement dans ces deux types de modèles: analogiques et analytiques, et les différences trouvées par les chercheurs dans ces modèles basés sur des théories physiques et scientifiques.

#### 3.4.1. Modèles de circuiteries ou analogiques

Les débuts de la modélisation étaient avec M. Wagner et Lloyd [15]. Ces auteurs ont été proposés, pour représenter l'effet couronne, d'utiliser une ou

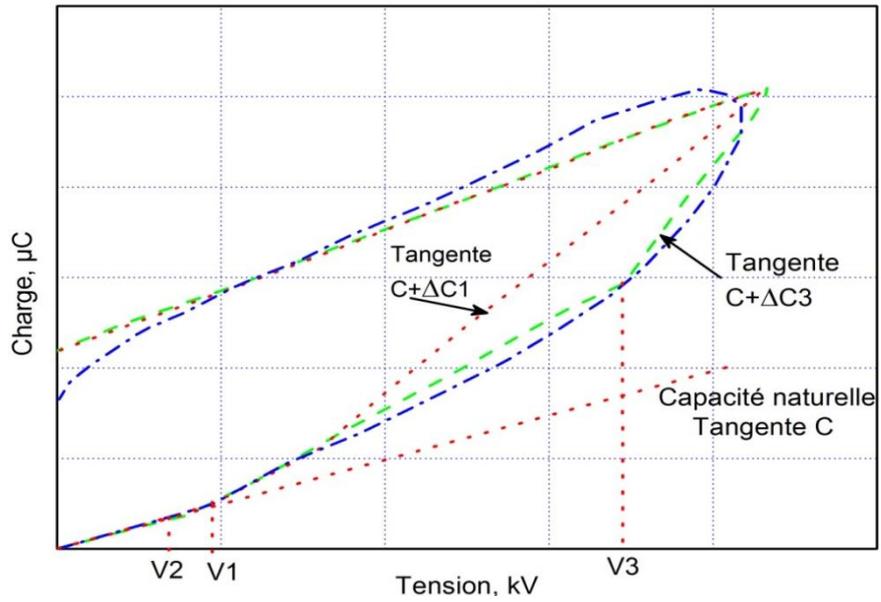
deux capacités supplémentaires sur le nœud où la tension dépasse le niveau de tension de seuil (Figure 3.1). Cette capacité est variée avec la tension, et les auteurs ont été utilisés les courbes Q-V des caractéristiques Charge- Tension pour obtenir les paramètres de cette capacité variable. Ces observations sont la base de la plupart des modèles mathématiques et de circuits de décharge couronne utilisés après.

Ces modèles ont été analysés par d'autres chercheurs [82, 113] où les résultats montrent qu'ils ne sont pas capables de représenter certains aspects physiques de ce phénomène.

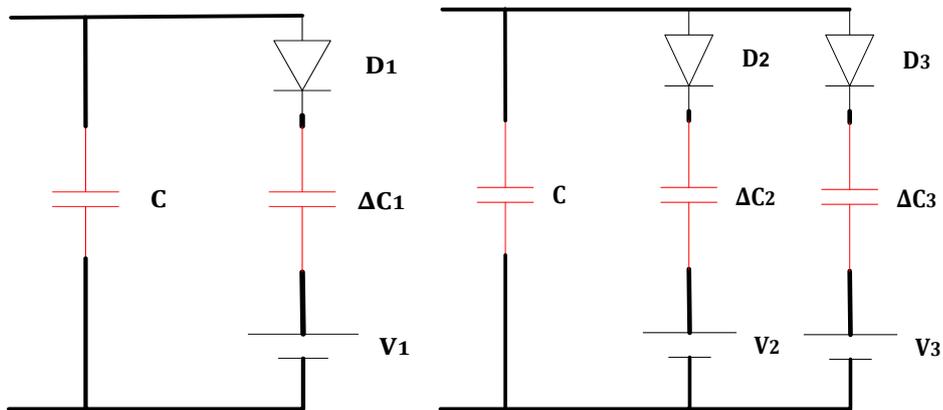
Kudyan et Shih en 1981 [102] se sont basés sur le modèle proposé par Wagner, et ont représentés l'effet couronne par le modèle schématisé dans la figure 3.2. Dans ce modèle une diode branché en série avec une résistance branché en parallèle avec une capacité, pour représenter le processus des pertes d'énergie et le changement dans la capacité de la ligne, le tout est connecté avec une source DC qui représente la tension d'apparition couronne (Figure 3.2).

Le même modèle de Kudyan et Shih a été adopté par Motoyama et al en 1987 [115], composé des circuits R-C et des diodes pour un système triphasé, pour une longueur de la ligne  $\Delta L$  supérieur a 300 m, présenté par la figure 3.3.

Ils constatent que ce modèle n'est pas valable pour les chocs de foudre pour l'étude de la propagation des phénomènes transitoires sur les lignes de transport, puisqu'il présente des oscillations numériques importantes dans les résultats obtenus, dès que les diodes D2 et D3 deviennent conductrices.



a. Courbes typiques Q-V.



b. Circuit de modèle analogique.

Figure 3.1 Circuit des modèles couronne et ces réponse.

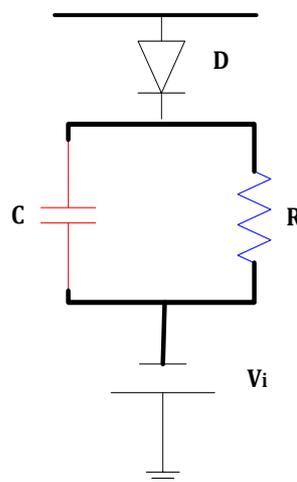
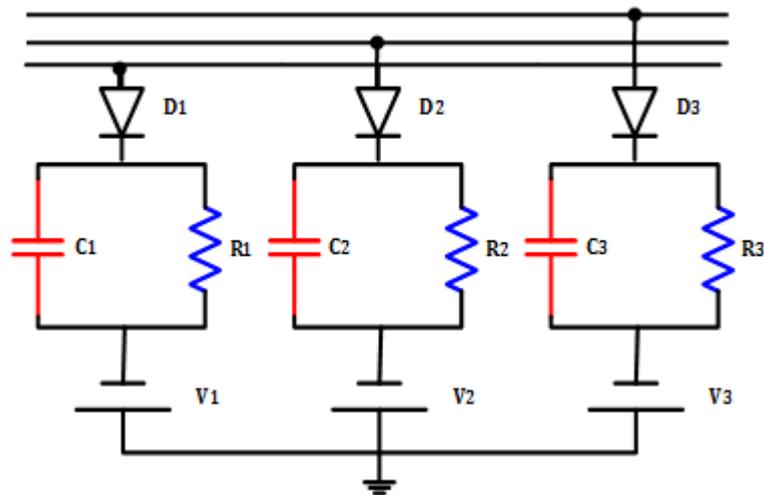


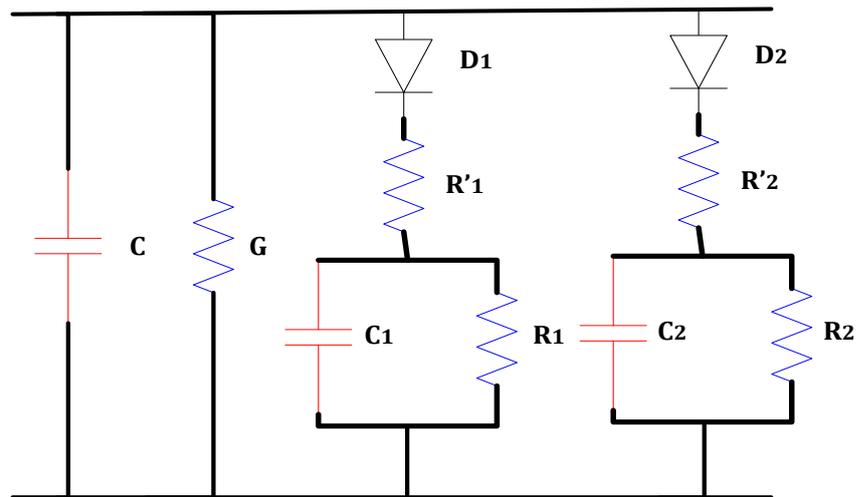
Figure 3.2 Circuit couronne équivalent proposé par Kudyan et Shih.



**Figure 3.3** Modèle proposé par Motoyama et al.

Christopoulos [116] a utilisé un modèle de circuit basé sur celui proposé par Kudyan et Shih [102]. Dans ce circuit, les résistances sont branchées en parallèle avec les capacités. Ce circuit montre une petite amélioration par rapport au modèle de Wagner dans la mise en forme des courbes. De même, Maruvada et al en 1977 [61] ont introduit des éléments d'interruption supplémentaires pour mieux représenter les pertes d'énergie. Comber et al [117] ont conçu un circuit dans lequel la capacité couronne se compose de deux branches: la charge dans l'une des branches peut revenir au conducteur, alors que la charge dans l'autre sera perdue par une conductance. Cela permet de représenter mieux le processus couronne et une meilleure représentation des courbes Q-V.

Portela (Figure 3.4) [118] affirme que des résistances en série  $R_1'$  et  $R_2'$  sont nécessaires pour présenter la dissipation d'énergie lors de l'apparition de la décharge couronne tandis que  $R_1$ ,  $R_2$ , ensemble avec  $C_1$  et  $C_2$ , peuvent être utilisés pour représenter l'atténuation de l'ionisation (les pertes couronnes). Les éléments  $D_1$  et  $D_2$  se sont des diodes, permettent également de circuler un courant dans le sens inverse afin de tenir compte de certaines charges pouvant revenir au conducteur.



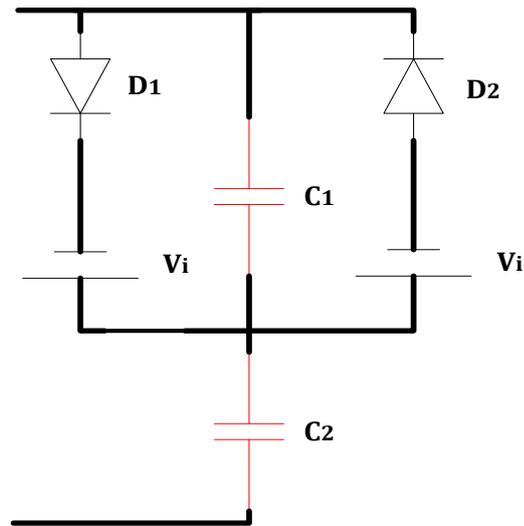
**Figure 3.4** Circuit du Modèle Couronne de Portela.

Correia de Barros, après avoir examiné en détail le mécanisme de génération et de déplacement de la charge spatiale à proposé le modèle illustré dans la figure 3.5 en tant que modèle de circuit réduit [114]. Deux caractéristiques intéressantes de ce modèle sont:

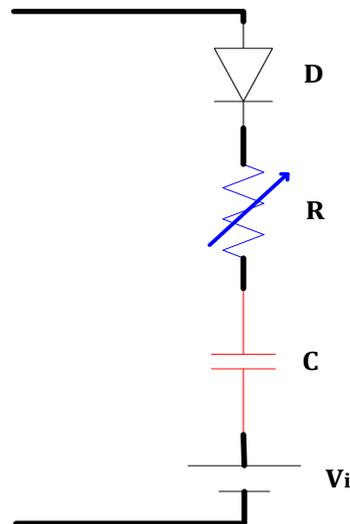
- ❖ L'absence des conductances ou des résistances dans le circuit, qui oblige le modèle à produire des caractéristiques Q-V similairement à ceux produites par le modèle de la figure 3.1 (b),
- ❖ La connexion en série des capacités où elle est structurée par De Barros comme une différence conceptuelle importante avec d'autres modèles de circuit.

En 1994 Correia de Barros et Célia de Jessus [106, 119], montrent que ce modèle est suffisant pour l'évaluation de l'atténuation et la distorsion des ondes de surtensions lors de sa propagation sur les lignes de transmission. Ils ont fait des mesures pour deux cas : en beau temps et sous pluie. Les résultats obtenus montrent que l'effet couronne peut être vue comme un générateur dynamique de charge d'espace déclenchée au delà du seuil critique.

Santiago et Castellanos [113] ont proposé un circuit qui comprend une résistance non linéaire comme le montre la figure 3.6. L'addition de cette non-linéarité permet une meilleure représentation des constantes de temps associées à l'avalanche électronique et aux écoulements d'ions.



**Figure 3.5** Modèle proposé par Correia de Barros.



**Figure 3.6** Modèle proposé par Santiago et Castellanos.

Des évaluations comparatives de certains de ces modèles de circuit ont été réalisées en utilisant de l'EMTP et présentées dans [113] et [106].

La représentation de la décharge couronne avec les modèles de circuit nécessite l'utilisation des diodes, dont la commutation peut induire des oscillations numériques. Pour éviter ce problème et puisque ces modèles sont basés sur des approximations linéaires ou quasi-linéaires de la courbe Q-V, il peut être considéré comme avantage d'utiliser des modèles mathématiques dans un objectif de résoudre ce problème d'oscillations.

### 3.4.2. Modèles analytiques :

Une première approximation de la non-linéarité du phénomène de la décharge couronne est la représentation linéaire par parties proposée par Gary et al [83], qui correspond à la description mathématique du modèle analogique de Wagner. Dans ce modèle, ils ont représentés la capacité additionnelle due a l'effet couronne par l'expression suivante :

$$C_{cor} = \begin{cases} C_0 & v \leq v_{crit} , \partial v / \partial t > 0 \\ C_0 \beta \left( \frac{v}{v_{crit}} \right)^{\beta-1} & v > v_{crit} , \partial v / \partial t > 0 \\ C_0 \partial v / \partial t \leq 0 & \\ \beta = 0,22 r_c + 1,2 & \end{cases} \quad (3.1)$$

Dans ce modèle,  $v$  est la tension appliquée au conducteur,  $v_{crit}$  est obtenue par la formule de Peek ou par une expression similaire.

$C_0$  est la capacité naturelle où géométrique du conducteur,  $r_c$  est le rayon du conducteur en centimètre et  $\beta$  est un paramètre qui dépend du nombre des conducteurs par faisceau et de la polarité de la tension [120-121].

D'autres chercheurs [72, 86, 122-125] ont opté pour une approche différente. Ils formulent des équations empiriques pour la capacité dynamique qui fournissent des valeurs continues pour  $C$  le long de la partie ascendante de la courbe Q-V, évitant ainsi les oscillations numériques et améliorant certains aspects de la modélisation.

Suliciu et Suliciu [126] ont proposé un modèle mathématique plus complexe dans lequel le chemin de la courbe Q-V, au-dessus de la tension d'apparition couronne, est décrit par une fonction de la dérivée de la tension au front d'onde. Dans ce modèle, la zone de la boucle dépendrait de la pente du front d'onde. Les paramètres du modèle sont identifiés en ajustant un ensemble de courbes Q-V mesurées, variant des surtensions de manuvres aux surtensions de foudres. Les résultats obtenus correspondent à des courbes Q-V mesurées plus étroites et certains auteurs [82, 127] ont utilisés ce modèle dans leurs études de propagation de l'onde de choc.

Le modèle de Suliciu et Suliciu, est basé sur le calcul des courants couronne donné par :

$$i_c = \frac{dq_c}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{si } g_2 \leq 0 \\ g_2 \text{ si } g_1 \leq 0 \\ g_1 + g_2 \text{ si } 0 \leq g_1 \end{cases} \quad (3.2)$$

Où

$$\begin{cases} g_j = k[(C_j - C_0)(V(t) - V_j) - q_c], & j = 1, 2 \\ \text{et} \\ C_2 > C_1 > C_0, V_1 \geq V_2, k_1, k_2 > 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

$I_c$  et  $q_c$  sont le courant [A] et la charge couronne [C].

Ces paramètres sont déterminés par la concordance avec les courbes Q-V mesurées sur des conducteurs sujets à des chocs de tension [128].

Dans cette expression,  $C_0$  est la capacitance géométrique de la ligne et les paramètres restant sont identifiés par un groupe conforme aux courbes Q-V mesurées.

Ce modèle de Suliciu et Suliciu est développé dernièrement par Huang et al [96] dans leur application pour les impulsions exponentielles, double exponentielle et sous impulsions oscillatoires amorties. Sachant que ils ont appliqués le concept de la polarité opposée de décharge couronne, où le modèle de Suliciu être étendu. Dans lequel la trajectoire d'une courbe Q-V est simulée par un certain nombre de parties différentes en fonction de leur comportement ascendant et descendant respectif, et ils sont obtiens une concordance entre les résultats de ce modèle et les résultats expérimentaux publier dans [108].

En 1983 Lee [129] avait développé un modèle non-linéaire dérivant de celui de Umoto et Hara [130]. Ce dernier est similaire a celui montré dans la figure 3.4. Lee représentait la décharge couronne par un circuit contient deux éléments non linéaires (figure 3.7): une résistance qui représente les pertes

d'énergie et une capacité pour la représentation de la décharge couronne, ce modèle était utilisé pour la géométrie conducteur au dessus du sol pour décrire la propagation des surtensions sur les lignes aériennes.

La conductance couronne non linéaire introduite par Lee et B.C. Hydro, est déterminée par la loi quadratique des pertes couronnes proposée par Peek. [11, 129].

$$G_c = K_R(1 - V_c/V)^2 \quad (3.4)$$

$$K_G = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} 10^{-11} \quad (3.5)$$

$V_c$  : est la tension de seuil pour l'apparition de l'effet couronne, en [kV].

$\sigma_G$  : est la constante des pertes couronne.

$K_G$  : est un coefficient de pertes couronnes, en [S/m].

$r$  : est le rayon du conducteur, en [cm].

$h$  : est la hauteur du conducteur, en [cm].

La capacité couronne  $C_c$  est déterminée par l'expression suivante :

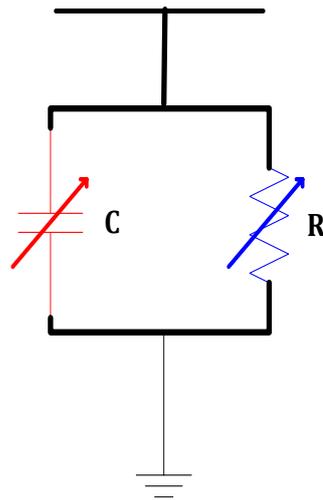
$$C_c = 2K_c(1 - V_c/V) \quad (3.6)$$

Avec

$$K_C = \sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} 10^{-11} \quad (3.7)$$

$\sigma_C$  : est la constante des pertes couronnes.

$K_C$  : est un coefficient de pertes couronnes, en [F/m].



**Figure 3.7** Modèle proposé par Lee.

Pour le même modèle Garry et All en 1990 [131], définit la capacité couronne comme suit:

$$C_c = C_0 \eta (V_c/V)^{\eta-1} \quad (3.8)$$

$C_0$ : est la capacité géométrique de la ligne.

$V_c$ : est la tension de seuil pour l'apparition de l'effet couronne.

$\eta$ : est un coefficient, qui est pour un seul conducteur, donné par la formule expérimentale suivante :

$$\eta = 0,22r + 1,2 \quad (3.9)$$

La non-linéarité de  $G_c$  et  $C_c$  avait constitué une source de complexité rencontrée dans les calculs numériques.

Cependant Carneiro et J.R. Marti en 1991 [132] concluent que la résistance shunt, dans le Modèle de Lee n'affecte pas la réponse du modèle, et les résultats obtenus avec le modèle proposé ne sont pas totalement satisfaisant dans la représentation de la branche descendante de la boucle Q-V.

Ces modèles sont capables de représenter les phénomènes physiques avec beaucoup de détails mais ne permettent pas de représenter facilement les aspects macroscopiques de l'effet couronne et, par conséquent, ne sont pas bien adaptés aux simulations de surtension lors de l'analyse de l'énergie électrique. Un autre inconvénient principal des modèles de circuits conventionnels de l'effet couronne, est leur limitation dans leur capacité à représenter le phénomène pour une large gamme de formes d'ondes.

Un inconvénient majeur des descriptions mathématiques du phénomène par rapport à une représentation de circuit équivalent, pour une utilisation dans un programme de simulation transitoire telle que l'EMTP est que l'approche de fonction non linéaire nécessite des itérations à chaque étape de la solution temporelle. Dans le cas de l'effet couronne, où la ligne de transmission doit être divisée en un grand nombre de sections avec le modèle couronne localisée à chacune d'elles, l'exigence d'itération sur chaque branche couronne serait très coûteuse en termes de temps de simulation. D'autre part, les modèles de circuit avec des éléments linéaires ou linéaires par partie ne nécessitent pas d'itérations.

Pour ces raisons principales, des chercheurs ont extrait d'autres modèles basés sur les aspects macroscopiques de décharge couronne [96-97, 106, 133].

#### ❖ **Modèles de coques de charges**

Afin de dériver un modèle pour les processus physiques compliqués de l'effet couronne, quelques auteurs [78, 85, 87, 106, 114] ont proposé le modèle de phénomène "coques de charges", basé sur des hypothèses simplificatrices, parmi lesquelles:

- ❖ Le mécanisme de génération et de diffusion de la charge est supposé contrôlé, en première approximation, par le champ électrique.
- ❖ Les expressions de déplacement de charge sous l'influence du champ électrique peuvent être dérivées, sur la base d'une description de particule des processus physiques.

Dans ces modèles, la décharge couronne autour d'un conducteur cylindrique placé au dessus du sol est supposé sous forme d'une gaine d'air ionisée appelée nuage couronne.

Richard et al [4, 12, 99], présentent un modèle basé sur la simulation de la courbe charge-tension par la technique de linéarisation de ses différentes parties. Il dépend du type et de la polarité de l'onde de tension appliquée, où :

- La courbe de charge-tension est représentée sous forme d'un cycle d'hystérésis.
- L'effet couronne est produit quand la tension dépasse la valeur de seuil qui peut être calculée par l'une des formules empiriques disponible dans la littérature.
- Quand la tension atteint sa valeur de crête la charge continue à augmenter et atteint sa valeur maximale.
- La charge d'espace émise lors de la décharge couronne dépend de la forme d'onde de tension appliquée et de son amplitude.
- Quand la tension chute à zéro dans la partie de la queue de l'onde, la charge autour du conducteur décroît d'une manière quasi-linéaire.
- La dissipation de l'énergie pendant l'activité couronne est représentée par la surface du cycle Q-V.

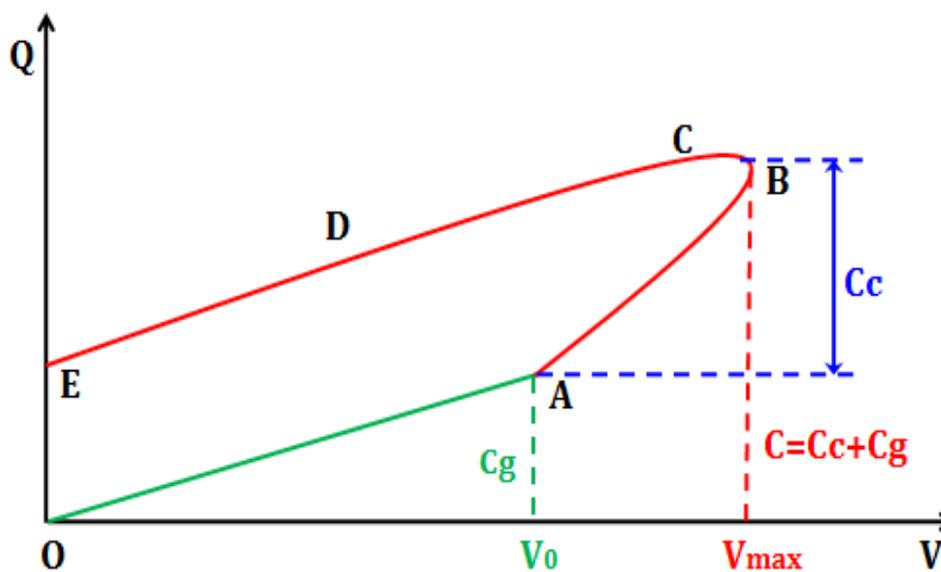
La méthode adoptée dans la présente modélisation est de représenter les cycles de charge-tension par des segments linéaires, sachant que chaque partie correspond à une phase particulière du développement du mécanisme couronne transitoire (figure 3.7) [4].

- Le segment « OA » où  $V < V_0$ : l'effet couronne est absent et la pente donne la capacité géométrique  $C_g$  de la ligne.
- Dans la partie « ABC », les processus d'ionisation débutent, les parties « AB » et « BC » représentent les capacités dynamiques (couronne).

- Le coté « CD » représente la décroissance de tension à la queue d'onde, ces pentes représentent des capacités supérieures à la capacité  $C_g$ .

Les auteurs dans la référence [134, 107] se sont basés sur ces caractéristiques et étant développés un modèle statique de coques de charges, implanté dans le logiciel de simulation ATP/EMTP, par l'utilisation du langage MODELS, puis l'introduction de ce modèle dans des différentes lignes de transmission, pour but d'analyser la propagation des ondes de surtension le long de la ligne de transmission aérienne, où ils ont trouvés des bon résultats qui sont en accord avec les résultats d'expériences.

Le modèle de l'effet couronne qui sera présenté dans ce travail est basé sur les hypothèses précédentes plus le macro-comportement de l'effet couronne observable dans les courbes des caractéristiques Q-V.



**Figure 3.8** Représentation schématique d'un cycle Q-V.

### 3.5. Conclusion

Une synthèse très importante sur les différents modèles de l'effet couronne existant dans la littérature, a été faite dans ce chapitre. Qui ont le but de simplifier la représentation du phénomène couronne.

La plupart des modèles analogiques sont limités dans leurs modélisation, sachant que, jusqu'à présent la décharge couronne n'a pu être décrite par des lois mathématiques précises. D'après cette synthèse on conclut que :

- Ces modèles sont limités d'utiliser des configurations particulières.
- Ils sont limités à utiliser aux ondes de chocs standards.
- Leurs paramètres peuvent être déterminés par l'ajustement aux résultats expérimentaux disponibles dans la littérature.
- Ces modèles ne prennent pas en considération l'influence des conditions atmosphériques ainsi l'état de conducteur.
- La plus part de ces modèles sont basés sur les caractéristiques des courbes charge-tension (Q-V) de l'effet couronne.

D'après ces conclusions, on constate que pour trouver un modèle complet et réaliste il faut prendre en considération les propriétés physiques : de la décharge couronne, la géométrie de la ligne, les conditions atmosphériques, et la forme d'onde de surtension appliquée au conducteur. Ces derniers peuvent être introduits par l'un des modèles analytiques, où on constate d'après cette synthèse que le meilleur modèle utilisé pour représenter la décharge couronne, est le modèle décrit par l'approche des coques de charges, qui peut prédire le niveau de la tension en tout point de la ligne.

Ce travail se concentrera sur la modélisation de l'effet couronne par l'un des modèles analytique de coques de charges, cités précédemment, dans le logiciel de simulation des phénomènes transitoires ATP/EMTP avec l'utilisation de MODELS.

# Chapitre 04

## MODELISATION DYNAMIQUE

---

### 4.1. Introduction

Comme il a été montré dans le chapitre précédent, des différences trouvées dans les modèles de l'effet couronne, où ils présentent des limitations et des complexités considérables, d'une part, et leurs nature non prédictive d'une autre part. Ces inconvénients nous encourageant de développer un modèle du phénomène de la décharge couronne d'une manière physique qui nous rapproche mieux à la réalité du phénomène.

Après cette étude approfondie sur les différents modèles couronne existant dans la littérature, on a adopté deux modèles de base de type coques de charges pour simuler le phénomène couronne. Le premier est un modèle statique et le second est un modèle dynamique.

Les deux modèles sont implantés dans le programme ATP/EMTP. En profitant des fonctionnalités du langage MODELS associé à ce programme.

### 4.2. Aperçu sur le logiciel EMTP

ATP/EMTP est un acronyme de 'Alternative Transients Program' / 'ElectroMagnetic Transients Program'. C'est un logiciel utilisé par les ingénieurs en systèmes d'énergie pour analyser les régimes transitoires.

ATP / EMTP est considéré comme le programme le plus largement utilisé pour la simulation numérique des phénomènes transitoires de nature électromagnétique, et électromécanique dans les systèmes d'alimentation électrique. Il a été continuellement développé grâce à des contributions internationales.

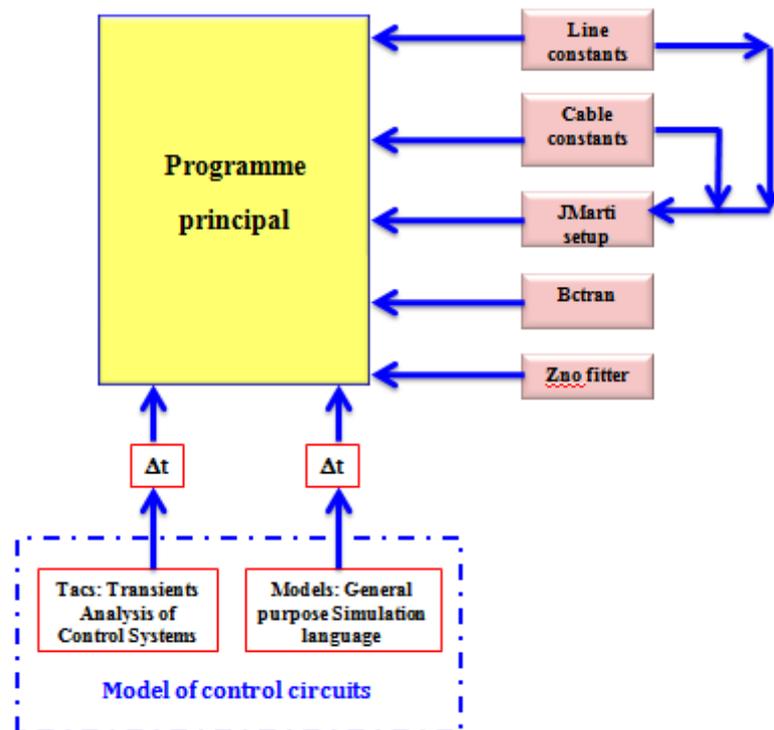
EMTP a vu le jour dans la thèse d'habilitation (postdoctorale) du Dr. Hermann Dommel en Allemagne au milieu des années 1960 et a été améliorée grâce à la collaboration de nombreux professionnels de génie électrique - un effort mené par le Dr Dommel et le Dr. Scott Meyer [135].

Comme dans tous les logiciels de simulation qui se basent sur les méthodes numériques pour résoudre les équations différentielles (ED), EMTP utilise la règle d'intégration trapézoïdale pour les résoudre dans le domaine temporel.

L'ATP / EMTP a de nombreux modèles, tels que: les machines tournantes, les transformateurs, les parafoudres, les lignes de transmission et les câbles. Avec ce programme numérique, des réseaux complexes de structure arbitraire peuvent être simulés (figure 4.1). L'analyse des systèmes de contrôle, des dispositifs de l'électronique de puissance et des composants avec des caractéristiques non linéaires telles que les arcs et la décharge couronne est également possible.

Les perturbations symétriques ou asymétriques sont autorisées, telles que les défauts, les surtensions dues à la foudre ou tout type d'opérations de manœuvre. Le calcul de la réponse en fréquence des réseaux est également supporté.

Sachant que MODELS est un langage général de description supporté par un solveur de simulation, c'est un langage de programmation pour la simulation dans le domaine temporel, et il est considéré comme un outil pour décrire le comportement dynamique d'un système physique complexe [135]. L'ATP peut aussi être utilisé pour décrire le fonctionnement des dispositifs de contrôle, pour générer des signaux ou encore pour analyser des mesures. Enfin, il peut être utilisé comme une interface avec des programmes extérieurs.



**Figure 4.1** Structure de l'ATP/EMTP.

#### 4.3. Mise en équations des modèles couronne dans l'EMTP

L'ATP/EMTP est largement utilisé dans la simulation des systèmes d'alimentation transitoire. Le modèle couronne à implanter se compose de deux sections: la section MODELS et sa section réseau (ATP-Draw). Les équations algébriques, différentielles et booléennes peuvent être introduites et résolues dans la section MODELS, et dans la partie ATP-Draw, où les éléments de circuit supplémentaires peuvent être utilisés.

Dans la référence [97], nous avons publié les résultats trouvés par le modèle des coques de charges cité dans le chapitre précédent dans leur état statique. Le modèle a été implanté dans le programme EMTP, par l'utilisation de leur interface MODELS.

Les résultats étaient en bon accord avec ceux trouvés expérimentalement et menés par d'autres chercheurs [4, 94].

Dans la suite de ce chapitre nous allons rappeler le modèle statique de

l'effet couronne avec quelques résultats obtenus.

#### 4.4. Modèle statique de coques de charge : Mise en équations

En se basant sur les caractéristiques et les hypothèses citées dans le chapitre précédent des courbes Q-V, sachant que, lors du processus de l'effet couronne, la charge 'Q' liée au conducteur prend la valeur critique 'Q<sub>0</sub>', lorsque la charge instantanée 'Q' dépasse cette valeur critique, une nouvelle couche de charge émerge du conducteur sous l'influence du champ électrique local [13].

La procédure de calcul basée sur ces équations du modèle incorporées dans le programme ATP / EMTP est décrite dans l'organigramme représenté dans la figure 4.2.

Le présent modèle est utilisé pour prédire les variations des caractéristiques de la décharge couronne c.à.d. les courbes Q-V qui dépendent de la configuration de la ligne: configuration coaxiale ou conducteur au-dessus du sol, et de la tension appliquée (amplitude et forme d'onde).

Dans la figure 4.3, les charges d'espace sont émises comme une succession de couches infinitésimales de charge à des instants discrets, de sorte que le champ électrique à la surface du conducteur couronne est limité à la valeur minimale du champ critique  $E_0$  évaluée par la formule empirique de Waters (2.4). La charge d'espace est nulle si le champ superficiel est inférieur à la valeur critique. La forme de la coque de charge est approximée à tout instant à celle de l'équipotentielle, qui est resté invariante durant l'effet couronne.

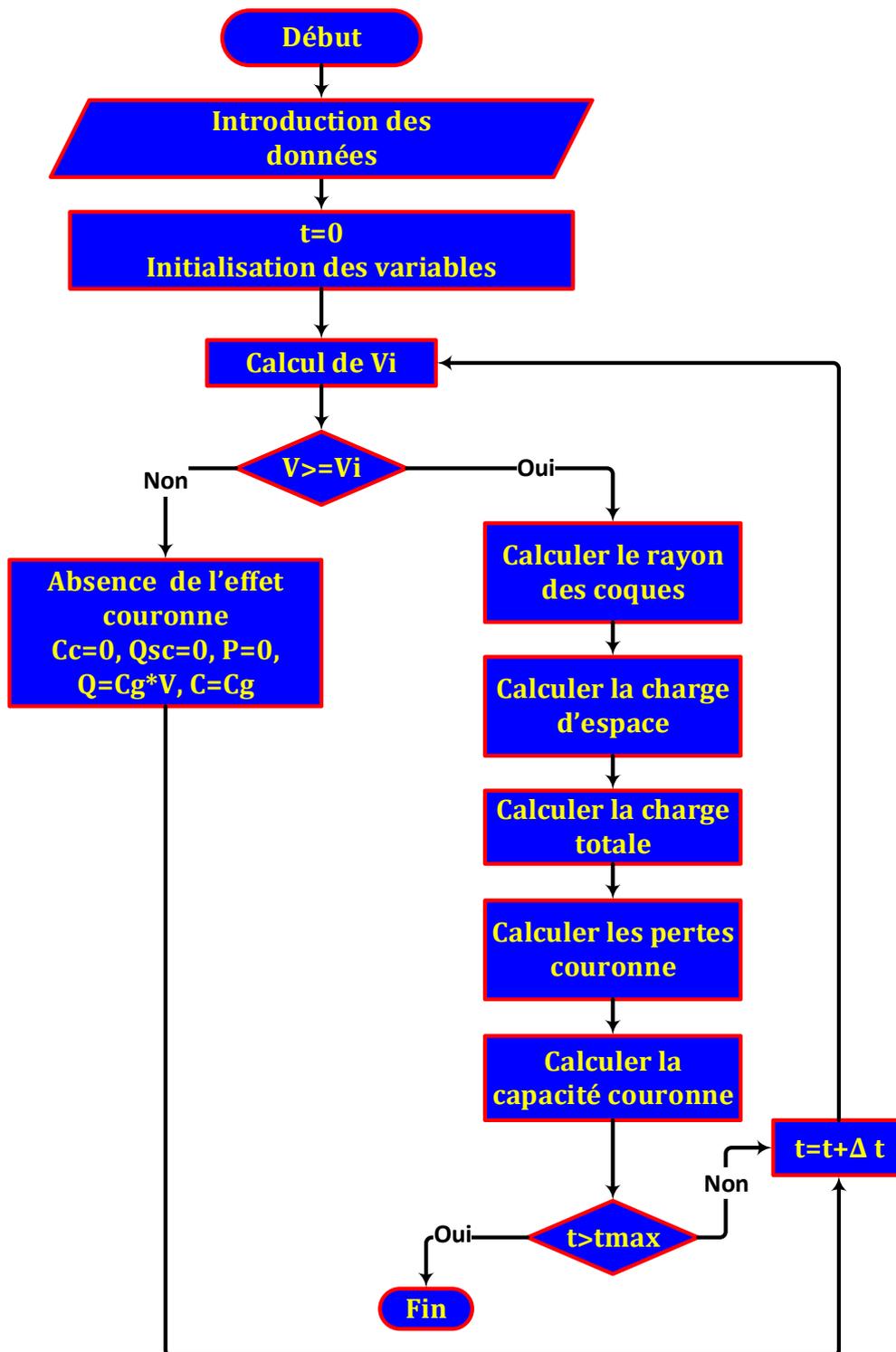


Figure 4.2 Organigramme de calcul du modèle Couronne statique.

La première configuration adoptée dans cette étude est un système de cylindre coaxial (figure 4.3) avec les paramètres suivants:

$r_0$  : est le rayon intérieur.

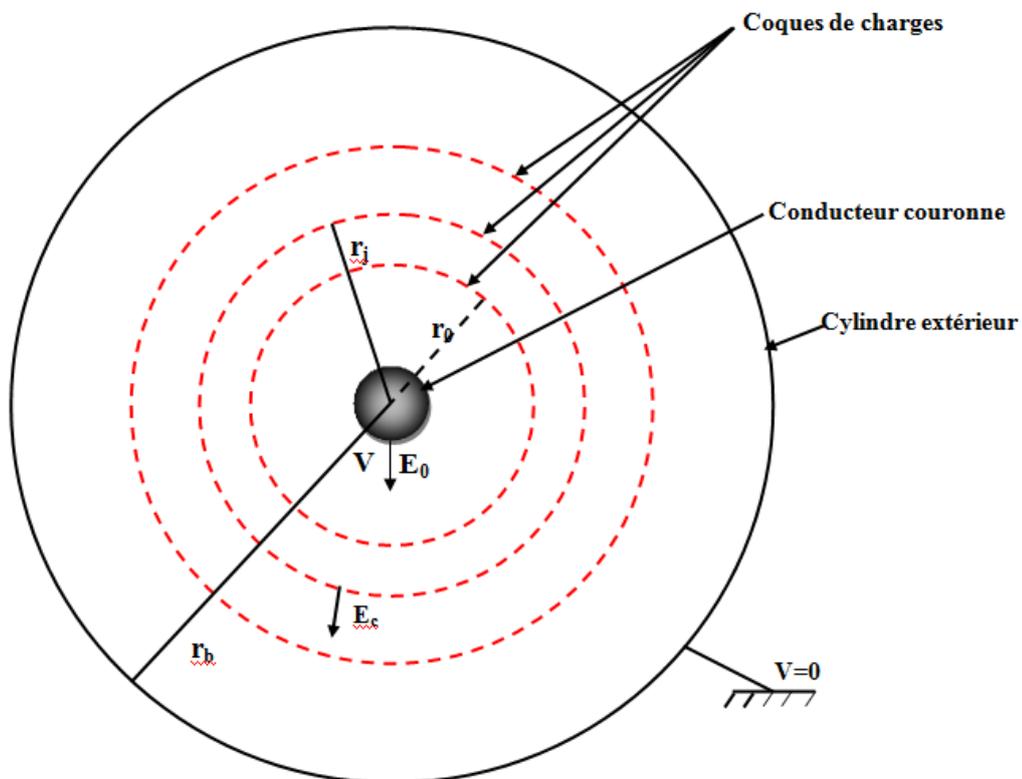
$r_b$  : est le rayon du cylindre extérieur.

La décharge couronne peut apparaître lorsque la charge électrique autour le conducteur est supérieure à la charge géométrique du conducteur. Cette dernière est donnée par l'expression suivante:

$$q_0 = C_g V_0 \quad (4.1)$$

Où  $C_g$  est la capacité géométrique du conducteur calculée par la formule suivante:

$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left[\frac{r_b}{r_0}\right]} \quad (4.2)$$



**Figure 4.3** Configuration coaxiale.

La tension d'apparition de l'effet couronne  $V_0$  (en kV) est calculée par l'expression suivante:

$$V_0 = 31 \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{r_0}} \right) r_0 \ln \left( \frac{r_b}{r_0} \right) \quad (4.3)$$

Lorsque cette valeur est atteinte, une nouvelle quantité de charge d'espace 'q<sub>sc</sub>' est créée autour du conducteur, et la charge totale augmente avec l'augmentation de la tension de  $V_0$  à  $V$  et elle est donnée par [4, 87] :

$$Q = C_g V + q_{sc} \quad (4.4)$$

Les courbes Q-V couronne sont obtenues par la résolution des deux équations suivantes [4, 87] :

$$Q = 2\pi\epsilon_0 r_c E_c \quad (4.5)$$

$$V = E_0 r_0 \ln \left[ \frac{r_c}{r_0} \right] + E_c r_c \ln \left[ \frac{r_b}{r_c} \right] \quad (4.6)$$

Où  $r_c$  est le rayon de la coque couronne (en cm), c.à.d. c'est la position de la nouvelle charge créée. Il est varié dans l'intervalle de :  $r_0 < r_c < r_b$ .

$E_c$  est le champ critique des streamers, sachant que  $E_0$  est le champ électrique critique de l'apparition de l'effet couronne calculé par la formule empirique de Waters (2.13).

Dans le modèle statique et pour la géométrie coaxiale, la capacité couronne est calculée comme suit: [119, 94,107].

$$C_c = C_g \frac{\ln(r_c/r_0)}{\ln(r_b/r_c)} \quad (4.7)$$

Les équations citées au dessus sont implantées dans le logiciel de simulation EMTP.

Dans le but de comparer les résultats de ce modèle avec ceux adoptés par d'autres auteurs, on a utilisé pour le système coaxial les données citées dans le tableau 4.1 avec une amplitude de tension de 250 kV et une impulsion de

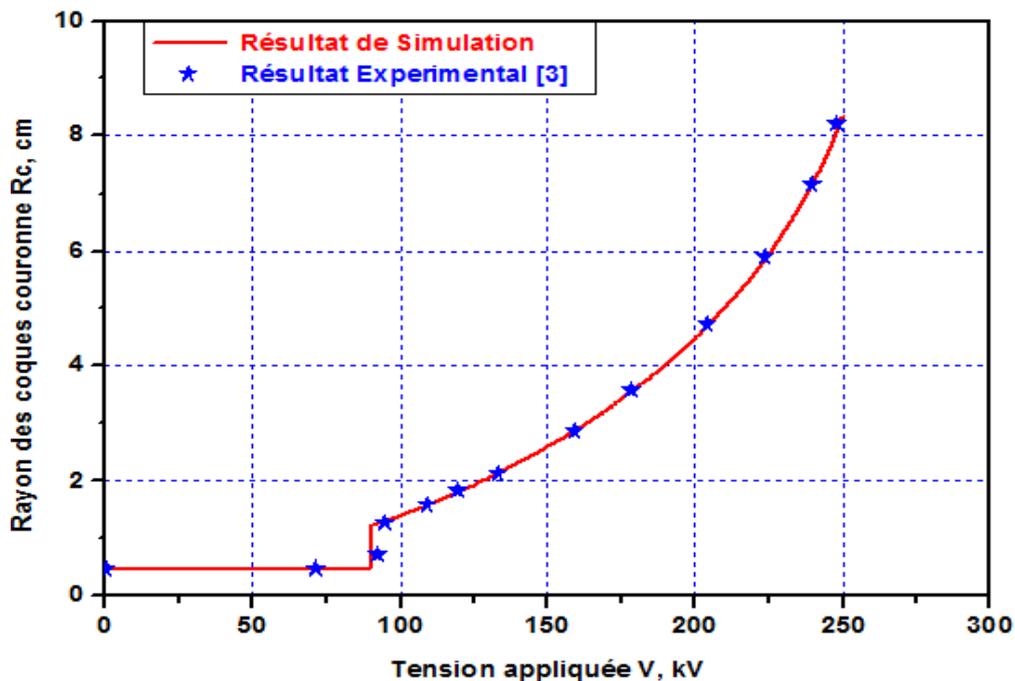
120/2200  $\mu\text{s}$  due au manœuvre.

Les figures 4.4 et 4.5 montrent respectivement les variations des positions des coques de charge due à l'effet couronne  $r_c$  et de la charge totale  $Q$ . On observe un bon accord entre les résultats simulés et ceux obtenus expérimentalement [4, 12, 94].

**Tableau 4.1** Données de la configuration coaxiale

**Données de la configuration coaxiale**

Rayon intérieur: $r_0$	0,475cm
Rayon extérieur : $r_b$	29,05 cm
Tension appliquée : $V$	250kV
L'impulsion de tension	120/2200 $\mu\text{s}$



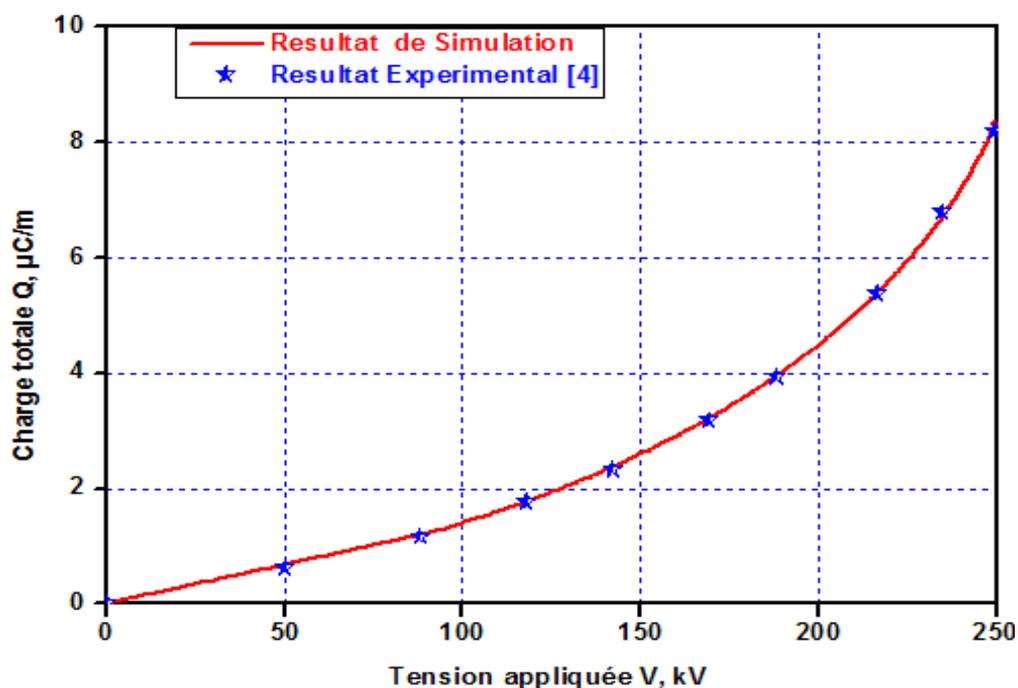
**Figure 4.4** Position de coque de charge couronne autour du conducteur.

Dans la figure 4.5, lorsque la tension appliquée est inférieure au seuil d'apparition couronne, aucune charge d'espace n'est générée autour de la surface du conducteur et la charge totale est égale à la charge géométrique du conducteur

calculée par l'équation (4.1). La tangente de la courbe Q-V est égale à la capacité géométrique  $C_g$ .

Pour la tension appliquée supérieure au seuil critique et inférieure à la valeur de crête, la décharge couronne augmente et la charge d'espace générée augmente d'une manière non linéaire avec une pente égale à la capacité couronne qui est supérieure à  $C_g$ .

Pour la partie descendante dans le cycle Q-V, la charge totale diminue avec la tension (la queue d'onde) et la pente de cette courbe Q-V est proche de la capacité naturelle  $C_g$ . Les tangentes de ces trois sections produisent la variation de la capacité comme le montre la figure 4.6, où en peut voir que la courbe est déviée de la capacité naturelle et augmente rapidement.



**Figure 4.5** Caractéristiques charge-tension calculée et mesurée de [4].

La deuxième configuration adoptée dans cette étude est la configuration: conducteur au dessus du sol plan montrée dans la figure 4.7.

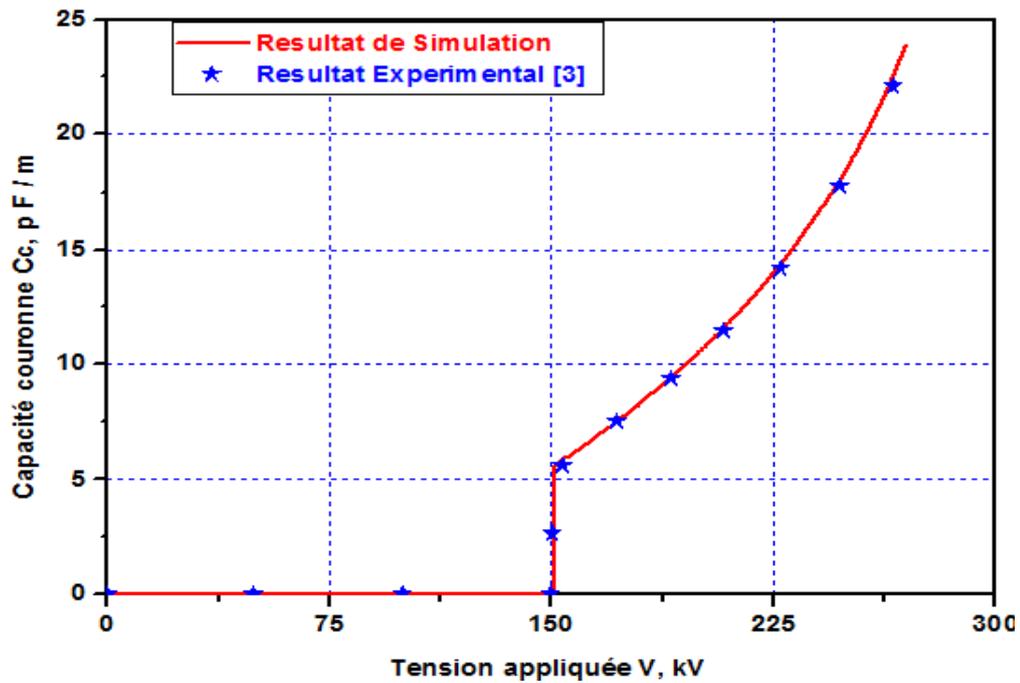


Figure 4.6 Variation non linéaire de la capacité couronne.

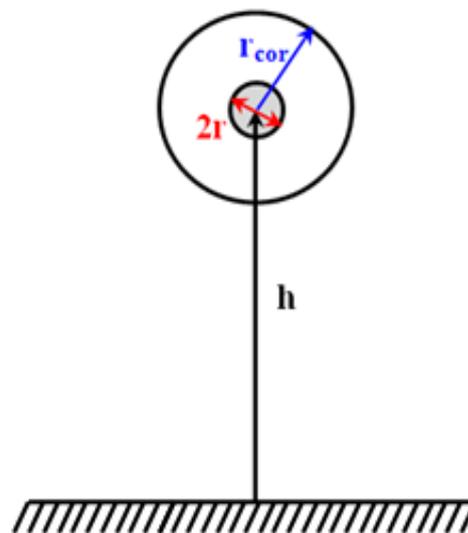


Figure 4.7 Configuration conducteur au dessus du sol.

Pour un conducteur ayant un rayon  $r_0$  et une hauteur moyenne  $h$  au-dessus du sol, les caractéristiques de l'effet couronne sont calculées par [136, 99] :

$$Q = 2\pi\epsilon_0 r_c E_c \left[ \frac{2h - r_c}{2h} \right] \quad (4.11)$$

$$V = E_0 r_0 \ln \left[ \frac{r_c (2h - r_0)}{r_0 (2h - r_c)} \right] + \frac{E_c r_c (2h - r_c)}{2h} \ln \left[ \frac{2h - r_c}{r_c} \right] \quad (4.12)$$

La résolution des deux équations ci-dessus donne les courbes Q-V de la décharge couronne.

La capacité due à la charge d'espace produite par l'effet couronne devient égale à:

$$C_c = C_g \frac{\ln \left[ \frac{(2h-r_0)r_c}{(2h-r_c)r_0} \right]}{\ln \left[ \frac{2h-r_c}{r_c} \right]} \quad (4.13)$$

Le calcul de la variation de la capacité couronne de la ligne peut être obtenu à partir de la pente des courbes Q-V. Des exemples numériques sont donnés dans les figures 4.8 et 4.9 pour un conducteur de 1,32 cm de rayon situé à une hauteur de 7,5 m.

Le premier cycle est trouvé par une impulsion d'onde de 1,2/50  $\mu\text{s}$  avec une valeur de crête de 1300 kV.

Par contre, le deuxième cycle est obtenu par l'utilisation d'une impulsion de tension de 10/75  $\mu\text{s}$ , avec une crête de 1230 kV.

Un accord assez précis des courbes Q-V calculées avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature a été trouvé [83].

Ce modèle, a un certain mérite, dans le calcul des caractéristiques couronne sous des impulsions de manœuvre. Cependant il ne donne pas des résultats différents pour le cas des impulsions d'onde de foudre. Comme il est montré dans la figure 4.10.

Où on peut facilement remarquer que le modèle ne fait pas de distinction entre une forme d'onde lente (1200/2200  $\mu\text{s}$ ) et une forme d'onde rapide (1,2/50  $\mu\text{s}$ ) [107].

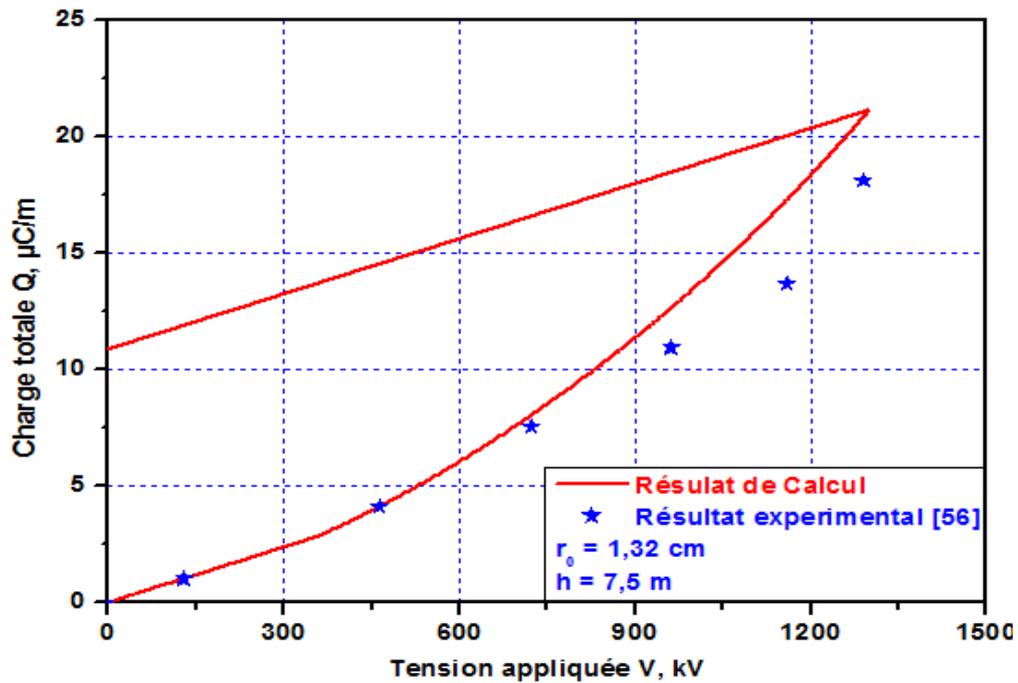


Figure 4.8 Les courbes Q-V pour une onde de 1300 kV, 1,2/50  $\mu$ s.

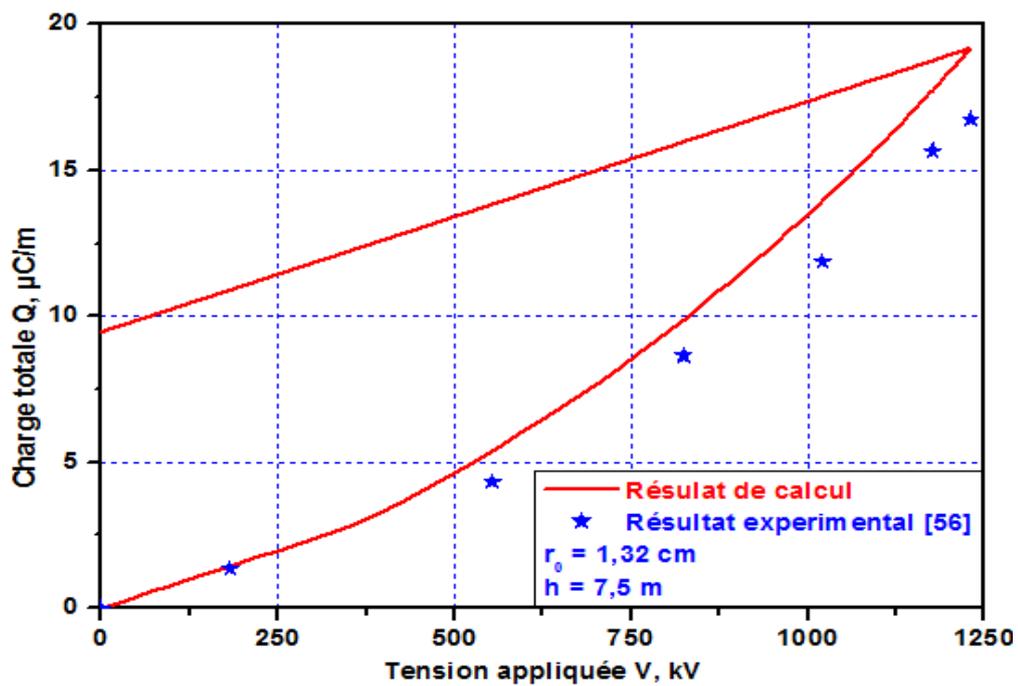


Figure 4.9 Les courbes Q-V pour une onde de 1230 kV, 10/75  $\mu$ s.

Ce modèle est étendu pour les calculs en cas des surtensions standards et multiple, et limité pour le calcul en cas des surtensions oscillatoires, donc élimine l'effet de la fréquence. Pour résoudre ces problèmes et pour la prédiction des caractéristiques couronne, sous des surtensions de différentes formes d'ondes exponentielles, impulsions multiples et oscillatoire.

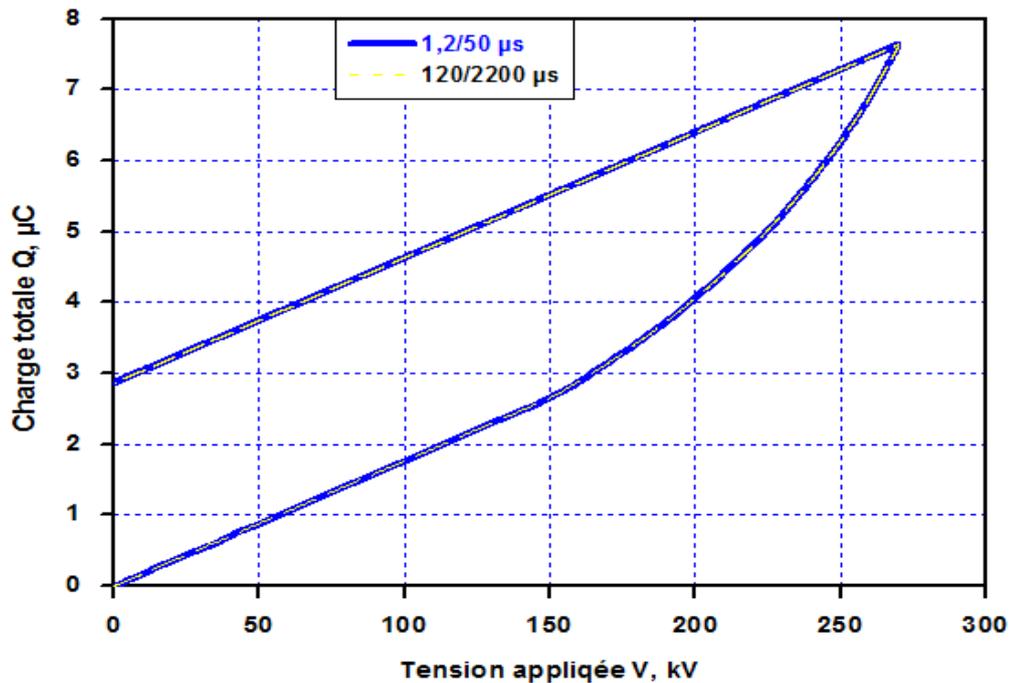


Figure 4.10 Influence du front d'onde sur la réponse du modèle.

#### 4.5. Modèle dynamique de coques de charge

Quelques modèles physiques de la décharge couronne avec la considération d'une configuration coaxiale, sont adoptés par [93-94, 96, 108, 118, 133, 137-138].

Dans le modèle dynamique, on suppose qu'à chaque pas de temps  $\Delta t$ , les conducteurs envoient une couche de charges cylindrique infinitésimale appelée coque de charges (figure 4.11), où à chaque pas de temps, cette coque s'éloigne du conducteur couronne sous l'influence du champ électrique local [139], et ce mouvement a été calculé itérativement par la méthode itérative de la dichotomie.

Le mouvement des coques est basé sur le calcul de leurs champs locaux sur la surface du conducteur [87].

Le modèle dynamique des coques de charge est basé sur les caractéristiques présentés dans le chapitre précédent, où l'avantage du modèle dynamique est qu'il peut être utilisé pour simuler les caractéristiques  $Q-V$  sous des impulsions exponentielles, impulsions multiples et oscillatoires à des fréquences industrielles et des fréquences plus élevées similaires à celle de la

foudre.

#### 4.5.1. Hypothèses adoptés pour ce modèle

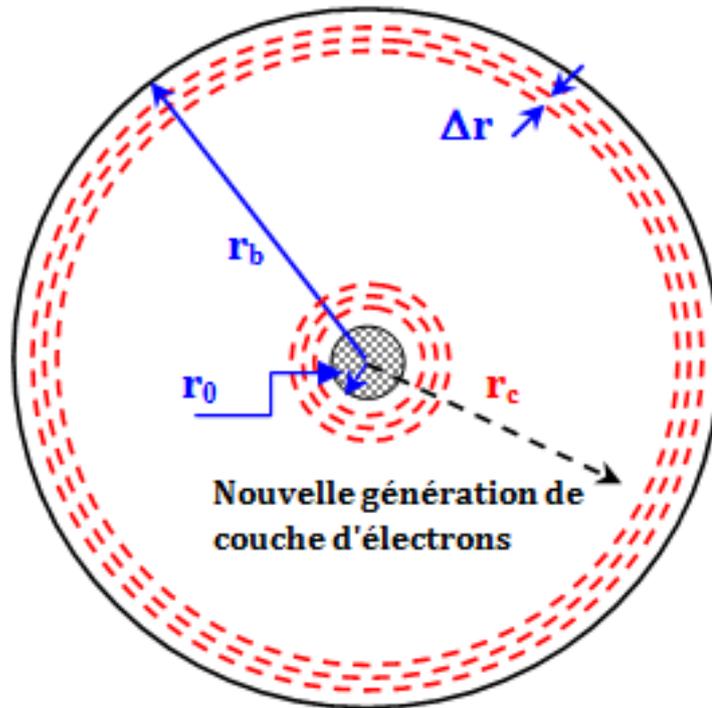
Le modèle dynamique implanté de l'effet couronne est basé sur des hypothèses adoptées dans la littérature par plusieurs chercheurs, où :

- L'impulsion couronne se présente sous forme des streamers autour du conducteur.
- Le champ électrique à la surface de du conducteur est limité à la valeur minimale du champ critique  $E_c$ , évaluée par une des formules empiriques de Peek, ou similaire.
- Le champ à sa limite extérieure prend une valeur de 5 kV/cm en polarité positive et 18 kV/cm en polarité négative.
- Les charges d'espaces sont émises comme une succession des coques (couches infinitésimales de charge).
- La grandeur et la position radiale initiale de chaque charge injectée sont déterminées par la limitation du champ à sa valeur critique.
- La forme de la coque est approximée à tout instant à celle de l'équipotentielle.

#### 4.5.2. Mise en équations du modèle dynamique

Le nouveau modèle calcule la capacité couronne à partir de la géométrie de la ligne et des caractéristiques couronne, évitant ainsi la nécessité de réaliser des tests d'impulsions à pleine échelle. Le modèle est applicable aux configurations pratiques pour lesquelles la distribution du champ électrique, qui régit l'initiation de la couronne, peut être trouvée par des méthodes numériques standard. Le modèle couronne, est réalisé à l'aide du langage MODELS du logiciel ATP-EMTP, qui est un outil approprié pour l'analyse des transitoires alternatives.

À chaque instant, la charge à la surface du conducteur est donnée par la somme de la charge géométrique ( $Q_g$ ), la charge induite à l'extérieur du conducteur ( $Q_i$ ) et la charge d'espace qui retourne à la surface du conducteur.



**Figure 4.11** Processus de décharge couronne.

La charge induite par les  $N$  coques se déplacent autour du conducteur est calculé par cette relation :

$$Q_i(t) = - \sum_{j=1}^N \bar{V}(r_j, t) Q_{sc}(j) \quad (4.14)$$

Où

$\bar{V}(r_j, t)$ : est le potentiel en p.u de la  $j^{\text{ème}}$  coques de rayon  $r_j$ .

$Q_{sc}(j)$  : est la charge d'espace portée par la  $j^{\text{ème}}$  coque.

Donc :

$$Q_{cond}(t) = Q_g(t) + Q_i(t) + Q_{ret}(t) \quad (4.15)$$

Quand la charge du conducteur dépasse la valeur critique (équation (4.1)), une nouvelle coque apparait sur la surface du conducteur et la charge d'espace émise par la  $j^{\text{ème}}$  coque émise est :

$$Q_{sc}(t) = Q_{cond}(t) - Q_0 \quad (4.16)$$

Et sa position initiale  $r_c$  est trouvée par les conditions aux limites du champ électrique et de la tension appliquée.

La formule empirique de Waters [4, 12, 13] est utilisée pour calculer le champ critique d'apparition de l'effet couronne, où :

$$E_c = 23,8 \left( 1 + \frac{0,67}{r_0^{0,4}} \right) \frac{kV}{cm} \quad (4.17)$$

La valeur de champ  $E_c$  dépend aussi des conditions atmosphériques, [11], comme montré par la relation empirique (4.18) :

$$E_c = 4,25\delta^{1,5} + \frac{(4 + 5\delta)H}{100} \quad (4.18)$$

Où  $\delta$  est la densité relative de l'air et  $H$  est l'humidité absolue en  $[g/m^3]$ .

L'intensité du champ électrique local  $E_j(t)$  de la  $j^{\text{ème}}$  coque, se calcule par :

$$E_j(t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r_j(t)} \left[ C_g V(t) + Q_i(t) + \frac{Q_{sc}(j)}{2} + \sum_{i=1}^j Q_{sc}(i) \right] \quad (4.19)$$

Et la position de la  $j^{\text{ème}}$  coque à l'instant  $(t+\Delta t)$  est déterminée par [12, 89] :

$$r_j(t + \Delta t) = r_j(t) + \mu E_j(t) \Delta t \quad (4.20)$$

La charge totale est donnée par :

$$Q(t) = C_g V(t) + Q_i(t) + Q_{sp}(t) \quad (4.21)$$

Et  $Q_{sp}(t)$  est la charge d'espace totale existante autour du conducteur à l'instant  $t$ .

La capacité dynamique est le rapport entre la charge d'espace à un instant  $\Delta t$  et la tension appliquée à cet instant :

$$C_{dyn} = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta V(t)} \quad (4.22)$$

Quand la charge mesurée atteint sa valeur maximale, la tension diminue jusqu'à zéro, et la capacité du conducteur devient égale à la capacité géométrique de la ligne  $C_g$ .

La procédure de calcul basée sur les équations du modèle est décrite dans l'organigramme présenté dans la figure 4.12.

Le modèle est implanté dans l'EMTP par le biais du langage MODELS.

#### 4.5.3. Résultats de Simulation

La solution est obtenue en résolvant simultanément les équations du modèle avec le reste du réseau en utilisant la méthode d'intégration trapézoïdale [135].

Pour valider le modèle proposé, les résultats sont comparés avec ceux disponibles dans la littérature en utilisant la géométrie coaxiale cylindrique où le conducteur interne est soumis à des impulsions de foudre exponentielles multiples et des impulsions oscillatoires unipolaires.

Pour cette géométrie, les courbes charge-tension sont calculées pour différents rayons de conducteurs et comparées à celles mesurées. Le modèle est, en outre, appliqué à une configuration du conducteur-plan pour laquelle l'effet de la hauteur du conducteur sur les courbes charge-tension calculées est examiné.

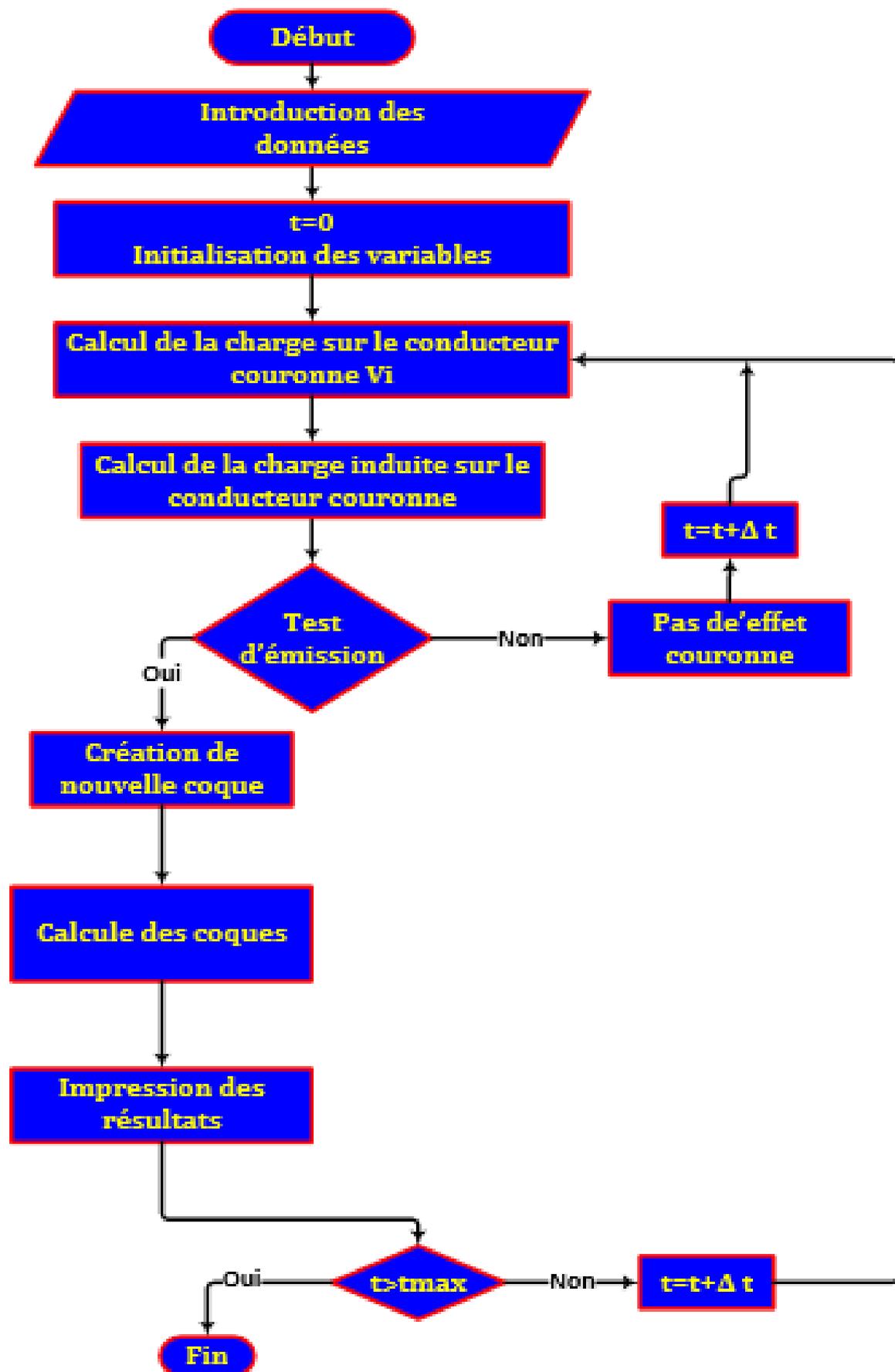


Figure 4.12 Organigramme de calcul du modèle dynamique de l'effet couronne.

### 4.5.3.1 Caractéristiques Q-V sous des impulsions de tension exponentielle

#### (i) Configuration conducteur Coaxial:

Pour la configuration coaxiale du conducteur, les rayons interne et externe sont 0,475 cm et 29,05 cm respectivement. Une impulsion de tension exponentielle de 2,5 / 60 $\mu$ s et une valeur crête égale à 250 kV est appliquée pour permettre une comparaison directe avec les expériences rapportées dans [4] pour une polarité positive.

La figure 4.13 montre un bon accord entre les résultats du modèle et les résultats mesurés. La tension d'apparition couronne prévue par le modèle est  $V_0 = 121,11$  kV, ce qui est comparée avec la valeur mesurée de  $V_0 = 119$  kV avec un écart qui est environ de 1,75%.

Pour une valeur de tension inférieure à la tension critique d'apparition de l'effet couronne  $V \leq V_0$ , la caractéristique Q-V est linéaire avec une pente constante représentant la capacité géométrique du conducteur. Pour des valeurs supérieures à la tension d'apparition de l'effet couronne  $V > V_0$ , la courbe Q-V varie d'une manière non-linéaire avec une pente variable représentant la capacité dynamique due au développement de décharge couronne autour du conducteur.

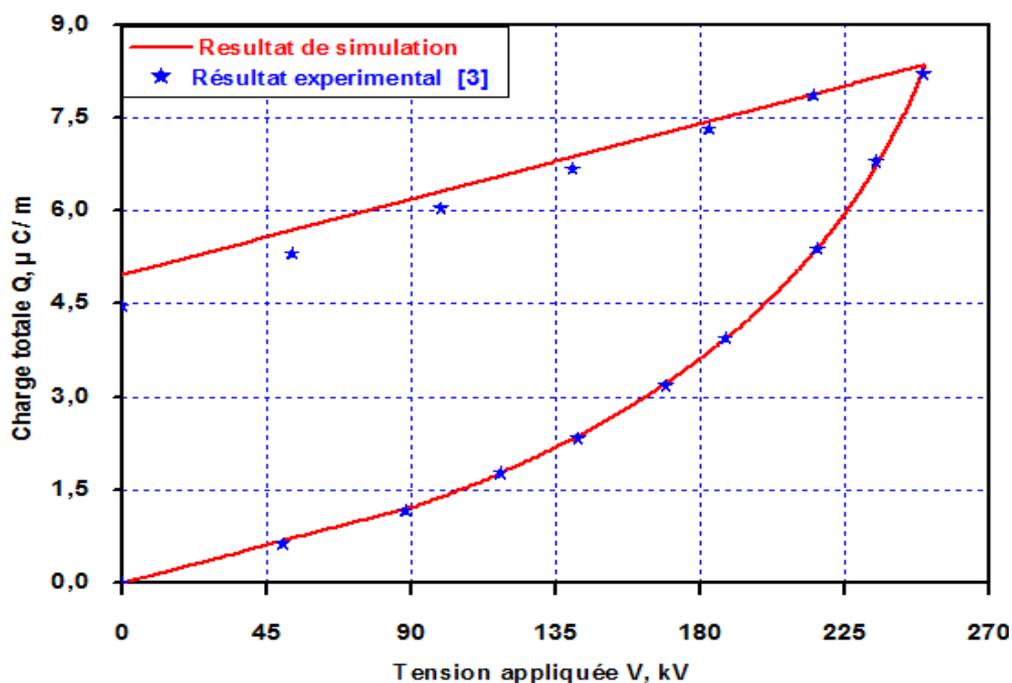


Figure 4.13 Courbes Q-V calculées et mesurées pour une géométrie coaxiale.

Le modèle peut être étendu pour une utilisation avec des faisceaux de conducteurs (figure 4.14). La figure 4.15 montre les résultats de la courbe charge-tension calculée pour un faisceau à deux conducteurs ayant un diamètre de conducteur de  $r_0 = 12,5$  mm et une séparation axiale entre les conducteurs élémentaires de  $D = 100$  mm, dans une configuration coaxiale avec un diamètre externe égale à  $d = 581$  mm. La tension appliquée est une tension d'impulsion de manœuvre de 300 kV, 120/2200  $\mu$ s. Comme on peut le voir sur la figure (4.15), il y a un accord général avec les mesures rapportées dans [24] en utilisant la même configuration. La tension d'apparition couronne calculée en utilisant le modèle est de 159,5 kV, ce qui est environ de 6% plus petit que la tension mesurée de 169 kV. L'écart entre la prédiction du modèle et la courbe mesurée peut être dû au fait que la tension d'appariation de l'effet couronne a été calculée sur la base de l'équation (4.18) et du champ pré-couronne calculé sur la surface du conducteur du faisceau, applicable aux conducteurs simples. Cependant, cela peut être considéré comme acceptable parce que le champ de création est essentiellement fonction du rayon de courbure du conducteur dans le faisceau. On notera également que les mesures indiquées dans [24] sont les moyennes de plusieurs applications de tension à un niveau de tension donné, et ne constituent donc pas une relation unique de tension de charge représentative à ce niveau de tension.

Dans le cas des conducteurs en faisceaux, on considère un conducteur équivalent, dont le rayon équivalent est donné par [139].

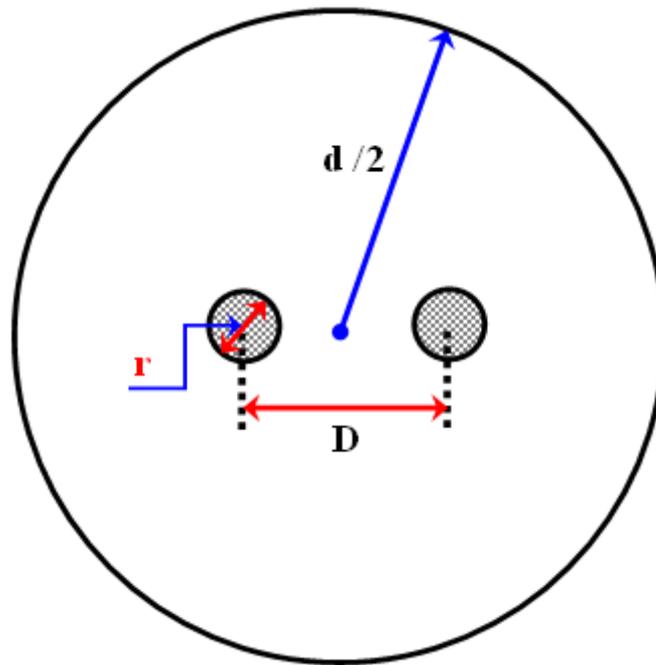
$$r_{eq} = \sqrt[n]{nr_0 R_f^{n-1}} \quad (4.23)$$

$n$ : est le nombre de conducteurs élémentaires.

$r_{eq}$  : est le rayon équivalent en [cm].

$r_0$ : est le rayon du conducteur élémentaire, en [cm].

$R_f$ : est le rayon moyen géométrique (GMR) du faisceau, en [cm].

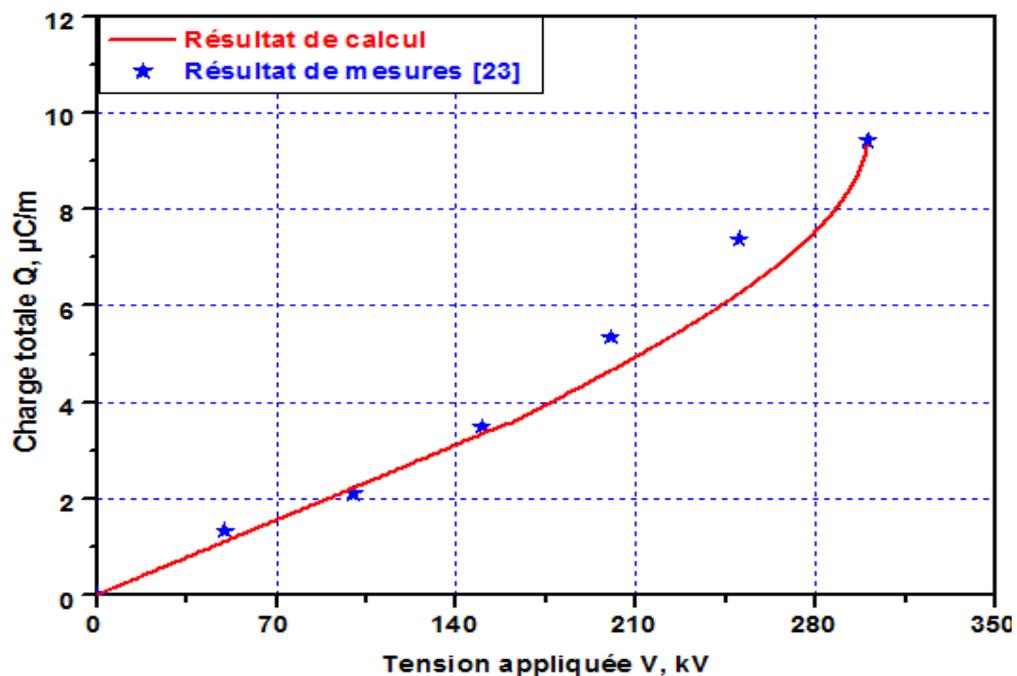


**Figure 4.14** Configuration faisceau de deux conducteurs.

Diamètre des sous-conducteurs  $r_0=25\text{mm}$ .

Diamètre extérieur du faisceau  $2D=581\text{mm}$ .

Distance de séparation axiale du faisceau  $d=100\text{mm}$ .

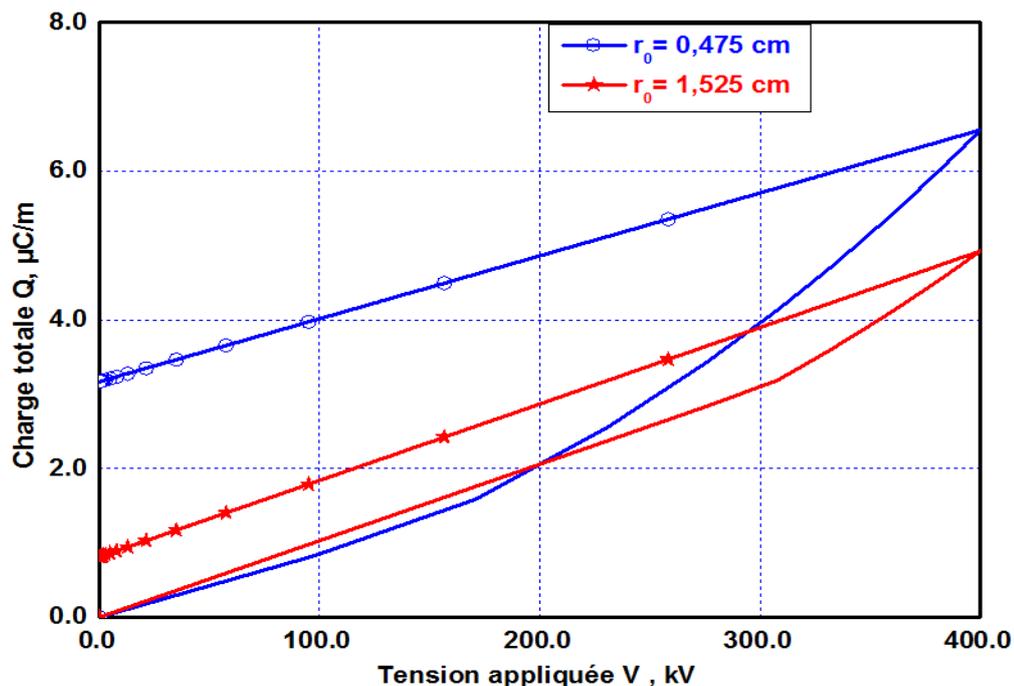


**Figure 4.15** Caractéristiques Q-V pour un faisceau à deux conducteurs.

La figure 4.16 montre les courbes Q-V obtenues avec deux conducteurs simples de diamètres différents, 0,475 cm et 1,525 cm pour la même tension

appliquée d'amplitude 400 kV et dont a la forme est 2,5/60  $\mu$ s. Comme décrit dans cette figure, l'augmentation de la taille du conducteur entraîne la génération d'une charge couronne plus faible et, par conséquent, une perte par effet couronne plus faible, qui est due à l'augmentation de sa tension critique.

Les résultats d'une Comparaison entre les résultats du modèle et les données expérimentales et théoriques publiées dans [69], pour une couronne positive dans la configuration coaxiale avec un diamètre du conducteur  $r_0 = 1,525$  cm, sont présentés dans le Tableau 4.2. Le modèle est en acceptable accord avec les résultats expérimentaux. Les valeurs calculées à partir du modèle développé dans [99] sont également incluses pour comparaison.



**Figure 4.16** Effet du rayon de conducteur.

La variation de la capacité couronne due au développement de la décharge couronne autour d'un conducteur de 1,525 cm de diamètre placée sur un cylindre de 29,05 cm est illustrée dans la figure 4.17 avec sa position a la surface de ce conducteur.

**Tableau 4.2** Comparaison des résultats avec les mesures et les données publiées.

Type d'impulsion	Tension appliquée (kV)	La charge totale apparente ( $\mu\text{C}/\text{m}$ )		
		Calculés	Mesurés [61]	Calculés [96]
<b>2,5/60 <math>\mu\text{s}</math></b>	290	3,12	3,6	3,5
	340	4,07	4,6	4,5
	390	5,20	6,6	5,3
	440	6,55	8	6,3
<b>260/2700 <math>\mu\text{s}</math></b>	290	3,11	3,4	3,6
	340	4,07	4,7	4,6
	390	5,21	5,7	5,4
	440	6,56	6,5	6,2

**(ii) Configuration Conducteur au dessus du sol:**

Pour la configuration conducteur au dessus du sol, la figure 4.18 montre l'effet de la hauteur du conducteur sur les courbes Q-V, pour un rayon de conducteur de 0,475 cm à des hauteurs de 12 m et 20 m respectivement. La tension appliquée est une tension impulsionnelle avec une amplitude de 400 kV.

L'augmentation de la hauteur du conducteur entraîne une réduction de la capacité de la ligne à la terre, ce qui entraîne une réduction de la charge couronne. Une augmentation de la hauteur du conducteur provoque également une variation relativement faible de la tension d'apparition de l'effet couronne.

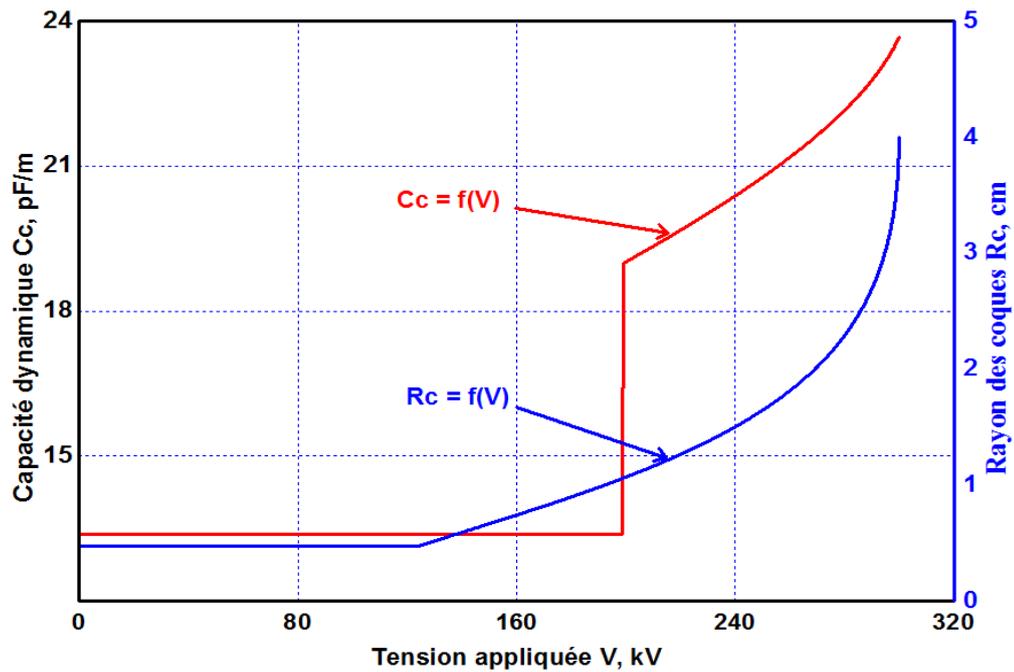


Figure 4.17 Variation de la capacité couronne et du rayon des coques de charges.

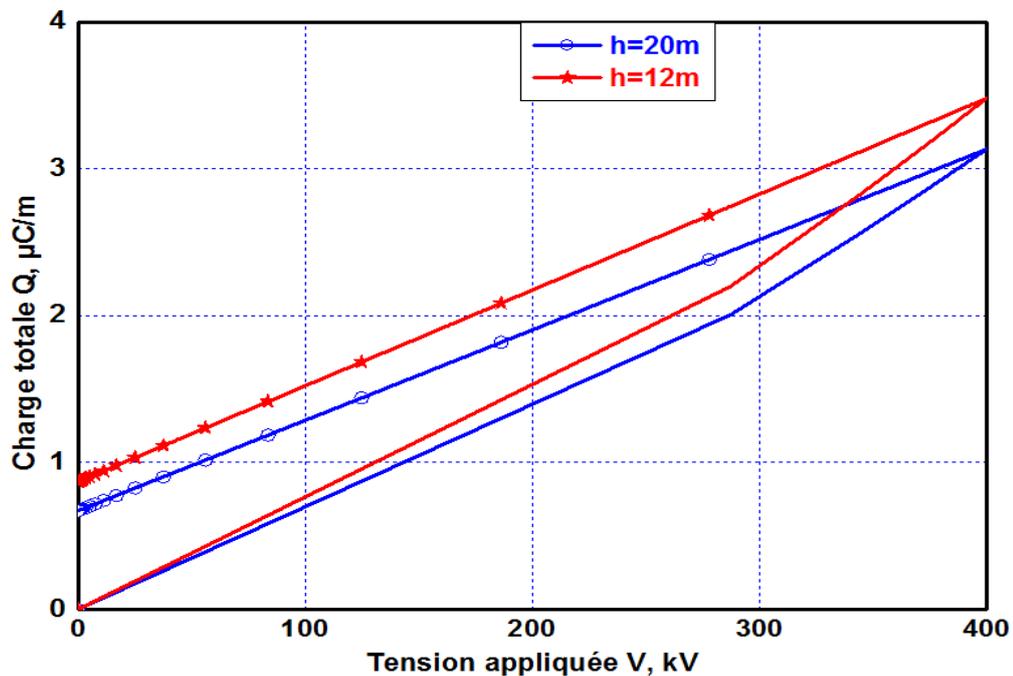


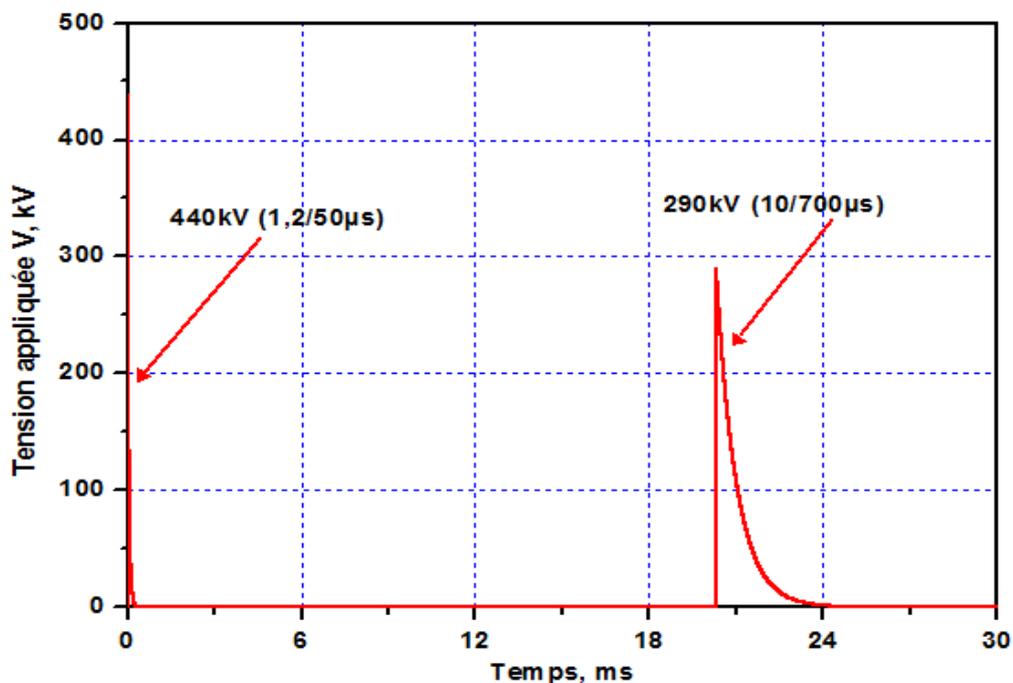
Figure 4.18 Effet de la hauteur du conducteur.

#### 4.5.3.2 Application au cas de surtensions à impulsions multiples

En pratique, les lignes de transmission peuvent être affectées par des coups de foudre multiples. Pour simuler ce cas, le conducteur a été excité par une tension d'impulsions exponentielles multiples. La première impulsion avait une

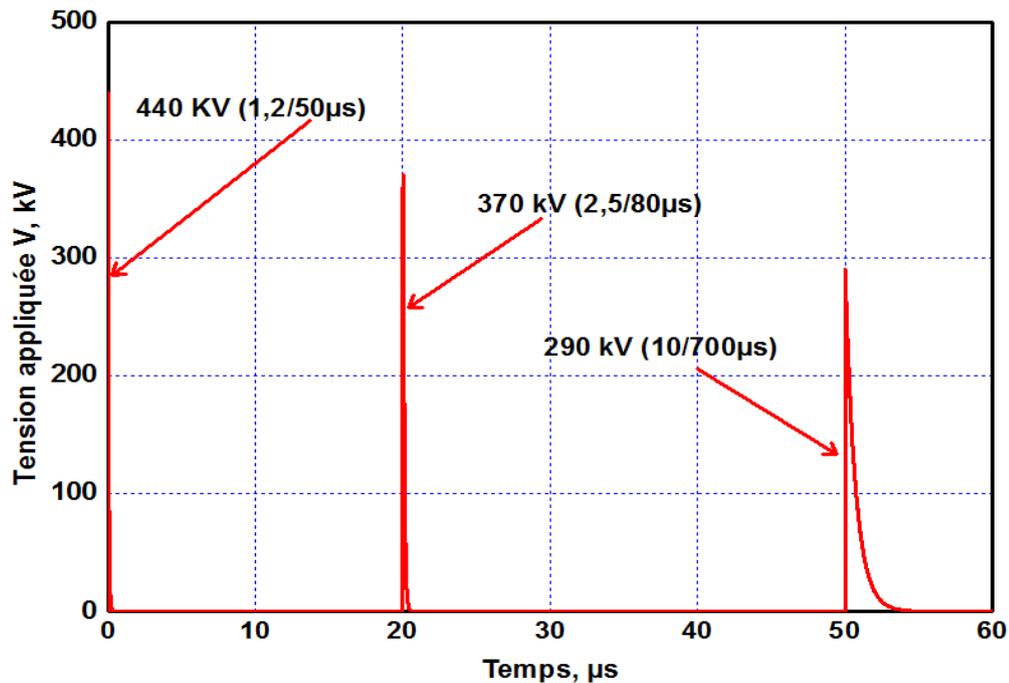
forme d'onde de  $1,2 / 50\mu\text{s}$  et une amplitude de  $440\text{kV}$  et la seconde impulsion avait une forme d'onde de  $10 / 700\mu\text{s}$  et une amplitude de  $290\text{kV}$  produite a  $20\text{ms}$  après la première onde. Ces impulsions sont illustrées dans la Figure 4.19. Cependant, la figure 4.20 montre une surtension avec trois impulsions successives :  $440\text{ kV}$  ( $1,2/50\mu\text{s}$ ),  $370\text{ kV}$  ( $2,5/80\mu\text{s}$ ) et  $290\text{ kV}$  ( $10/700\mu\text{s}$ ).

Quelques courbes typiques Q-V calculées sous des impulsions multiples sont représentées dans la figures 4.21 pour deux configurations coaxiales, la première ayant le rayon intérieur:  $r_0 = 0,475\text{ cm}$ , et rayon extérieur  $r_b = 29,05\text{ cm}$  la deuxième ayant le rayon intérieur:  $r_0 = 1,525\text{ cm}$  et rayon extérieur  $r_b = 29,05\text{ cm}$  cm.



**Figure 4.19** Impulsions de tensions multiples.

La courbe de charge-tension illustrée dans la figure 4.21, pour des impulsions multiples, montre que pour la première impulsion, l'effet couronne apparait et la charge atteint la valeur maximale de  $7,8\mu\text{C}$  autour du conducteur de  $0,475\text{ cm}$  de rayon, mais n'atteint que  $3,8\mu\text{C}$  pour la deuxième impulsion. Dans le cas d'un conducteur de  $1,525\text{ cm}$  de rayon, la charge maximale est de  $5,8\mu\text{C}$  après la première impulsion et de  $2,8\mu\text{C}$  après la seconde impulsion. Pour ce conducteur, l'effet couronne ne se produit pas pendant la seconde impulsion.



**Figure 4.20** Tension avec trois impulsions successives.

Dans le cas de configuration du conducteur au-dessus de sol, la figure 4.22 montre que l'effet couronne est apparait pendant la première et la seconde impulsion, et que la charge générée est d'autant plus faible quand le conducteur est plus haut. Ceci est important pour les lignes de transmission où l'atténuation par l'effet couronne ne peut pas être suffisante pour réduire la surtension de foudre à des niveaux sécuritaires. Dans de tels cas, l'utilisation des parafoudres est nécessaire. Pour les lignes de distribution avec des hauteurs de conducteurs plus faibles, l'atténuation par l'effet couronne devrait être relativement plus importante, et donc les parafoudres ne sont nécessaires qu'aux bornes des transformateur.

#### 4.5.3.3 Caractéristiques Q-V sous des impulsions oscillatoires

Pour analyser le comportement de la décharge couronne sous une surtension impulsionnelle complexe non standard, on considère une tension d'impulsion oscillatoire amortie. Cette tension est calculée dans un programme implanté dans l'EMTP. Elle est décrite par:

$$V = K_f V_{max} (1 - e^{-\alpha(t-t_0)} \cos(2\pi f(t - t_0))) \quad (4.24)$$

Où:

$K_f$ : Coefficient de correction.

$V_{max}$ : Valeur pic de tension, en [kV].

$t_0$ : L'instant initial de l'application de la surtension en [ $\mu$ s].

$t$ : La longueur d'onde, en [ $\mu$ s].

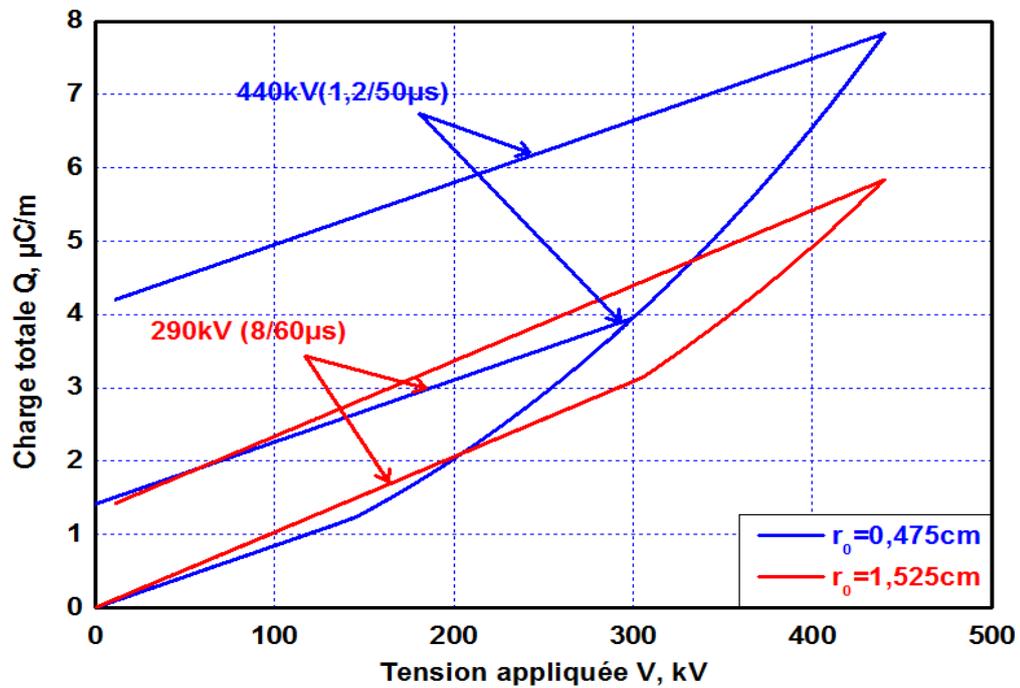


Figure 4.21 Effet de la taille du conducteur sur la charge couronne.

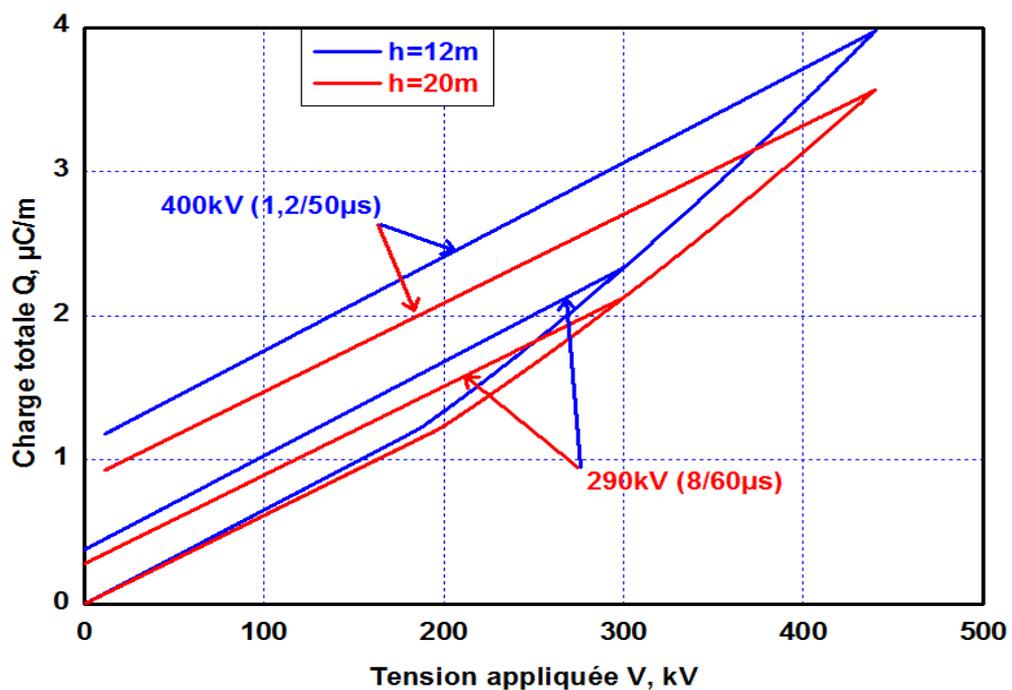


Figure 4.22 Effet de la hauteur du conducteur sur les caractéristiques Q-V.

Un résultat de ce sous-programme pour une valeur crête de 400 kV est représenté par la forme d'onde de tension dans la figure 4.23.

La courbe dynamique de charge-tension pour une impulsion oscillatoire de 400 kV appliquée à la géométrie coaxiale dans laquelle les rayons intérieur et extérieur du conducteur sont pris égaux à 0,475 cm et 29,05 cm, est représentée dans la figure 4.24. Pour la partie ascendante de la courbe (partie OAB), la charge total varie d'une manière similaire à celle observée sous des impulsions multiples exponentielles. Après l'extinction de la couronne, qui survient lorsque la tension chute en dessous de la valeur initiale lors de la première oscillation, la partie (BC) de la courbe chute avec une pente approximativement égale à celle de la partie OA.

La forte réduction de charge observée (partie CD) est due à l'apparition de l'effet couronne inverse générant une charge de polarité opposée et se retourner vers le conducteur.

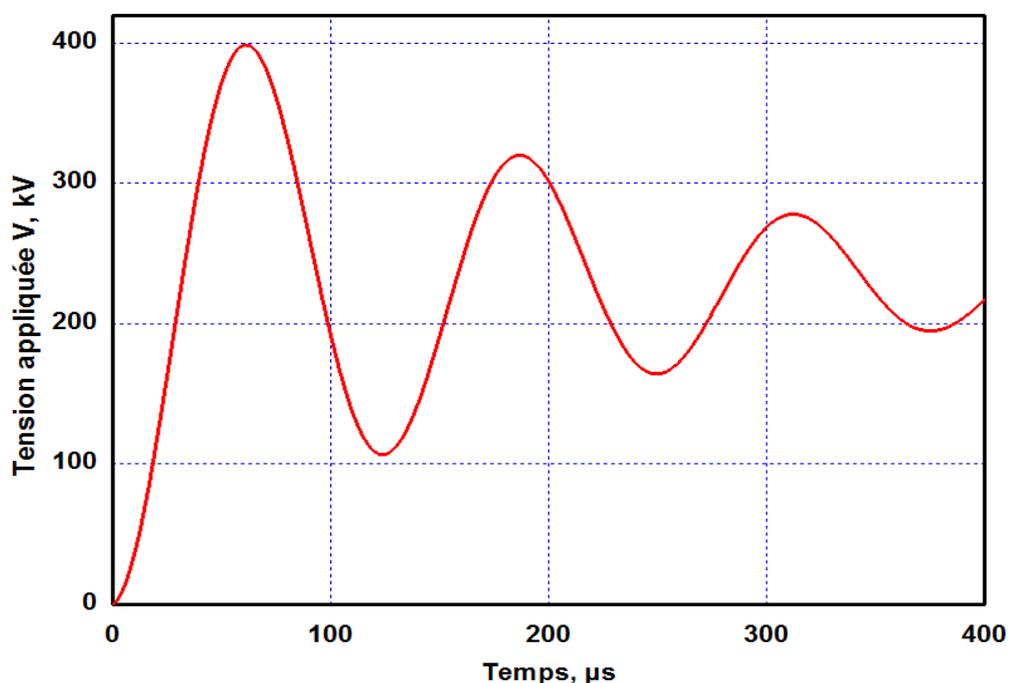


Figure 4. 23 Impulsion oscillatoire.

L'activité couronne au cours des cycles de tension subséquents consiste en un processus où les couronnes bipolaires ont lieu, les couronnes négatives se produisant aux tensions maximales et les couronnes inverses (positives) se produisant aux tensions minimales.

Cela donne à la courbe Q-V une caractéristique distincte et il montre des grandes boucles avec une augmentation continue de la charge couronne après des pics de tension successifs dus à la dérivée de la charge d'espace loin de l'électrode.

La réduction de charge due à la couronne inverse dépend de la mobilité de la charge d'espace vers le conducteur.

### ***(i) Comparaison avec les résultats expérimentaux***

Le modèle est testé en comparant les résultats obtenus avec les résultats expérimentaux de la référence [133] pour une configuration coaxiale. Comme il est montré dans la figure 4.25, pour une impulsion tension oscillatoire de 270 kV et une fréquence de 33 kHz, le modèle est capable de reproduire le comportement de la charge couronne sur les premiers cycles, et le pic de charge couronne sur le premier cycle.

Cependant, il existe des différences sur les parties ascendantes et les parties descendantes de la courbe, vraisemblablement en raison des approximations faites dans le modèle. De plus, quand le modèle ne tient pas compte du dérivé de charge après l'extinction de la couronne, il ne montre pas d'augmentation de charge sur la partie ascendante des cycles suivants. Une modélisation plus détaillée est requise pour répliquer ce comportement.

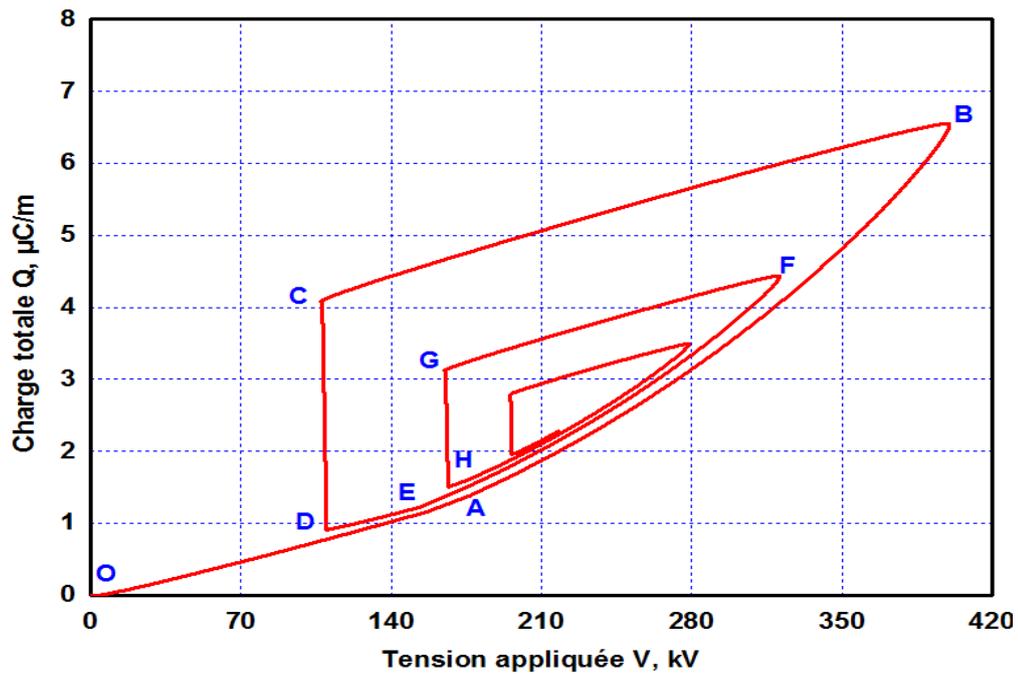


Figure 4.24 Courbes Charge-Tension pour l'impulsion oscillatoire.

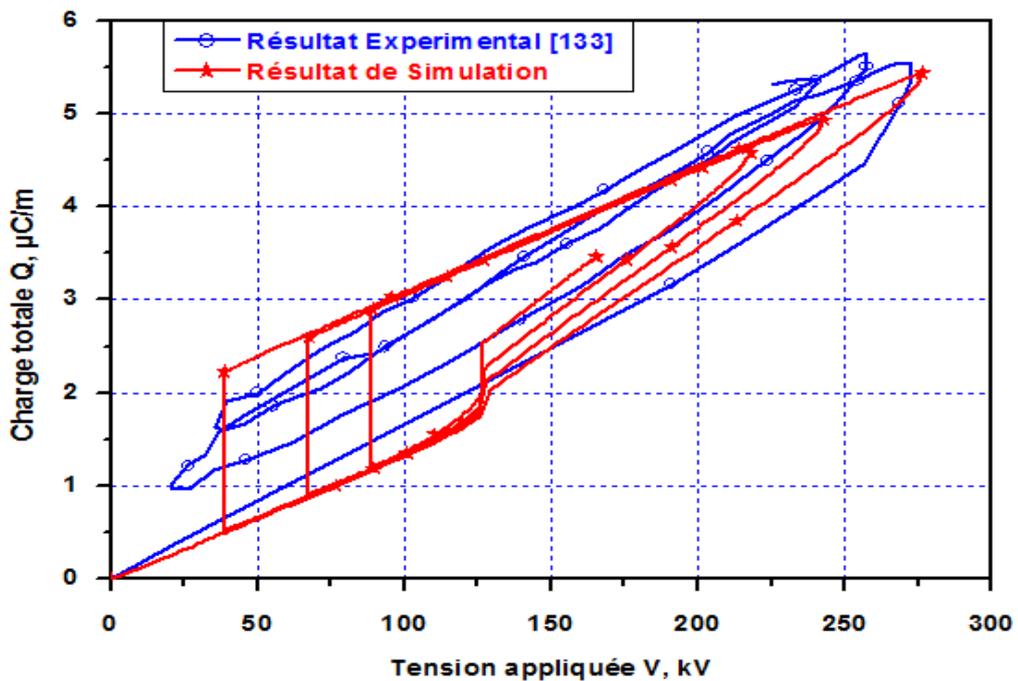


Figure 4.25 Courbes dynamiques Q-V, 33 kHz, 270 kV.

### (ii) Effet de la fréquence d'impulsion oscillatoire

L'effet de la fréquence sur les variations temporelles de la charge couronne a été considéré pour une configuration de conducteur coaxial avec un rayon de conducteur interne de 0,475 cm et un rayon de cylindre externe de 29,05 cm. Les

courbes représentées sur la figure 4.26 illustrent la variation de la charge au niveau du conducteur interne pour deux tensions d'impulsion oscillatoires ayant la même amplitude de 270 kV et des fréquences différentes de 50 kHz et 135 kHz. La couronne inversée semble se produire plus avec l'impulsion oscillatoire de 135 kHz qu'avec l'impulsion de 50 kHz. Cela peut être expliqué par les gradients de tension plus élevés qui se développent pendant la partie descendante de chaque cycle, créant un champ de charge d'espace de polarité opposée. Ce champ agit contre la croissance de la charge provoquant une diminution soudaine de la charge comme observé sur la figure 4.26. Cette couronne inverse ne se produit que dans la partie descendante du premier cycle pour une impulsion oscillatoire plus lente de 50 kHz.

La couronne avant dans les cycles suivants se comporte de manière similaire, créant une augmentation de la charge en fonction des contraintes définies dans le modèle. En réalité, comme cela a été observé avec les résultats expérimentaux montrés dans la figure 4.25, la réduction de charge près de la tension minimale ne se produit pas brusquement, et un raffinement du modèle est nécessaire pour prendre en compte ce changement. Les courbes charge-tension associées à ces deux impulsions sont représentées sur la figure 4.27.

Les courbes couronnes de charge-tension pour un conducteur de rayon 0,475 cm au dessus du sol à une hauteur  $h = 12$  m, pour les fréquences de 50 kHz et 135 kHz et la valeur de crête de tension appliquée 270 kV sont indiquées dans la figure 4.28. Dans ce cas également, l'impulsion oscillatoire de fréquence est plus élevée que celle avec une impulsion de fréquence inférieure.

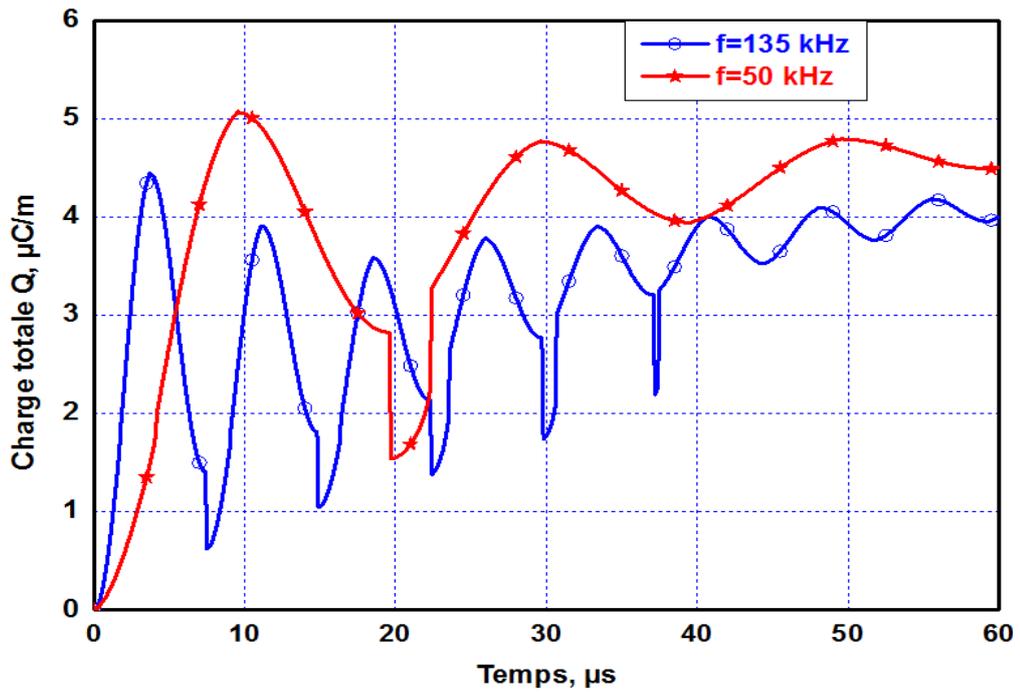


Figure 4.26 Variation de la charge sous les fréquences de 50 kHz et 135 kHz.

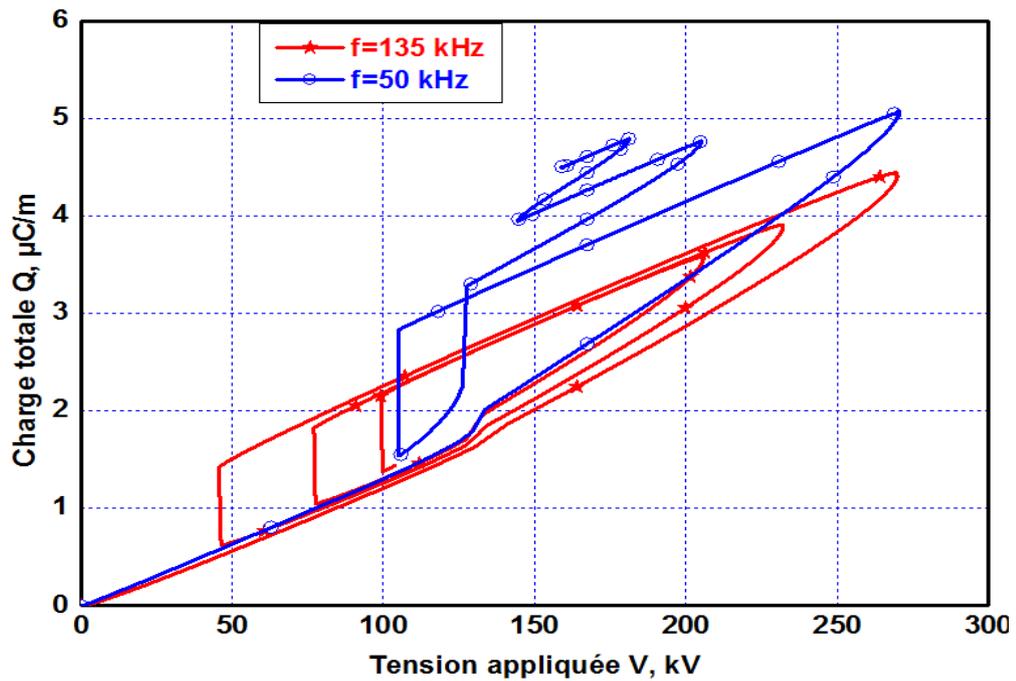
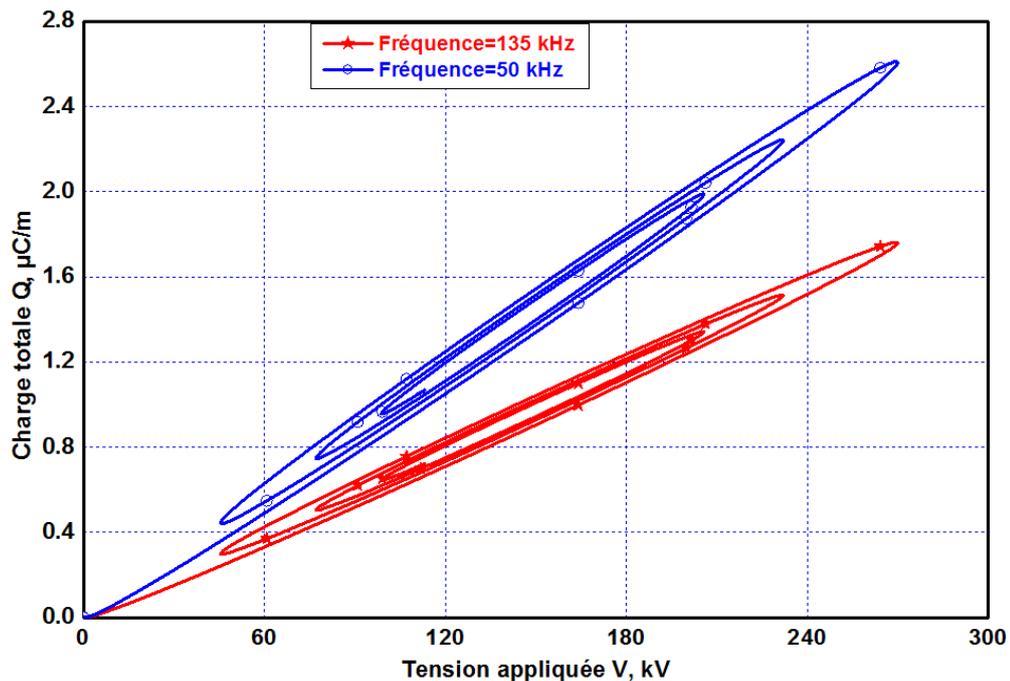


Figure 4.27 Effet de la fréquence sur les caractéristiques Q-V.



**Figure 4.28** Effet de la fréquence sur les courbes Q-V pour une configuration conducteur au dessus du sol.

#### 4.5.4. L'utilisation du composant électrique (élément de circuit) Type-94

Dans le calcul de propagation des surtensions, la difficulté de considérer l'effet couronne était ses caractéristiques non linéaires, donc, pour résoudre ce problème, les courbes Q-V sont proposées en tant que données d'entrée.

Une nouvelle méthodologie, pour développer la simulation dynamique du phénomène de distorsion des surtensions standard et non standard le long des lignes de transmission avec l'effet couronne, est proposée en utilisant le composant non linéaire Type-94.

Sans l'élément de Type-94, la modélisation des composants électriques par TACS ou MODELS est limitée aux applications dans lesquelles le retard d'un pas de temps avec l'EMTP est tolérable, souvent au prix de la sélection d'un pas de temps plus petit. Le retard d'un pas de temps a pour effet d'imposer une prédiction, avec une correction différée (retardée) d'un pas de temps, car l'état de la composante calculé dans MODELS à l'instant 't' n'affecte pas le circuit électrique jusqu'à l'instant 't+Δt'. Le comportement du composant est

généralement représenté dans le circuit en laissant les valeurs calculées dans MODELS contrôler le fonctionnement des sources de tension ou de courant, des résistances variant dans le temps et des commutateurs.

Lorsqu'on utilise l'élément non linéaire type-94, on peut représenter un composant de circuit dans MODELS, puis connecter ce composant directement au circuit comme un élément non linéaire régulier d'EMTP. Le composant MODELS est simulé simultanément avec le reste du circuit électrique, sans retard temporel. Le composant type-94 est vu par l'EMTP comme une boîte noire électrique connectée au circuit sous la forme d'une ou plusieurs branches. Il est spécifié dans le cas de données avec les autres branches du circuit. Le modèle associé est défini dans la section MODELES du cas de données. Le même modèle peut être utilisé par plusieurs composants de type-94 dans le même circuit.

Le circuit électrique, tel qu'il apparaît à partir du composant type-94, doit apparaître localement linéaire. À l'aide du composant MODELS type-94, il est donc possible pour un utilisateur d'écrire un modèle dans le langage MODELS pour représenter le comportement d'un composant électrique. Une considération importante est que l'interface avec le circuit est définie en termes de tension et de courants du cas de données de l'utilisateur.

Le modèle couronne est résolu simultanément avec le reste du système simulé qui interagit avec celui-ci en tant qu'élément de circuit, ceci est accompli en utilisant le modèle avec le composant de circuit Type-94 (Thevenin, Norton ou iterated). Le modèle peut être utilisé pour calculer la surtension de foudre qui se propage sur les lignes de transport aériennes.

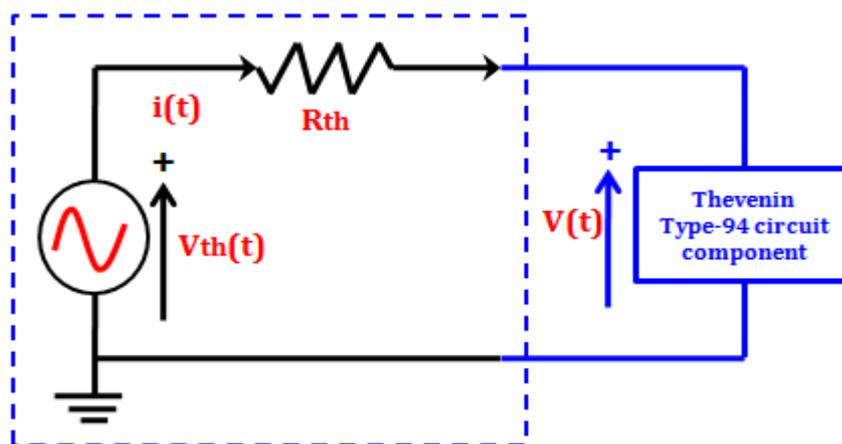
Le composant Type-94, dans lequel la capacité couronne est calculée, est un vrai composant non linéaire. Il ajoute de nouveaux composants électriques dans l'EMTP avec utilisation des sous-programmes externes dans ce composant de Type-94 [94, 106, 139].

La figure 4.29 montre l'interface d'un composant Type-94, Thevenin ou

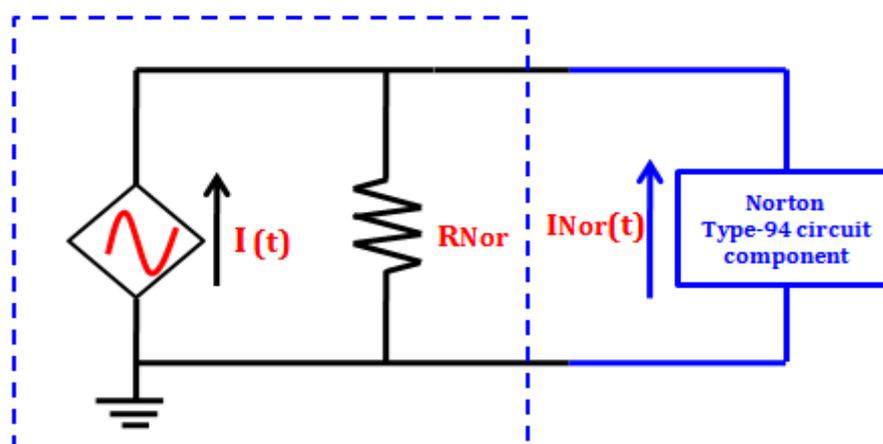
Norton, avec le reste du circuit, et dans lequel les équations présentées, dans la section 4.5.2 décrivant l'effet couronne, sont introduites.

De cette manière, le modèle proposé est une contribution utile pour le calcul des surtensions transitoires sur les lignes de transmission en ce qu'il peut être directement incorporé en tant que composant de circuit dans les réseaux de lignes de transmission en considérant le comportement non linéaire de l'effet couronne a chaque pas de temps de la surtension.

Ce modèle sera utilisé dans l'étude de la propagation des surtensions sur les lignes de transmission qui sera discuté dans chapitre 5.



a. Interface entre le composant de circuit Thevenin Type-94 de l'ATP- EMTP.



b. Interface entre le composant de circuit Norton Type-94 de l'ATP- EMTP.

**Figure 4.29** Composant non-linéaire de Type-94 de l'ATP- EMTP.

#### 4.6. Conclusion

Un modèle des coques de charge couronne pour la simulation des caractéristiques non-linéaires de la décharge couronne impulsionnelle a été développé dans ce chapitre, pour deux cas: étude statique et étude dynamique. Le modèle est utilisé pour le calcul et la prédiction des caractéristiques charge-tension basées sur les formules empiriques des courbes Q-V de la décharge couronne sous l'effet des surtensions produites sous des impulsions de foudre standard et non standard par implémentation dans un environnement logiciel ATP-EMTP en utilisant le langage de simulation MODELS.

L'application du modèle proposé à une configuration coaxiale et une configuration conducteur au dessus du sol est présentée et analysée. Le modèle est validé en comparant les résultats calculés avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, et étendu pour la configuration des conducteurs en faisceau.

Il muni un moyen pour une estimation précise des caractéristiques de l'effet couronne à l'un des modèles proposés à une configuration de conducteur coaxial et une configuration au-dessus du sol pour plusieurs types d'impulsions de surtension comme les impulsions exponentielles, multiples et oscillatoires.

L'impulsion couronne pourrait conduire à une forte atténuation et à une distorsion de la forme d'onde de surtension due à la propagation de la foudre le long de la ligne de transmission aérienne. Le modèle couronne sera introduit à l'aide d'un composant de circuit non-linéaire Type-94 dans un modèle détaillé de la ligne pour traiter le phénomène d'atténuation et de distorsion des surtensions.

# Chapitre 05

## PROPAGATION DES ONDES DE SURTENSIONS SUR LES LIGNES DE TRANSMISSION

---

### 5.1. Introduction

Dans les réseaux à haute tension destinés au transport d'énergie électrique, la foudre peut toucher une ligne électrique frappant soit un conducteur de phase, soit un pylône ou un câble de garde, provoquant sur les lignes de transmission des surtensions importantes classées comme les contraintes les plus dangereuses pour les postes de transformation et les systèmes électro-énergétiques en général.

L'impact direct et indirect de la foudre sur l'un des conducteurs, s'illustre par la propagation bidirectionnelle d'une onde de surtension de plusieurs centaines de kV et peut atteindre les 200 kA. Dans le domaine de la coordination des isollements ainsi que la compatibilité électromagnétique CEM, les contraintes produites par la foudre reste toujours d'intérêt major et à tenir compte de priorité dans la mise en place de tout système de protection. Au cours de la propagation des surtensions le long de la ligne vers les postes et si leur amplitude est suffisamment élevée, elles subissent une déformation et une atténuation sous l'influence des pertes par effet Joule, de l'effet couronne, de l'effet de peau. L'acte paradoxal de l'effet couronne vu qu'il est généré par l'élévation du champ électrique autour du conducteur causé lui-même par l'impact de la foudre, participe d'une manière directe à la coordination des isollements électriques. C'est dans ce contexte, qu'on présente la propagation des ondes des surtensions dues à la foudre dans les lignes de transmission aériennes : OAT-El Hassi (220 kV) et OAT- Saleh Bay (400 kV) en présence du modèle dynamique de l'effet couronne.

## 5.2. Comparaison entre les différents modèles de ligne

La modélisation des lignes de transmission devient plus compliquée, si la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance série due à l'effet de peau dans les conducteurs et dans la terre est considérée. La difficulté augmente au fait que les paramètres de la ligne peuvent être définis et calculés seulement dans le domaine fréquentiel, tandis que la simulation des transitoires est souhaitée être dans le domaine temporel. Les relations d'entrée / sorties dans le domaine fréquentiel c. à. d. les multiplications avec des fonctions de transfert devient des convolutions dans le domaine temporel [140-150, 151, 152].

La méthode de modélisation des lignes de transmission en fonction de la fréquence peut être résumée comme suit :

1. Calcul des fonctions de la ligne dans le domaine fréquentiel (réponse en fréquence). Dans le cas des lignes polyphasées la décomposition modale est appliquée pour obtenir par exemple la fonction de déformation d'onde ou l'impédance/admittance caractéristiques.
2. Approximation des ces fonctions par une approximation directe dans le domaine fréquentiel ou dans le domaine temporel après une transformation numérique à partir du domaine fréquentiel (transformée de Fourier inverse, ou la transformée de Laplace).
3. Calcul des transitoires dans le domaine temporel par évaluation d'intégrale de convolution numériquement ou analytiquement. Dans le cas de solution analytique le modèle de la ligne peut être réduit au circuit équivalent de Norton, qui est souhaitable pour l'implémentation dans l'EMTP. La plus part des modèles de ligne de transmission utilise les composantes modales pour la simulation dans le domaine temporel, tandis que le dernier modèle implémenté par Taku Noda dans l'ATP utilise l'approche du domaine de phase direct

Les performances de chaque modèle augmente en utilisant le signe '+' ou '-' dans le tableau 5.1. Le signe '-' signifie que le modèles est pauvre par rapport à l'objectif en question, par contre le signe positif implique que le modèle correspondant est supérieur pour cet objectif.

**Tableau. 5.1** Résumé des principaux modèles de ligne de transmission.

Objectifs	Circuits en $\pi$	LPDC (K. C. Lee)	Semlyen	J. Marti	T. Noda
Lignes aériennes	0 Manuel / LC	+ manuel / LC	++ LC	+++ LC	++++ LC / CP
Câbles	0 Manuel / LC	+ manuel / LC	++ CC	++ CC	+++ CP
Lignes déséquilibrées	+	+ à une fréquence constante	++ Utilisation composants modaux	++ Utilisation composants modaux	+++ modélisation domaine de phases
Comportement amortisseurs	-	- à une fréquence	++ dépendant fréquence	+++ dépendant fréquence	+++ dépendant fréquence
Modélisation des ondes mobiles	-	++	+++	+++	+++
Complexité du modèle	Simple	Simple	Zéros et pôles réels ordre 2	Zéros et pôles réels ordre élevé	
Utilisation des composants modaux	non la ligne est représentée en coordonnées de phases	oui à une fréquence constante	oui Matrice de transfor. réelle à une fréquence	oui Matrice de transfor. réelle à une fréquence	Seulement pour créer les données de fréquences La ligne dan le domaine réel
Stabilité	+++ absolument stable	+++ absolument stable	+ généralement stable *	++ généralement stable *	+++ critère de stabilité durant l'approximation des données

Les modèles de ligne de transmission suivants pour le calcul des transitoires sont donnés dans l'ordre de complexité du modèle.

- 1.Éléments RLC couplé mutuellement (circuits  $\pi$ );
- 2.Modèle de ligne à paramètres distribués constant (LPDC).
  - a. modélisation résistive concentrée ;
  - b. modélisation en mode sans déformation;
  - c. Ligne distribuée en double circuit, avec couplage homopolaire.
- 3.Modèle de ligne basé sur la convolution récursive du 2<sup>ème</sup> ordre (A. Semlyen);
- 4.Modèle de ligne dépendant de la fréquence (J. Marti) ;
- 5.Modèle de ligne ARMA dépendant de la fréquence (T. Noda).

### 5.3. Modélisation de la ligne de transmission

L'étude de simulation consiste à modéliser une ligne réelle de transport, à l'aide du simulateur ATP/EMTP, avec ses paramètres réels, cette ligne peut divisés à des courtes sections égales, et sujettes à une amplitude de choc de foudre. Les modèles couronne sont injectés aux points d'interconnexion de chaque section de la ligne (figure 5.1).

On a choisis une portion de longueur 2,1 km divisée en sept portées. Chaque portée a une longueur de 300 m qui est proche à la valeur moyenne des portées de cette ligne montrées dans les tableaux 5.2 et 5.3 et elle contient dix sections de 30 m de longueur. Le premier cas a traité est le cas de la ligne OAT-El Hassi alimentée en 220 kV, et le deuxième cas est la ligne de OAT- SALEH BAY de 400 kV, est une ligne triphasée avec deux câbles de gardes, où chaque phase contient un faisceau de deux conducteurs.

Les caractéristiques de ces deux lignes, les spécifications physiques et les paramètres géométriques du pylône sont résumées dans les tableaux 5.2 et 5.3.

La Figure 5.1 montre un tronçon de trois pylônes de cette ligne qui comporte les éléments suivants : pylônes, résistance de mise a la terre, isolateurs, sections de la ligne aérienne, câble de garde et le canal du courant de coup de foudre.

Dans la suite de ce chapitre on va présenter la modélisation des principaux éléments qui entre dans l'étude de la décharge couronne et son intégration dans un système pour l'analyse et la simulation de l'atténuation des surtensions transitoires qui se propagent sur les lignes aériennes.

La ligne de transmission aérienne est simulée par le modèle multiconducteur de J. Marti. Les données d'entrée comprennent la configuration géométrique des conducteurs, les diamètres et la géométrie des faisceaux. Les paramètres de ligne sont calculés par le sous-programme 'LINE CONSTANTS' construit dans l'ATP/EMTP, et les caractéristiques de la ligne de transmission de J. Marti sont montrées dans la figure 5.2.

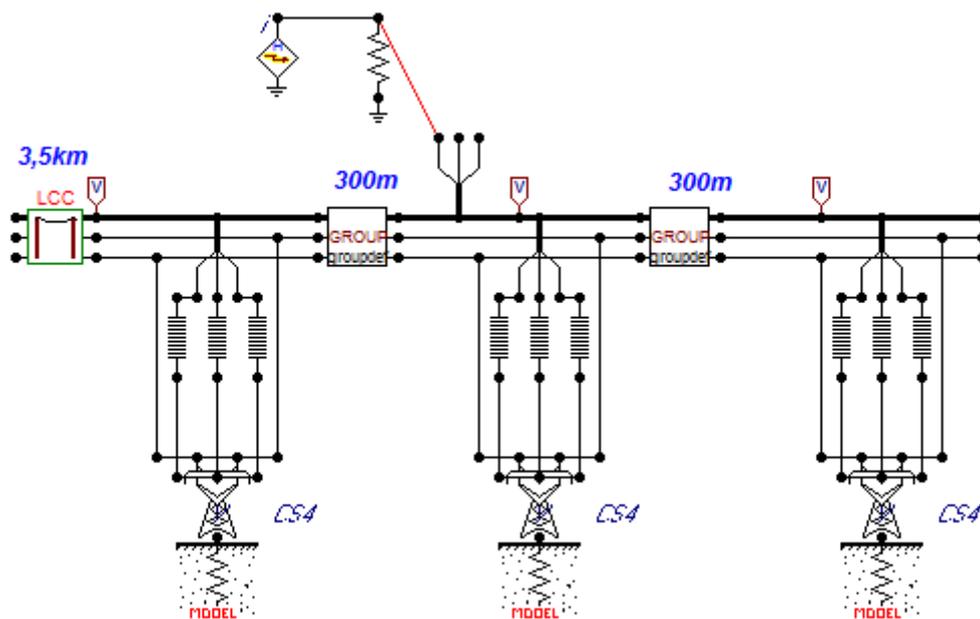


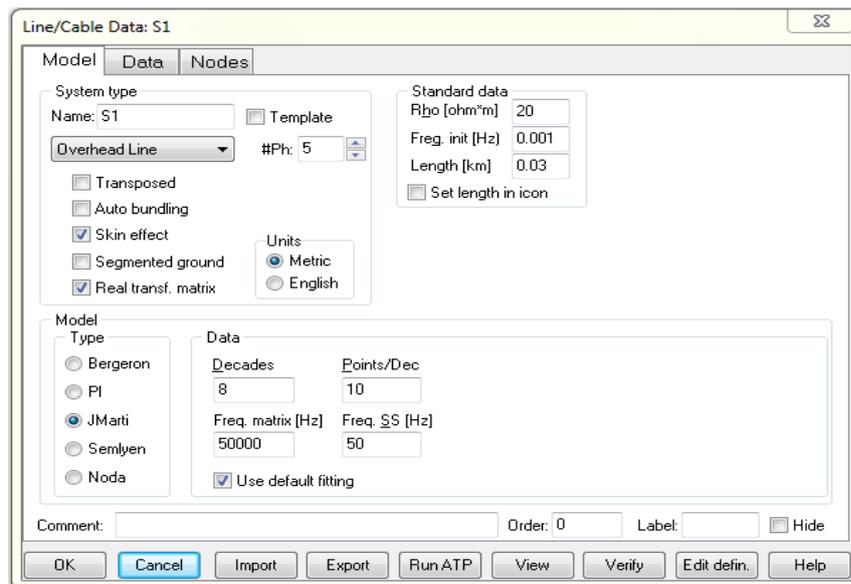
Figure 5.1 Tranche de 3 pylônes modélisée avec ATP-EMTP.

**Tableau 5.2** Caractéristiques de la ligne OAT-HASSI 220 kV [153].

p	N° pylône	1	2	3	4	280	279	278	277	276
	Types	CS4	C0	AO	AR4	AR4	AO	CO	CS4	CS4
	H (pylône)	28,8	24,8	25,3	21,3	21,3	25,3	24,8	28,8	28,8
	Portée (m)	368	248	260	221	310	325	342	334	302
Conducteur de phase AL-AC 411 mm <sup>2</sup>	R int (mm)	6,0								
	R ext (mm)	13,2								
	R <sub>0</sub> (Ω/km)	0,0898								
	Distance Horizontale (m)	7,8	7,8	7,0	7,0	7,0	7,0	7,8	7,8	7,8
	H tower (m)	24,2	20,2	22,8	18,8	18,8	22,8	20,2	24,2	24,2
	Paramètre m	1500								
	H mid (m)	14,2	13,5	11,0	11,2	12,05	13,0	14,01	10,0	11,0
Conducteur de garde AL-AC 116 mm <sup>2</sup>	R int (mm)	3,0								
	R ext (mm)	7,0								
	R <sub>0</sub> (Ω/km)	0,309								
	Distance Horizontale (m)	5,05	5,05	4,4	4,4	4,4	4,4	5,05	5,05	5,05
	H tower (m)	28,8	24,8	25,3	21,3	21,3	25,3	24,8	28,8	28,8
	Paramètre (m)	1600								
	H mid (m)	17,1	16,5	15,2	16,2	16,5	17,8	18,5	14,5	

**Tableau 5.3** Caractéristiques de la ligne OAT- SALEH BAY 400 kV [153].

P	N° pylône	Travée	1	2	3	4	5	6	7	8
	Types	Travée	Sch0+ 3	Sch0+1,5	Lt0+ 3	Lt0+ 6	Lt6+7,5	Lt0+4,5	Lt0+3	Lt0+1.5
	H (pylône)	22,55	28,85	27,35	33,55	36,55	44,05	35,05	33,55	32,05
	Portée (m)	105,33	212,5	357,16		300	390	350	440	350
Conducteur de phase Almélec 2x570 mm <sup>2</sup>	R int (mm)	-								
	R ext (mm)	15,525								
	R <sub>0</sub> (Ω/km)	0,0583								
	Distance Horizontale (m)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	H tower (m)	16,55	22,85	21,35	28,50	31,50	39,0	30,0	28,50	27,0
	Paramètre m	250	1000	1200						
	H mid (m)	15,0	11,0	10,0	17,0	15,0	11,5	15,1	11,0	10
Conducteur de garde 1x79 mm <sup>2</sup> Acier / Fibre optique 190 mm <sup>2</sup> -OPGW75/ 115-24s	R int (mm)	-								
	R ext (mm)	5,75 9,92								
	R <sub>0</sub> (Ω/km)	0,239 0,185								
	Distance Horizontale (m)	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85
	H tower (m)	22,55	28,85	27,35	32,05	36,55	27,35	32,05	32,05	35,05
	Paramètre (m)	400 350	1300 1200	1400 1600						
	H mid (m)	23,5 23,5	18,5 18,25	21,5 20,75	28,5 27,5	28,25 26,5	24,25 22,5	29,5 27,25	23,5 22,0	



**Figure 5.2** Caractéristiques de la ligne de transmission de J. Marti.

### 5.3.1. Pylônes

Les pylônes sont des supports qui portent les conducteurs de phase et les câbles de garde par le biais des isolateurs. Dans le cas de défaut, les pylônes relient le câble de garde à la terre pour écouler une partie du courant.

Les pylônes qui constituent la ligne de transport de l'énergie électrique ne font pas partie intégrante du modèle de la ligne et peuvent être créés de différentes manières.

En suivant une approche simplifiée, sur les pylônes qui peuvent être représentés par une forme géométrique simple, avec une impédance de surtension calculée en fonction des expressions dérivées théoriquement ou au moyen d'expériences sur des modèles réduits (Tableau 5.4). Ainsi, tous les segments du pylône sont représentés en utilisant une impédance de surtension égale  $Z_T$  ( $\Omega$ ) (figure 5.3). L'impédance de surtension des pylônes de 220 kV et de 400 kV, en cours d'étude (figure 5.3) en fonction des différents modèles de pylônes, est donnée dans le Tableau 5.4.

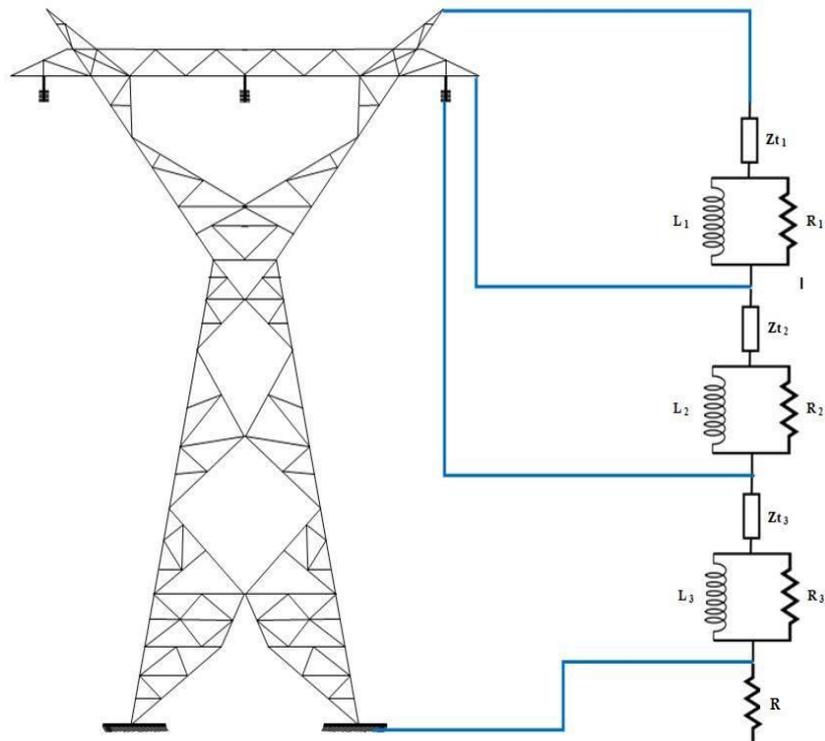
**Tableau 5.4** L'impédance caractéristique de surtension de pylône.

N°	Modèle	Expression	$Z_T (\Omega)$	
			220kV	400kV
1	Jordan [154]	$Z_T = 60 \left[ \ln\left(\frac{h}{r_2}\right) - 1 \right]$	100	153
2	Wagner & Hileman [155]	$Z_T = 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{2h}{r}\right)$	222,41	205
3	Sargent & Darveniza [156]*	$Z_T = 60 \left[ \ln\left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_3}\right) - 1 \right]$	220,92	220
4	Sargent & Darveniza [156]** IEEE WG [157]	$Z_T = 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r}\right)$	180,97	163
5	Menemenlis & Chun [158]	$Z_T = 50 + 35\sqrt{h}$	237,82	285
6	Chisholm et al. [159]**	$Z_T = 60 \ln\left(\cot\left(\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{r}{h}\right)\right)\right)$	-	-
7	Chisholm et al. [159]*	$Z_T = 60 \left[ \ln\left(\cot\left(\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{r}{h}\right)\right)\right) - 1 \right]$	-	-
8	Chisholm et al. [159]***	$Z_T = 60 \ln\left(\cot\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} T\right)\right)$	-	-
9	Flash-over.1.7 [160]	$Z_T = \sqrt{\frac{\pi}{4}} 60 \left( \ln\left(\cot\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} T\right)\right) - \ln\sqrt{2} \right)$	-	-
10	Hara & Yamamoto [161]	$Z_T = 60 \left[ \ln\left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_2}\right) - 2 \right]$	102,41	155

\* pylône cylindrique, \*\* pylône conique, \*\*\* pylône cintré.  
 Où r (m) est le rayon de base de pylône, r<sub>1</sub> (m) est le rayon supérieur du pylône, r<sub>2</sub> (m) est le rayon de pylône à la taille, h (m) est la hauteur de la base à la taille, h<sub>2</sub> (m) est la hauteur de la taille au sommet,  $T = r_1 h_2 + r_2 h + r h_1 / h^2$ , r<sub>3</sub> (m) est le rayon du cylindre représentant le pylone.

Le type de pylône qui sera utilisé dans la présente étude est le type à plusieurs étages (Multistory tower model) proposé par Sargent et Darveniza (Tableau 5.4) [156, 162].

Ce modèle, comme montre dans la figure 5.3, est adopté par plusieurs chercheurs [156, 163-165] où chaque partie métallique du pylône est modélisée par un tronçon d'une ligne monophasée en série avec un filtre R-L, qui représente les résistances d'amortissement Ri et les inductances Li. Ces derniers paramètres sont estimés en fonction de la géométrie du pylône.



**Figure 5.3** Modèle multi-étages du pylône 200/400 kV.

Afin de pouvoir utiliser ce modèle nous avons besoin de l'introduire pour la ligne de transmission la vitesse de propagation qui est généralement égale à la vitesse de la lumière, c'est donc de l'ordre de 300 m/ $\mu$ s [166] et les impédances  $Z_{t1}$ ,  $Z_{t2}$  et  $Z_{t3}$  qui sont prises égales à 220  $\Omega$ , 220  $\Omega$ , et 150  $\Omega$  respectivement. Les paramètres des éléments des filtres R-L peuvent être déterminés de la manière suivante:

- Pour les résistances :

$$R_i = \frac{-2 Z_{ti} \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2} h_i \quad (i = 1, 2) \quad (5.1)$$

Et

$$R_3 = -2 Z_{t3} \ln \sqrt{\gamma} \quad (5.2)$$

Avec :

$\gamma$  : Coefficient d'atténuation, sa valeur peut être prise égale à 0,8.

$R_i$  : Les résistances des tronçons en [ $\Omega$ ].

- Pour les inductances :

$$L_i = \frac{\alpha R_i 2H}{V_t} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5.3)$$

$$H = h_1 + h_2 + h_3 \quad (5.4)$$

Avec :

$L_i$  : Les inductances des tronçons en [mH].

$V_t$  : Vitesse de propagation égale à 300m/ $\mu$ s.

$\alpha$  : Coefficient d'amortissement. Il peut être pris égal à l'unité.

Il convient de noter que les valeurs correspondant à chaque pylône et la longueur de chaque tronçon  $l_i$ (m) sont données dans le Tableau 5.5.

**Tableau 5.5** Paramètres Equivalents du model multi étages.

220 kV	$R_1$ ( $\Omega$ )	31,80	$L_1$ ( $\mu$ H)	6,105	$Z_{t1}$ ( $\Omega$ )	220	$l_1$ (m)	4,6
	$R_2$ ( $\Omega$ )	17,28	$L_2$ ( $\mu$ H)	3,317	$Z_{t2}$ ( $\Omega$ )	220	$l_2$ (m)	2,5
	$R_3$ ( $\Omega$ )	33,47	$L_3$ ( $\mu$ H)	6,426	$Z_{t3}$ ( $\Omega$ )	150	$l_3$ (m)	21,7
	$R$ ( $\Omega$ )	50,00						
400 kV	$R_1$ ( $\Omega$ )	29,91	$L_1$ ( $\mu$ H)	3,589	$Z_{t1}$ ( $\Omega$ )	220	$l_1$ (m)	4,6
	$R_2$ ( $\Omega$ )	19,17	$L_2$ ( $\mu$ H)	2,300	$Z_{t2}$ ( $\Omega$ )	220	$l_2$ (m)	2,5
	$R_3$ ( $\Omega$ )	33,47	$L_3$ ( $\mu$ H)	4,016	$Z_{t3}$ ( $\Omega$ )	150	$l_3$ (m)	21,7
	$R$ ( $\Omega$ )	50,00						

### 5.3.2. La résistance de terre

Le système de mise à la terre des pylônes peut être modélisé comme une résistance non-linéaire. Cette dernière dépend de la valeur instantanée du courant d'ionisation du sol.

Le modèle de la mise a la terre le plus simple et le plus utilisé dans les simulations est le modèle d'une résistance constante. Mais il existe d'autres modèles plus réels dans lesquels on modélise la mise à la terre par une résistance non linéaire. Le tableau 5.6 représente quelques expressions qui simulent les modèles de la mise à la terre des pylônes.

Dans le présent travail, le modèle CIGRE est utilisé. Ce choix est justifié par le fait que ce modèle peut prédire la variation de cette résistance quand l'intensité du champ électrique dépasse sa valeur critique, et se forme un canal hautement conducteur autour de la terre [167, 168-172].

La mise à la terre est modélisée par une résistance non linéaire Type-91 dans l'ATP/EMTP, contrôlée à travers MODELS dans lequel on a implanté l'expression de ce modèle (figure 5.4).

**Tableau 5.6** Différents modèles des prises de terre.

Modèle	Expression	$E_0$ (kV/m)
Oettle [167]	$\log \Pi_1 = -0,3 \cdot \log \Pi_2 - 0,62, \quad 0,005 \leq \Pi_2 \leq 20$	1000
Chisholm et al. [173] (a) Chisholm et al. [173] (b)	$\Pi_1 = 0,2631 \cdot \Pi_2^{-0,3082}, \quad 0,3 \leq \Pi_2 \leq 10$	1000 $241 \cdot \rho^{0,215}$
CIGRE WG [174]	$R(I) = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} I_g = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_0 \cdot \rho}{R_0^2}$	400
Chowdhuri [175] from Korsuntcev [176]	$\Pi_1 = 0,2965 \cdot \Pi_2^{-0,2867}, \quad \Pi_2 \leq 5$ $\Pi_1 = 0,4602 \cdot \Pi_2^{-0,6009}, \quad 5 < \Pi_2 \leq 50$ $\Pi_1 = 0,9534 \cdot \Pi_2^{-0,7536}, \quad 50 < \Pi_2 \leq 500$ $\Pi_1 = 1,8862 \cdot \Pi_2^{-0,8693}, \quad \Pi_2 > 500$	1000
Yasuda et al. [177]	$R(I) = \begin{cases} R_0 & I < I_g \\ \frac{R_0}{\sqrt{\frac{I}{I_g}}} & I \geq I_g \end{cases} \quad I_g = \frac{2\pi r^2 n E_0}{\rho}$	400

$I_g$  (kA) est le courant limité pour initier une ionisation suffisante du sol,  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ) est la résistivité du sol,  $r$  (m) est le rayon équivalent de la base de pylône,  $n$  est le nombre d'électrodes de mise à la terre,  $\Pi_1 = R \cdot s / \rho$ ,  $\Pi_2 = (I \cdot \rho / s^2 \cdot E_0)$  et  $s$  (m) est la distance caractéristique [175].

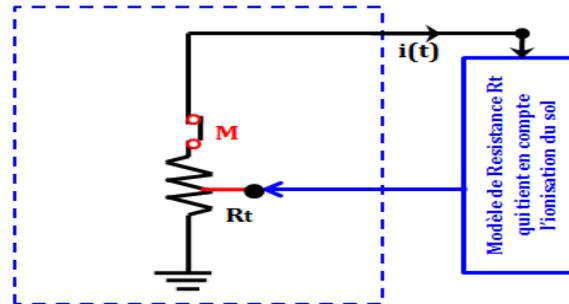


Figure 5.4 Modèle de la résistance de terre.

### 5.3.3. Isolateurs

L'évaluation de la rigidité diélectrique de l'isolation de ligne soumise à des surtensions de front rapides est d'une importance majeure pour la coordination de l'isolation des lignes aériennes et des sous-stations connectées [178, 179]. Beaucoup de modèles pour la prévision du comportement diélectrique des intervalles d'air et des isolateurs sont proposés dans la littérature. Les modèles de développement d'arc sont les plus utilisés [180]. Ces derniers ont une plus grande signification physique et caractérisent mieux les décharges électriques. Le tableau 5.7 présente les modèles les plus rencontrés.

Parmi ces modèles le modèle de CIGRE a été utilisé (figure 5.5). Dans ce cas on modélise l'isolateur par une capacitance branchée en parallèle avec un modèle qui représente le mécanisme de contournement de l'isolateur. Ce dernier est représenté par un interrupteur contrôlé à travers MODELS, dans lequel sont implantées les équations données dans le tableau 5.7. Ce dernier élément est branché en série avec une résistance.

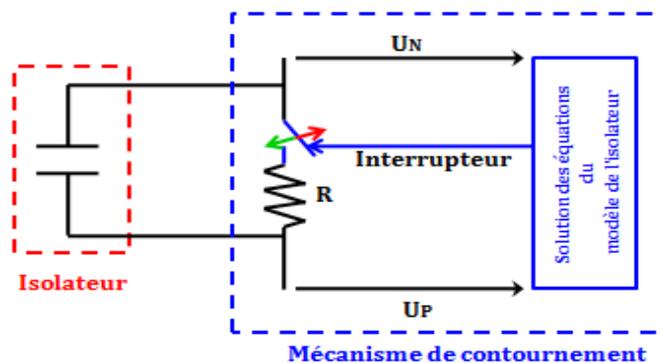


Figure 5.5 Modèle de l'isolateur utilisé avec contournement.

**Tableau 5.7** Modèles de développement d'arc.

Modèles	Vitesse d'arc	Condition de claquage
Wagner et Hileman [181]	$dl/dt = K \cdot D \cdot [V/(D - L) - E_0]$	$L \geq D$
Shindo et Suzuki [182]	$dL/dt = k_1 \cdot V^2 / (D + L) + k_2 \cdot C_2 \cdot V^2 \cdot v \cdot L / [D \cdot (D - L)]$ $dL/dt = k_1 \cdot V^2 / (D - 2 \cdot L) + k_2 \cdot C_1 \cdot V^2 \cdot v \cdot L / [D \cdot (D - 2 \cdot L)]$	$L \geq D^1$ $2L \geq D^2$
CIGRE [183]	$dL/dt = k_3 \cdot V \cdot [V/(D - L) - E_0]$ $v = [dL/dt]$	$L \geq D$
Pigini et al. [184]	$dL/dt = 170 \cdot D \cdot [V/(D - L) - E_0] \cdot \exp[1,510^{-3} \cdot V/D]$	$L \geq D$
Motoyama [185], [186] <sup>3</sup>	$dL/dt = k_{10} \cdot [V/(D - 2 \cdot L) - E_0]$ $dL/dt = k_{11} \cdot [V/(D - 2 \cdot L) - E'] + v'$	$0 \leq 2L \leq D/2$ $D/2 \leq 2L \leq D$
Wang et al. [187]	$dL/dt = k_0 \cdot [V/(D - L) - E_0]$	$2L \geq D$ $2L \geq D^5$

<sup>1</sup> Ecart entre pointe- plan. <sup>2</sup> Ecart entre pointe- pointe.<sup>3</sup>Critère de streamer: selon (1) [185] ou quand  $V/D = E_0$  [186].<sup>4</sup>isolateur en porcelaine capot et tige. <sup>5</sup> Isolateur composite.

$L$  (m) est la longueur de l'arc,

$k_0$  ( $m^2 \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$ ),  $k_1$  ( $m^2 \cdot kV^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $k_2$  ( $m^2 \cdot kV^{-1} \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}$ ),  $k_3$  ( $m^2 \cdot kV^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $K$  ( $m \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$ ),

$k_{10}$  ( $m^2 \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$ ) et  $K_{11}$  ( $m^2 \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$ ) sont des constantes,

$V$  (kV) est la tension instantanée aux bornes de l'isolateur ou de l'intervalle,

$D$  (m) est la longueur de l'isolateur ou la longueur de l'intervalle,

$C_1$  (F/m) est la capacité par unité de longueur de l'arc au sol,

$v$  (m/s) est la vitesse de l'arc,

$E_0$  (kV/m) est la force du champ électrique critique,

$E'$  (kV/m) est la valeur de  $V/(D-2L)$  lorsque  $L$  est égal à  $D/4$ ,

$v'$  (m/s) est la valeur de  $dL/dt$  lorsque  $L$  est égal à  $D/4$ .

En sortie, la section de contrôle donnera l'ordre de fermeture de l'interrupteur contrôlé à travers MODELS indiquant que l'amorçage de la chaîne d'isolateurs a lieu. Le temps correspondant représente le temps  $t_l$  dans l'équation (5.4).

D'après la référence [188] le temps de claquage peut s'exprimer par:

$$t_c = t_i + t_s + t_l \quad (5.4)$$

Avec :

$t_c$ : Le temps total de claquage.

$t_i$ : Le temps de commencement de l'effet couronne ( $t_i=0$ ).

$t_s$ : Temps de streamer  $\mu s$ .

$t_l$ : Temps de la propagation de l'arc.

L'arc électrique se crée juste après le temps de streamer  $t_s$ , qui se calcule par la relation suivante :

$$t_s = \frac{E_{50}}{1,25 E - 0,95 E_{50}} \quad (5.5)$$

Avec :

$E_{50}$ : La valeur critique du champ électrique (kV/m).

$E$ : La valeur actuelle du champ électrique (kV/m).

$t_l$ : est déterminé une fois que la longueur de l'arc électrique atteint la hauteur de la chaîne d'isolateurs.

Cette longueur d'arc peut être calculée à partir des deux relations suivantes [188] :

$$\frac{dL}{dt} = k_3 \cdot V \left[ \frac{V}{D - L} - E_0 \right] \quad (5.6)$$

$$L_n = L_{n-1} + v_{n-1} \Delta t \quad (5.7)$$

On peut aussi représenter le mécanisme de contournement d'un isolateur avec le deuxième modèle dont la tension d'amorçage peut être calculée en utilisant l'équation (5.8).

L'amorçage de l'isolateur aura lieu au moment où la tension à ses bornes dépasse la tension critique d'amorçage [189].

$$V_{f0}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}}\right) w \quad (5.8)$$

Où:

$V_{f0}$ : La tension d'amorçage en kV

$w$  : La longueur totale de chaîne des isolateurs [m].

$t$  : Temps de l'amorçage [ $\mu$ s].

#### 5.3.4. Modélisation du coup de foudre

La foudre est une contrainte électrique très sévère, avec une amplitude arrivant à 200 kA en quelques microsecondes, ayant des fréquences très élevées. Elle est par suite plus contraignante que celle due au manœuvre.

Des expressions analytiques, les plus souvent utilisées dans la littérature [188, 190-191], pour représenter le courant à la base du canal, sont classées dans le tableau 5.8 suivant.

Dans la bibliothèque de l'ATP-EMTP il existe un certain nombre de modèles qui peuvent être utilisés pour représenter un coup de foudre. Il peut être représenté par une source de courant de forme exponentielle en parallèle avec une résistance représentant le canal de foudre (d'environ 400  $\Omega$ ) ou encore une source de tension ayant toujours une forme exponentielle. Dans la présente investigation le coup de foudre est représenté par une source de tension de forme exponentielle on se basant sur la deuxième forme de Heidler citée dans le tableau 5.8 [191, 192]. Elle est représentée dans la figure 5.6.

**Tableau 5.8.** Les différents modèles représentant le canal du coup de foudre.

Modèles	Expressions
Bi-Exponentielle [192]	$I(t) = I_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$
Deuxième forme de Heidler [192]	$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(\frac{t}{\tau_2}\right)$ $\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}\right)$
Première Heidler [192]	$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}} \exp\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}} \exp\left(\frac{t}{\tau_{22}}\right)$
Nucci [193]	$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + I_{02} \left( \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_4}\right) \right)$
CIGRE [183]	$I_{CIGRE}(t) = \begin{cases} A_1 t + A_2 t^n & t \leq t_c \\ B_1 \exp\left(-\frac{t-t_c}{t_1}\right) - B_2 \exp\left(-\frac{t-t_c}{t_2}\right) & t > t_c \end{cases}$

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux nombres constants en  $s^{-1}$  et  $I_m$  est un nombre constant défini en kA.

$\eta$ : Le facteur de correction de l'amplitude.

$I_0$ : L'amplitude du courant à la base du canal.

$\tau_1$  et  $\tau_2$ : La constante de temps de front et la constante de décroissance respectivement.

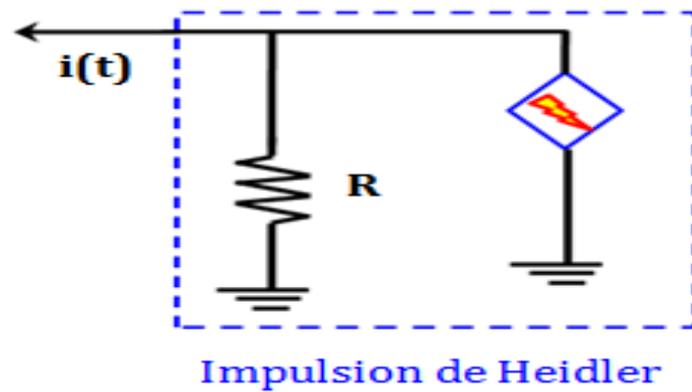
$n$ : facteur influençant la raideur de la fonction compris entre 2 et 10.

Les huit paramètres de la fonction Heidler à double termes sont les suivants:  $I_1$  et  $I_2$ :

pour contrôler l'amplitude des impulsions du courant,  $\tau_{11}$ ,  $\tau_{12}$ : constantes de temps

avant,  $\tau_{21}$ ,  $\tau_{22}$ : constantes de temps de décroissance et  $n_1$  et  $n_2$ : exposants qui contrôlent

la pente.



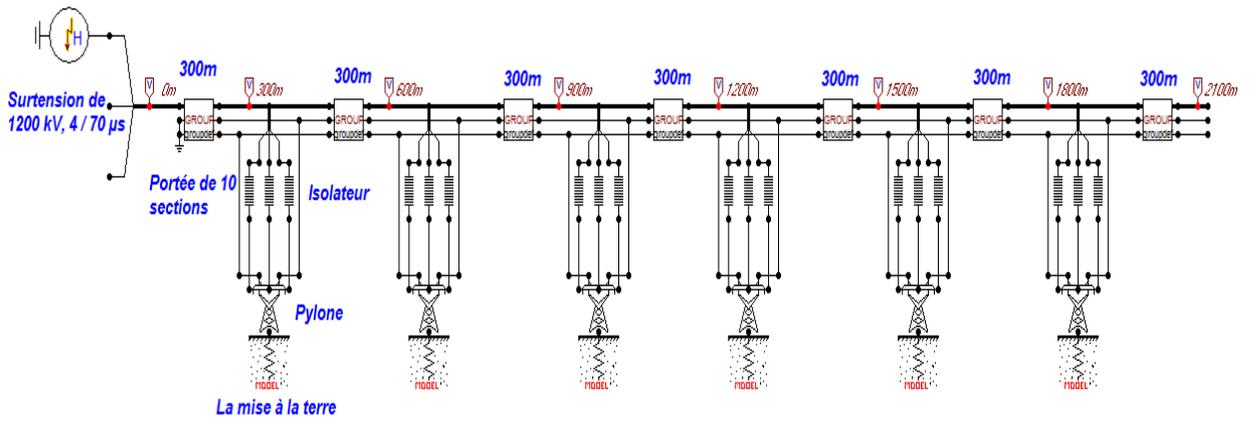
**Figure 5.6** Modèle de coup de foudre de type Heidler.

#### 5.4. Résultats de simulation

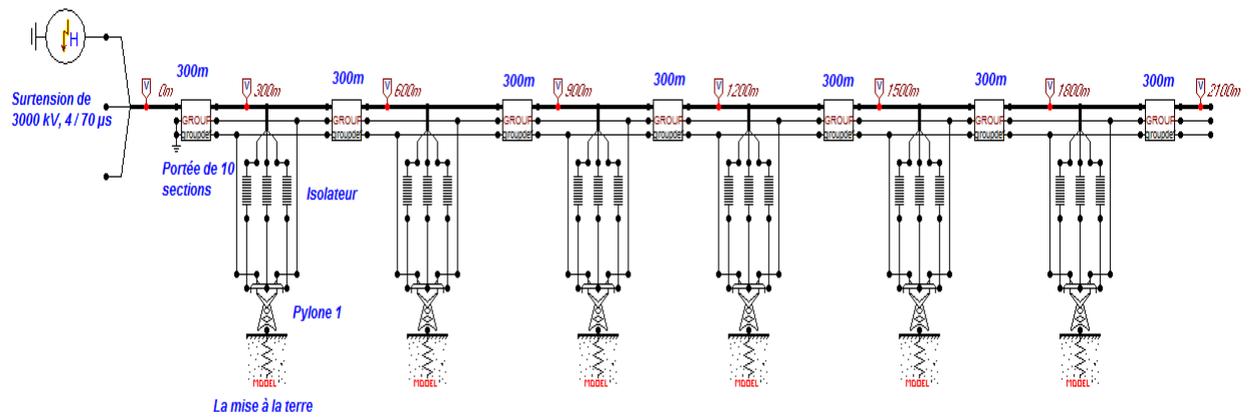
Dans le but d'analyser la propagation des ondes de surtensions le long d'une ligne de transmission, le modèle dynamique de l'effet couronne développé précédemment sous forme d'un composant Type-94 a été incorporé dans les lignes de transmission étudiées.

Deux types de lignes ont été utilisées (220 et 400 kV). Chaque ligne est divisée en un certain nombre de sections identiques (7 portées de 10 sections chacune) comme il est montré dans la figure 5.7.a pour la ligne 220 kV. La représentation de la ligne 400 kV est également présentée dans la figure 5.9.b. Les détails d'une portée sont montrés dans la figure 5.7.c.

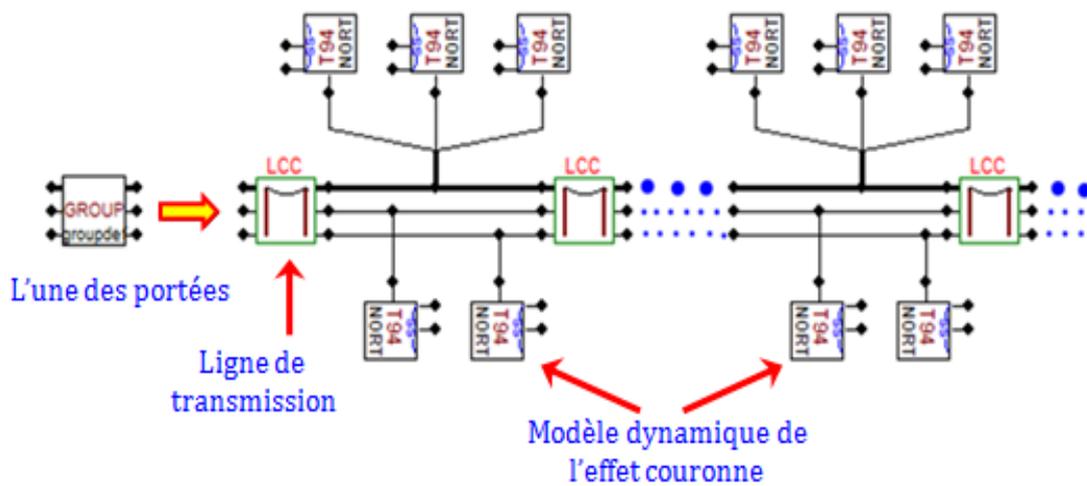
Dans les paragraphes qui suivent, les différents résultats de simulation obtenus seront présentés et discutés. Le cas qui sera traité concerne l'étude de la réponse de la ligne de transmission soumise à des surtensions type foudre injectée dans la phase A.



a. La ligne OAT-El Hassi (220 kV) soumise a une surtension de 1200 kV.



b. La ligne OAT- Saleh Bay (400 kV) soumise a une surtension de 3000 kV.



c. Présentation d'une portée.

Figure 5.7 Les modèles des lignes implantés dans l'EMTP.

#### 5.4.1. Cas d'absence de l'effet couronne

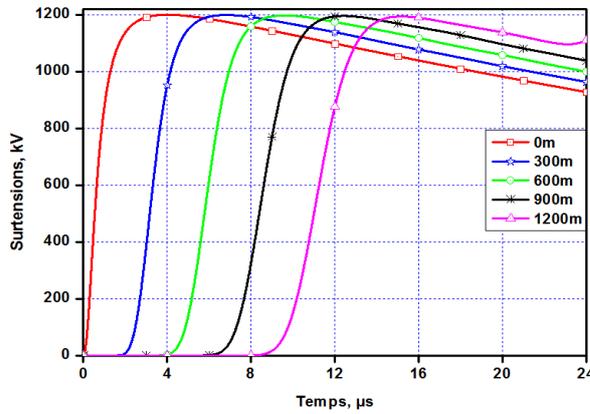
Dans cette investigation deux ondes de surtension ont été appliquées. La première est une surtension de 1200 kV en onde 4/70  $\mu$ s injectée dans la ligne de 220 kV et la seconde est une surtension de 3000 kV en onde 4/70  $\mu$ s injectée dans la ligne de 400 kV.

Les figures 5.8.a et 5.8.b représentent la variation en fonction du temps des ondes de surtensions sur les lignes de 220 kV et 400 kV respectivement. Les points d'enregistrement sont choisis comme suit : 0, 300, 600, 900, et 1200 m. où, le point 0 représente le début de la ligne de transmission où l'injection de l'onde de surtension est appliquée. Les simulations ont été réalisées en considérant que l'effet couronne est absent. Les résultats de ce premier cas montrent que l'amplitude de l'onde de choc ne subit aucune atténuation en se propageant le long de la ligne de transmission. Par ailleurs, aucun changement de la forme d'onde n'est observé. Le retard observé représente le temps propagation de l'onde de tension.

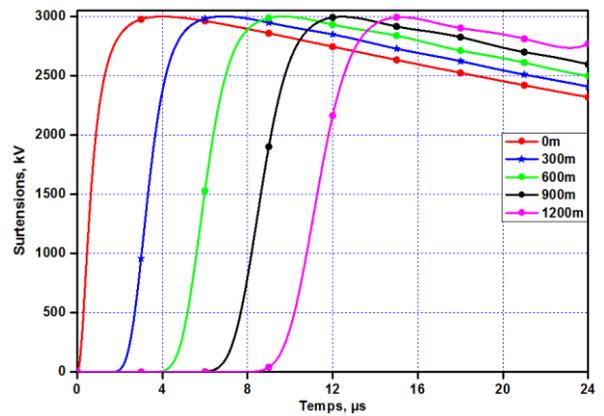
#### 5.4.2. Cas de présence de l'effet couronne

Dans le but de faire une comparaison entre le cas d'absence et de présence de l'effet couronne on a tracé dans la figure 5.9 l'évolution de la forme d'onde en fonction du temps. Dans cet exemple, on a choisi le point d'enregistrement se trouvant à une distance de 300 m par rapport à l'origine de la ligne. Les mêmes formes d'ondes de surtensions ont été appliquées aux deux lignes test choisies dans ce travail (1200 kV, 4/70  $\mu$ s pour la ligne 220 kV et 3000 kV, 4/70  $\mu$ s pour la ligne 400 kV). La longueur de la section est prise égale à 30 m. Comme on peut facilement le voir. Les résultats montrent que l'amplitude de l'onde de choc subit une atténuation à 300 m d'environ 2% pour le cas de la ligne 220 kV et 6% pour la ligne 400 kV en se propageant le long de la ligne de transmission. Cette réduction est de plus en plus importante au fur et à mesure que l'onde de surtension se rapproche de l'extrémité de la ligne comme il est montré dans la figure 5.10 où on peut facilement voir, qu'au point 1200 m, une réduction d'environ 24% pour les deux lignes. Cette constatation est confirmée dans la

figure 5.11 où on a tracé l'évolution de la crête de tension avec la distance de propagation pour cette même longueur de section.

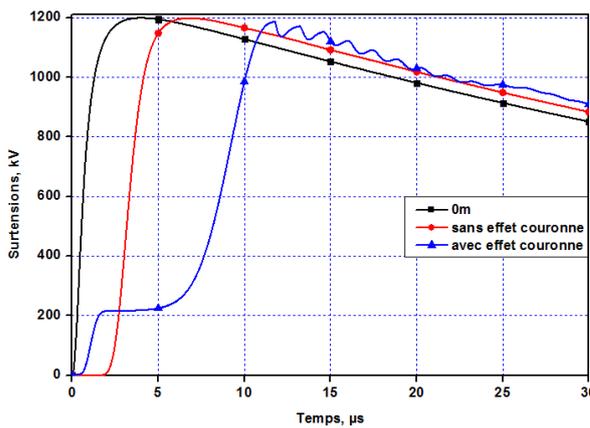


a. Cas de la ligne 220 kV.

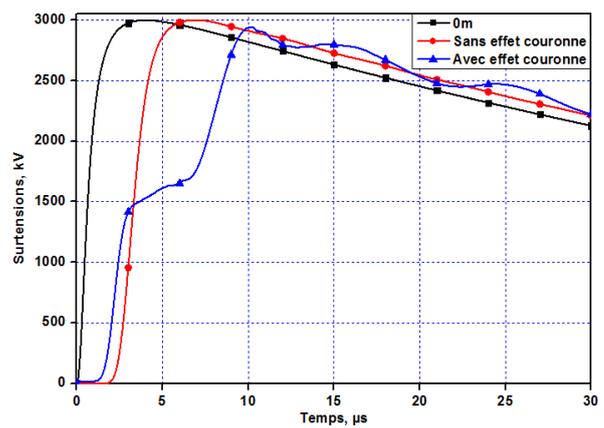


b. Cas de la ligne 400 kV.

**Figure 5.8** Propagation des ondes de surtensions en absence de l'effet couronne.

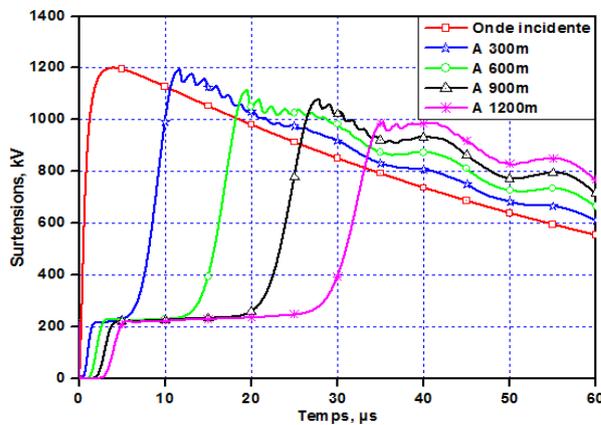


a. Cas de la ligne 220 kV.

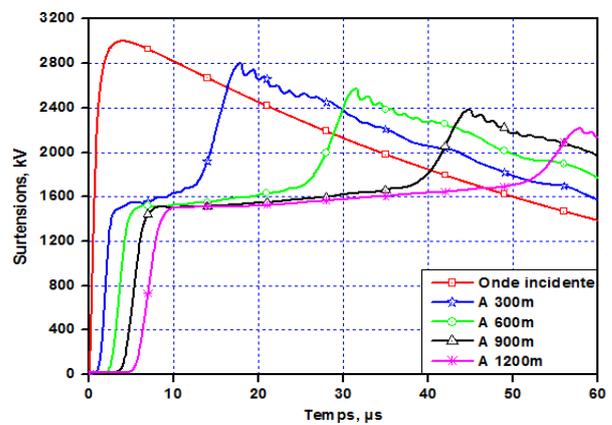


b. Cas de la ligne 400 kV

**Figure 5.9** Propagation des ondes de surtensions en présence de l'effet couronne.



a. Cas de la ligne 220 kV.



b. Cas de la ligne 400 kV

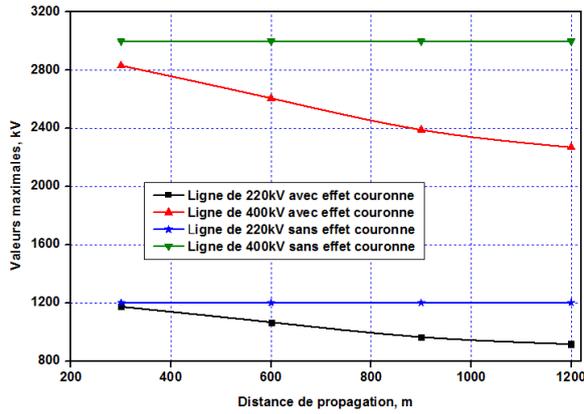
**Figure 5.10** Surtensions enregistrées en différentes positions de la ligne.

Par ailleurs, une distorsion de la forme d'onde est observée pour les deux lignes test. Les oscillations sur la queue de l'onde sont, peut-être, dues à la nature oscillatoire du circuit puisque l'effet couronne ajoute une capacité additionnelle au modèle de la ligne. La figure 5.12 illustre la variation du temps à la crête en fonction de la distance de propagation. Il est clair que l'onde incidente est de plus en plus lente en se propageant à l'extrémité de la ligne et cela constitue un avantage pour les appareils de protection dans le cas où ils doivent fonctionner.

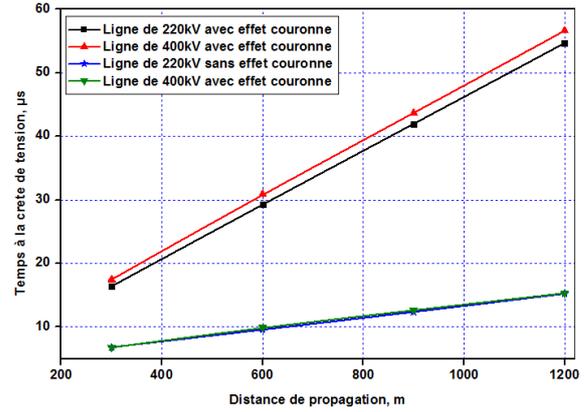
#### 5.4.3. Effet de la longueur de section.

L'objectif qu'on s'est fixé consiste à déterminer l'effet de la longueur des sections. Pour rendre compte de cet effet, cette dernière, a été prise égale à 10, 20, 30 et 50 m. L'enregistrement a été effectué à une distance de 300 m de l'origine de la ligne où la tension incidente est injectée. Les simulations ont été répétées pour chaque longueur de section choisie. Par ailleurs, les mêmes tensions que celles appliquées précédemment ont été appliquées dans ce cas (1200 kV, 4/70  $\mu$ s pour la ligne 220 kV et 3000 kV, 4/70  $\mu$ s pour la ligne 400 kV). Les résultats sont montrés dans la figure 5.13. Dans la figure 5.13.a on a présenté, pour la ligne 220 kV, l'évolution de la tension à 300 m de l'origine de la ligne en fonction du temps pour les longueurs de section choisies premièrement en l'absence de l'effet couronne puis en sa présence. Similairement, on présente dans la figure 5.13.b les résultats relatifs à la ligne 400 kV. On constate que, dans le cas d'absence de l'effet couronne, les petites sections (le grand nombre de section représentant la ligne) retardent d'avantage le front du choc sans affecter son amplitude. Cependant, elles accentuent la distorsion de la forme d'onde non seulement en retardant le front du choc (figure 5.14) mais aussi en réduisant son amplitude au-dessus de la tension critique de l'effet couronne (figure 5.15).

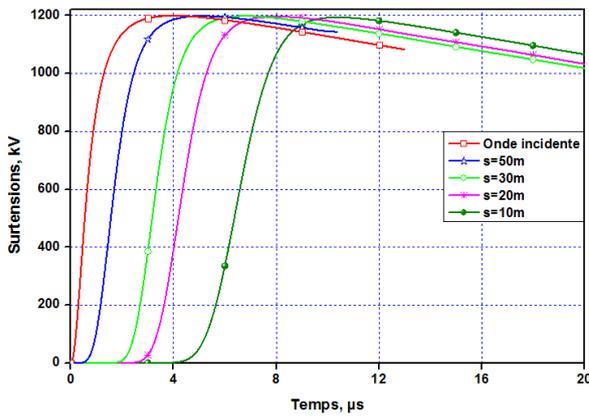
En conclusion, les résultats présentés montrent que le modèle dynamique de l'effet couronne est capable de suivre très bien les changements dans l'amplitude des ondes de surtension qui se propagent le long de la ligne.



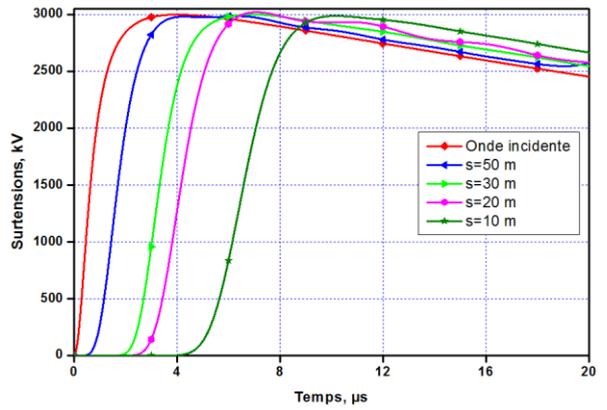
**Figure 5.11** Evolution de la crête de tension avec la distance de propagation ( $s=30m$ ).



**Figure 5.12** Evolution du temps à la crête de tension avec la distance de propagation ( $s=30m$ ).

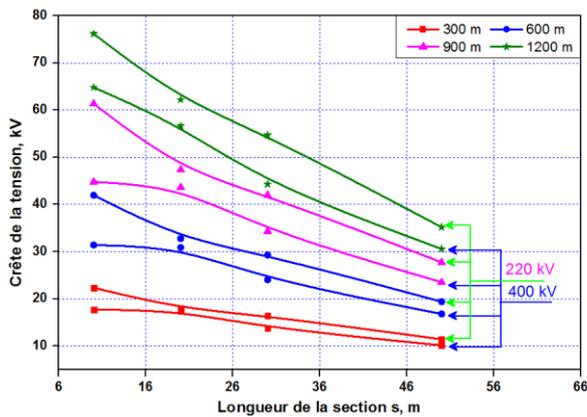


**a.** Cas de la ligne 220 kV.

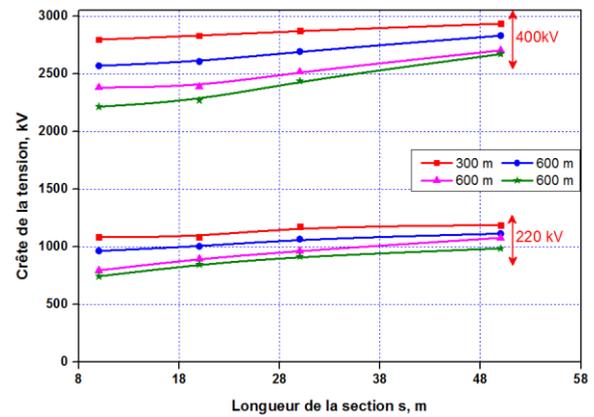


**b.** Cas de la ligne 400 kV

**Figure 5.13** Effet de la longueur de section  $s$  sur les formes d'ondes ( $d=300m$ ).



**Figure 5.14** Evolution du temps à la crête de tension avec la longueur d'une section s.

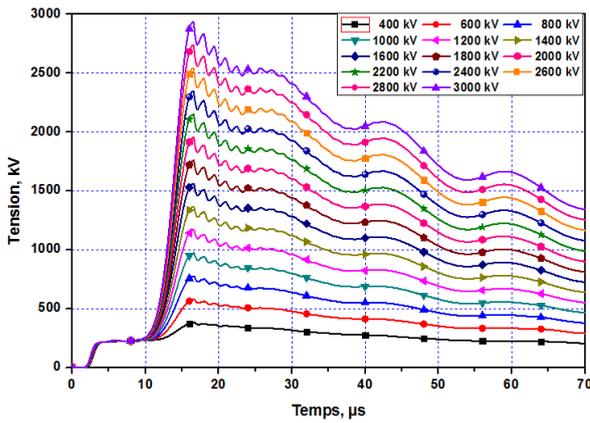


**Figure 5.15** Evolution de la crête de tension avec la longueur d'une section s.

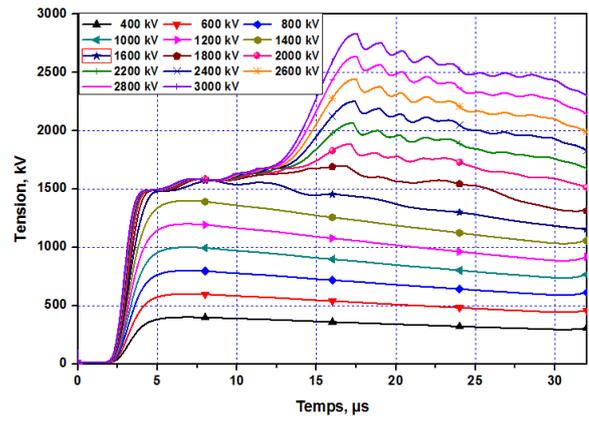
#### 5.4.4. Effet de l'amplitude de la tension appliquée.

Dans le cadre de la présente étude, la sensibilité des tensions prédites en différents points de la ligne vis à vis de la variation de la crête de la tension appliquée est étudiée. A cet égard, on a choisi de la faire varier entre 400 et 3000 kV, les autres paramètres restent inchangés. Les formes d'ondes de tensions prédites obtenues sont montrées dans les figures 5.16.a et 5.16.b. Dans la figure 5.16.a, on présente le cas de la ligne 220 kV et dans la figure 5.16.b, on présente le cas de la ligne 400 kV. Comme on peut le voir les crêtes des tensions prédites augmentent avec la crête de la tension appliquée. Cette forte dépendance des crêtes des tensions prédites sur la crête de la tension appliquée est plus claire en examinant la figure 5.17 où on présente la variation de la crête de la tension prédite en fonction de la variation de la crête de la tension appliquée.

Ces figures ont été tracées pour différents lieux de la ligne et auxquelles on a rajouté les crêtes de tension en ces mêmes lieux dans le cas sans effet couronne. On peut aussi facilement voir que l'amplitude de la tension appliquée est réduite d'avantage en se propageant le long de la ligne de transmission.

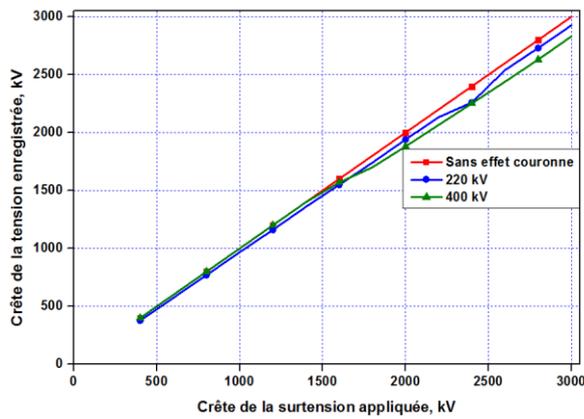


a. Cas de la ligne 220 kV.

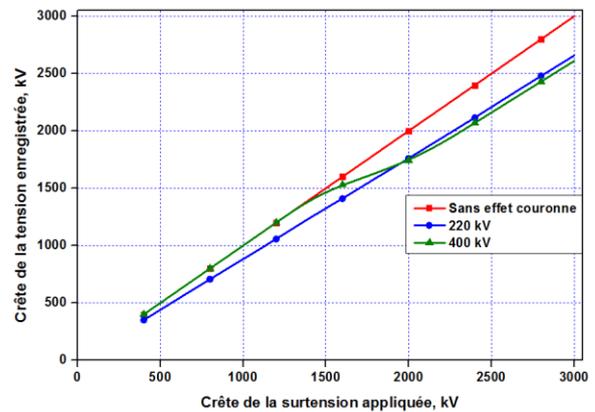


b. Cas de la ligne 400 kV

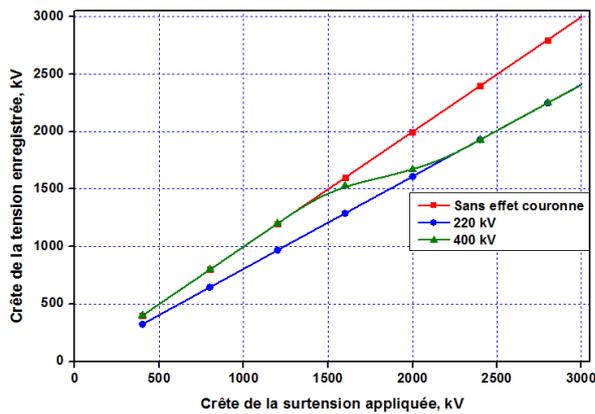
Figure 5.16 Effet de la crête de la tension appliquée sur les formes d'ondes (d=300 m)



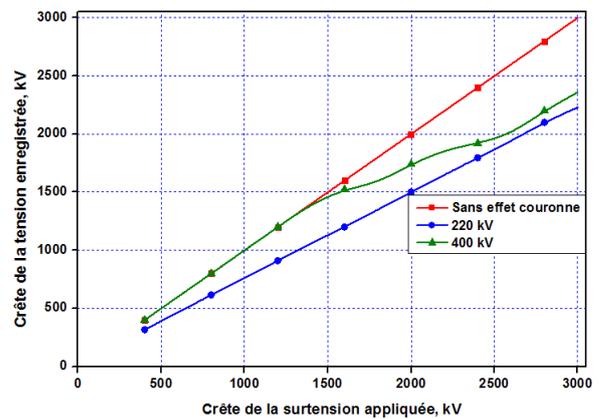
a. 300 m



b. 600 m



c. 900 m



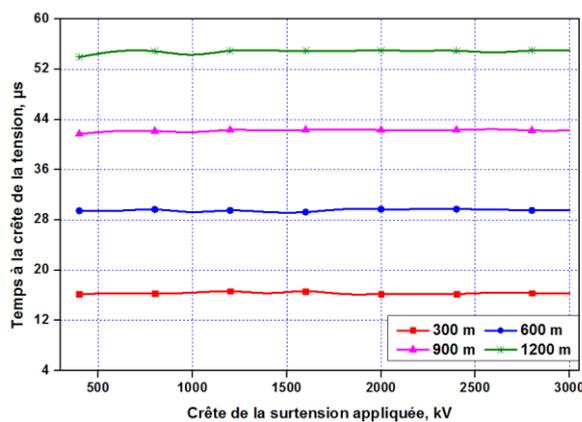
d. 1200 m

Figure 5.17 Variation de la crête de tension en fonction de la crête de la tension appliquée.

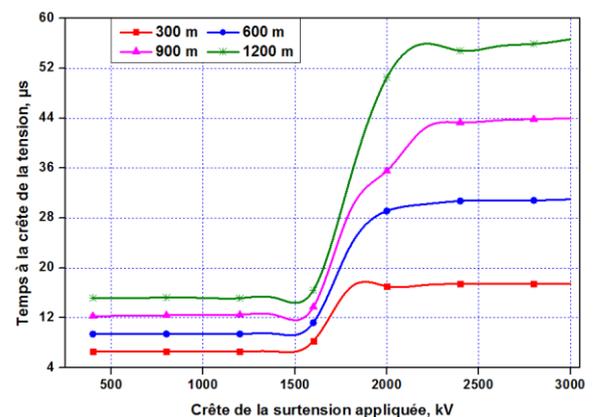
Par la même occasion, la variation de la tension en fonction du temps pour différentes amplitudes de la tension appliquée illustrée dans les figures 5.16.a et

5.16.b montrent une déformation nette de la forme d'onde appliquée en présence de l'effet couronne. La figure 5.18 illustre mieux cette distorsion où on présente la variation du temps à la crête de la tension prédite en fonction de la variation de la crête de la tension appliquée pour plusieurs lieux de la ligne de transmission. Dans la figure 5.18.a, où on présente le cas de la ligne 220 kV on constate que ce temps est pratiquement indépendant de la valeur crête de la tension appliquée. Cela est attendu puisque la forme d'onde a été maintenue inchangée. Cependant, dans la figure 5.18.b où on présente le cas de la ligne 400 kV on constate qu'il y a deux zones avec des temps différents. Une zone n°1 où le seuil de l'effet couronne n'est pas atteint mais le temps est toujours indépendant de la tension appliquée (voir figure 5.16.b). La zone n°2 est attribué à l'apparition de l'effet couronne et de même le temps est toujours indépendant de la tension appliquée (voir figure 5.16.b).

En conclusion, cela peut être expliqué par le fait que les pertes couronnes accentuent la distorsion de la forme d'onde en retardant d'avantage le front du choc au-dessus de la tension critique de l'effet couronne.



a) Ligne 220kV



b) Ligne 400kV

**Figure 5.18** Evolution du temps à la crête de tension avec la crête de tension appliquée

### 5.5. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est l'application du modèle dynamique de l'effet couronne implanté sous forme d'un composant non linéaire Type-94 dans l'ATP/EMTP dans le problème de propagation des surtensions le long des lignes de transmission. Les résultats de simulation ont été présentés et discutés en tenant compte des différents paramètres rentrants dans cette étude.

Il a été clairement montré qu'au cours de la propagation des surtensions le long des lignes aériennes vers les postes de transformation et quand leur amplitude est suffisamment élevée, elles subissent une déformation et une atténuation sous l'influence de l'effet couronne. Les réponses du modèle révèlent qu'il décrit d'une manière excellente la propagation des ondes mobiles et peut être utilisé dans les études des coordinations des isolements..

## Chapitre 06

# CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

---

La minimisation de l'effet couronne par des systèmes de transmission surdimensionnés serait extrêmement coûteux et, de plus, elle ne pourrait pas être souhaitable. L'effet couronne a tendance d'atténuer les parties d'une forme d'onde qui sont au-dessus du niveau de seuil de la décharge couronne à un taux beaucoup plus élevé. Cependant, pour amener ce phénomène dans les considérations de conception, les techniques d'analyse de ces caractéristiques non linéaires devraient être amenées à un niveau de développement similaire à celui de leur modélisation linéaire équivalente.

Il y a actuellement plusieurs difficultés.

- Premièrement, le phénomène de l'effet couronne est très compliqué et reste un champ de recherche très actif.
- Deuxièmement, des résultats fiables sur le terrain et en laboratoire sont très difficiles à obtenir et, par conséquent, rares.
- Troisièmement, une théorie de ligne non linéaire devrait être beaucoup plus compliquée que la théorie linéaire.

Le travail rapporté dans cette thèse se concentre sur la modélisation dynamique du phénomène couronne dans un langage très important dans les systèmes transitoires électromagnétique ATP/AMTP, par une méthodologie de conception établie. La modélisation de la décharge couronne serait un outil précieux pour l'analyse de la propagation des ondes de surtension sur les lignes de transmission pour faire avancer le sujet.

La deuxième partie est l'analyse de la propagation des ondes de choc sur les lignes de transmission entièrement dépendantes de la fréquence avec la présence du modèle couronne.

L'implantation de cette méthodologie a démontré son utilité dans l'analyse de la propagation des ondes de choc dues aux surtensions sur les lignes de transport d'énergie avec la présence du modèle couronne.

### 6.1. Résumés des Résultats

La première partie de ce travail décrit un modèle pour calculer la charge couronne générée par les surtensions transitoires sur les conducteurs de la ligne de transmission, en tenant compte des propriétés dynamiques non-linéaires du phénomène couronne, des formes d'onde non standard et de cas des surtensions multiples. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

Un modèle des coques de charge couronne pour la simulation des caractéristiques non-linéaires de la décharge couronne impulsionnelle a été développé dans ce chapitre, pour deux cas: étude statique et étude dynamique. Le modèle est utilisé pour le calcul et la prédiction des caractéristiques charge-tension basées sur les formules empiriques des courbes Q-V de la décharge couronne sous l'effet des surtensions produites sous des impulsions de foudre standard et non standard par implémentation dans un environnement logiciel ATP-EMTP en utilisant le langage de simulation MODELS.

L'application du modèle proposé à une configuration coaxiale et une configuration conducteur au-dessus du sol est présentée et analysée. Le modèle est validé en comparant les résultats calculés avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, et étendu pour la configuration des conducteurs en faisceau pour plusieurs types d'impulsions de surtension comme les impulsions exponentielles, multiples et oscillatoires.

L'objectif principal de la seconde partie est l'application du modèle dynamique de l'effet couronne implanté sous forme d'un composant non linéaire

Type-94 dans l'ATP/EMTP dans le problème de propagation des surtensions le long des lignes de transmission. Les portées de la ligne de transmission sont divisées en plusieurs sections courtes. Deux lignes de transmission des réseaux algériens ont été choisies: la ligne 220 kV reliant le poste Oued El-Atmania au poste El-Hassi et la ligne 400 kV le poste Oued El-Atmania au poste Saleh bay. Les résultats de simulation ont été présentés et discutés en tenant compte des différents paramètres rentrants dans cette étude.

Il a été clairement montré qu'au cours de la propagation des surtensions le long des lignes aériennes vers les postes de transformation et quand leur amplitude est suffisamment élevée, elles subissent une déformation et une atténuation sous l'influence de l'effet couronne. Les réponses du modèle révèlent qu'il décrit d'une manière excellente la propagation des ondes mobiles et peut être utilisé dans les études des coordinations des isolements.

## 6.2. Recommandations de recherche futures

Cette étude a offert une perspective évaluative sur les recherches expérimentales et théoriques sur l'effet couronne et leur rôle dans l'atténuation des ondes due aux surtensions au niveau de transport d'énergie électrique. Le modèle de la décharge couronne basé sur les propriétés physiques du phénomène de la décharge couronne a été choisi. L'objectif a été atteint et le modèle est maintenant disponible en utilisant l'interface MODELS du logiciel ATP/EMTP. Le modèle donne des résultats satisfaisants, où en les comparant aux résultats expérimentaux et de simulation disponibles dans la littérature. Par ailleurs, il montre une concordance très prometteuse pour continuer dans le futur l'implantation des modèles dynamiques avec plus d'améliorations dans la mise en considération d'autres processus de développement de la décharge.

Parmi les futures recherches qui peuvent améliorer ce travail on peut citer:

- Raffinement du présent modèle pour l'amélioration de la précision des résultats obtenus.

- L'effet de différents paramètres qui peuvent influencer sur le développement du processus couronne, comme l'humidité, la densité du gaz, et la nature des matériaux constituant les électrodes.
- Utilisation étendue du modèle dynamique dans la coordination des isolements des postes de transformation.
- Réalisation des expériences au niveau des laboratoires spécialisés à ce type d'étude, utilisant des lignes test.

## *Références Bibliographiques*

- [1] S. Carneiro, "The Study of Corona and its Effects on Surge Propagation on Transmission Lines - An Overview," Presented at The DCG/EPRI Technical Meeting on Corona Models, Ontario Hydro, Toronto, Ont., 1987.
- [2] N. Harid, R. T. Waters, "Statistical study of impulse corona inception parameters on line conductors," IEE Proc. A Science, Meas. Technol., Vol. 138, N° 3, pp. 161-168, 1991.
- [3] M. A. Al-Tai, H. S. B. Elayyan, D. M. German, A. Haddad, N. Harid, and R. T. Waters, "The simulation of surge corona on transmission lines," IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 4, N° 2, pp. 1360–1368, 1989.
- [4] N. Harid, R. T. Waters, "Statistical study of impulse corona inception parameters on line conductors," IEE Proc. A Science, Meas. Technol., Vol. 138, N° 3, pp. 161-168, 1991.
- [5] Leonard L. Grigsby, "The Electric Power Engineering Handbook," Electr. Power Gener. Transm. Distrib, 3rd Ed., 2012.
- [6] I. Ndiaye, "Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace," Mémoire d'Ingénieur, Université de Québec, 2003.
- [7] T. G. Olivera, "Etude expérimentale du contournement des isolateurs recouverts de glace sous tensions de foudre et de manœuvre," Mémoire d'Ingénieur, Université de Québec, 2004.
- [8] M. Hamel, "influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne", Mémoire de Magistère, université de Québec, 1991.
- [9] Yalis, "contribution à l'étude de l'influence des décharges de couronne sur la perte de volume d'une aspérité de glace portée à un potentiel élevé", Mémoire de Magistère, Université de Québec, 1993.
- [10] M. Haddad, D. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", Published by the institution of engineering and technology, London united kingdom, ISBN: 978-1-84919-038-1, Page. 669, 2004

- [11] F. W. Peek, "Dielectric phenomena in High voltage engineering," SCHENECTADY, N. Y, 1915.
- [12] X. Q. Zhang, "Study on corona characteristics under nonstandard lightning impulses," *Electr. Eng*, vol. 89, N°. 7, pp. 519-524, 2007.
- [13] K. Huang, X. Zhang, "An experimental study on corona qu curves under non-standard lightning impulses," *Journal Of Electrostatics*, Vol. 81, pp. 37-41, 2016.
- [14] J. H. Rakoton, "Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air - Application à la foudre", Thèse de Doctorat, l'Ecole Doctorale de Lyon, 2008.
- [15] C. F. Wagner, B. L. Lloyd, "Effects of Corona on Travelling Waves", *AIEE Transactions*, Vol. 74. Pt. III, pp. 858-872, 1955.
- [16] M. Al-Tai, H. S. B. Elyyan, D. M. German, A. Haddad, N. Harid, R. T. Waters, "The simulation of surge corona on transmission lines", *IEEE Trans. Power Deliv.* Vol. 4, N°.2, pp. 1360-1368, 1989.
- [17] C.L. WADHWA, "High Voltage Engineering", Second Edition, Published by New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2007
- [18] P. Yang, S. Chen, J. He, "Lightning impulse corona characteristic of 1000-kvuhv transmission lines and its influences on lightning overvoltage analysis results", *IEEE Trans. Power. Deliv*, Vol. 28, N°. 4, pp. 2518-2525. 2013.
- [19] J. He, X. Zhang, P. Yang, S. Chen, R. Zeng, "Attenuation and deformation characteristics of lightning impulse corona traveling along bundled transmission lines", *Electric Power Systems Research*, Vol. 118, pp. 29-36, 2015
- [20] C. Garry, M. Moreau, "Effet couronne on tension alternative", *Collection de la direction des études et recherches d'EDF*, N°. 24, Ed. Eyrolles. 1976.
- [21] G. J. Reid and H. J. Vermeulen, "Effects of conductor temperature on corona inception," 49th International Universities Power Engineering Conference pp.1-5. (UPEC), Cluj-Napoca, 2014.
- [22] R. T. Waters, Rickard, B. Sc, W. B, "Stark Direct measurement of electric field at line conductors during a.c. corona", *Proc. IEE*, Vol. 119, N°. 6, pp. 717-723. 1972.
- [23] D. M. German, R. T. Waters, N. Harid, M. A. Altai, "Impulse corona tests on

- single and bundle conductors", sixth international symposium on high voltage engineering, New Orleans, USA, pp. 1-4, 1989.
- [24] A. Abahazem, "Etudes experimentales des decharges couronne pour la depollution des gaz", Thèse de Doctorat, Ecole doctorale de Génie Electrique, Electronique et Télécommunications, Université de Toulouse, 2009.
- [25] H. Ait Said, H. Nouri, Y. Zebboudj, "Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator", *Journal of Electrostatics* Vol.73, pp.19-25, 2015.
- [26] H. Nouri , N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, "Effect of Relative Humidity on Current-Voltage Characteristics of an Electrostatic Precipitator", *Journal of Electrostatics*. Vol. 70, N° 1, pp. 20-24, 2012.
- [27] A. M. Haddad, Warne, "Advances in high voltage engineering", IET Power and energy, KINGDOM, 2007.
- [28] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, "Effect of relative humidity on the collection efficiency of a wire-to-plane electrostatic precipitator", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Houston, 3-7 October. 2010.
- [29] H. Nouri; H. Ait-Said; Y. Zebboudj; N. Zouzou; L. Dascalescu, "Analysis of electric field and current density in an electrostatic precipitator", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* , Vol. 23, pp. 665 – 670, 2016.
- [30] K. Rouagdia, M. Nemamcha, L. Herous, L. Dascalescu, "Robust design of neutralization process of the residual electric charge on the surface of PP-films", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol.25, pp. 377-382, 2018.
- [31] C. Potvin, "Comportement et effet de la charge d'espace sur le mécanisme des vibrations induites par effet de couronne", *Mémoire d'Ingénieure*, Université de Québec, 2000.
- [32] C. Garry, M. Moreau, "Effet couronne on tension alternative", *Collection de la direction des études et recherches d'EDF*, N°. 24, Ed. EYROLLES. 1976.
- [33] M. Hamel, "influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne", *Mémoire de Magistère*, Université du Québec, 1991.
- [34] Z Al-Hamouz, M. Abdel-Salam, A Al-Shehri, "Inception voltage of corona in bipolar ionized fields- Effect on corona power loss," *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol.

- 34, pp. 57-65. 1998.
- [35] Al-hamouz, Zakariya M, "Corona Power Loss Computation in Bundled Bipolar Conductors", Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy pp. 719 - 724, 2000.
- [36] Al-hamouz, Zakariya M, "Corona Power Loss, Electric Field, and Current Density Profiles in Bundled Horizontal and Vertical Bipolar Conductors", IEEE Trans. Ind. App. Vol. 38, N°. 5, pp. 1182-1189, 2002.
- [37] CIGRE. WG 38.04 Report, "Ultra high voltage technology", CIGRE, Paris, France, 1994.
- [38] H. Daochun, R. Jiangjun, H. Feng, "Study on the Electromagnetic Environment of 1000 kV AC Double-Circuit Transmission Lines in China", IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-7, 2009.
- [39] P. N. Mikropoulos, V. N. Zagkanas, "Impulse corona inception in the coaxial cylindrical electrode arrangement in air: effects of the steepness of the applied voltage impulse corona inception in the coaxial cylindrical electrode arrangement in air: effects of the steepness", Conference: 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), South Korea, 2016.
- [40] C. S. Indulkar, Fellow, "Sensitivity Analysis of Corona and Radio Noise in EHV Transmission Lines", IE (I) Journal. EL, Vol. 84, pp. 197-200, 2004.
- [41] A. S. Mansoori, "Radio Interferences Performances in 750KV Transmission Line and 400KV Transmission Line of HVAC Transmission system by MATLAB program", International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), Vol. 2, Issue 6, pp. 1965 – 1968, 2013.
- [42] W. E. Pakala, V. L. Chartier. "Radio Noise Measurement on Overhead Power Line from 2.4 to 800 kV", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-90, N°. 3, pp. 1155 – 1165, 1971.
- [43] W. E. Pakala, E. R. Taylor, R.T. Harrold, "Radio Noise Measurements on High Voltage Lines from 2.4 to 345 kV", IEEE Trans. Electrom. Compati, Vol. 10, pp. 96-107, 1968.
- [44] J.-C. Matéo-Vélez, F. Thivet, P. Degond, "Modélisation élémentaire du vent ionique dans une décharge Couronne", 4ème Conférence de la Société Française d'Electrostatique Poitiers (France), 2004.

- [45] Y. Zhang, L. Liu, Y. Chen, J. Ouyang, "Characteristics of ionic wind in needle-to-ring corona discharge", *Journal of Electrostatics*, Vol. 74, pp.15-20, 2015.
- [46] E. Defoort, N. Benard, E. Moreau, "Ionic wind produced by an electro-aerodynamic pump based on corona and dielectric barrier discharges", *Journal of Electrostatics*, Vol. 88, pp.35-40, 2017.
- [47] J. Wang, Y. X. Cai, X. H. Li, Y. F. Shi, Y.C. Bao, J. Wang, Y. X. Shi, "Wind Development in Corona Discharge for LED Cooling", *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol. 46, Is. 5, pp.1821 -1830, 2018.
- [48] M. Farzaneh, "Effects of the intensity of precipitation and transverse wind on the corona- induced vibration of H.V. conductors", *IEEE Trans. Power Deliv.* Vol. 7, N°. 2, pp. 674 -680, 1992.
- [49] X. Li, X. Cui, T. Lu, D. Wang, R. Peng, X. Bian, "Experimental investigation on correlation of corona-induced vibration and audible noise from DC conductor", *High Voltage*, Vol. 1, pp. 115-121, 2016.
- [50] Q. Li, Simon M. Rowland, I. Dupere; R. Morris, "The impact of water droplet vibration on corona inception on conductors under 50 Hz AC fields", *IEEE Trans. Power. Deliv*, pp. 1-7, 2018.
- [51] M. Brahami, A. Gourbi, A. Tilmatine, Member, Senior, L. Dascalescu, "Numerical analysis of the induced corona vibrations on high-voltage transmission lines affected by rainfall", *IEEE Trans. Power Deliv*, Vol. 26, N°. 2, pp. 617-624, 2011.
- [52] A. Gourbi, M. Brahami, A. Tilmatine, P. Pirotte, "Numerical simulation of corona-induced vibration of high voltage conductor", *Front. Electr. Electron. Eng. China* Vol.4, pp. 335–341, 2009.
- [53] P. Yang, S. Chen, J. He, "Lightning impulse corona characteristic of 1000-kV UHV transmission lines and its influences on lightning overvoltage analysis results", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 28, N°. 4, pp. 2518–2525, 2013.
- [54] F. M. Gatta A. Geri S. Lauria M. Maccioni, "Effect of Corona and Non-Linear Tower Grounding System Modelling on Backflashover Simulation", *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, pp. 220-225, 2014.

- [55] J. Bajorek, G. Maslowski, R. Ziemia, "Identification of Corona Parameters on Overhead Power Lines in Case of Direct Lightning Strikes", Intern. Conf. H. V. Engine. Applica. ICHVE, pp. 69-72, 2010.
- [56] J. L. Naredo, P. Moreno Villalobos, A. C. Soudack, J. R. Martí, "Travelling Waves on Single Phase Lines Including Corona and Reflection Effects", ISHV-95 Conference Record, Subject 6, Paper 6789, Graz, Austria, 1995.
- [57] Astinfeshan, Sajjad, Gholami, Ahmad, Mohajeri, Mortza, "Analysis of Corona Effect on Lightning Performance of HV Overhead Transmission Line Using ATP/EMTP", 20<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering, 2012.
- [58] M. A. Freitas, S. Kurokawa, "Corona Effect in Frequency Dependent Transmission Line Models", IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. and Exposition, Latin America, pp. 1-7, 2008.
- [59] IEEE, EHV Transmission line Corona Effects. IEEE Tutorial Course. 72 CH0644- 5 PWR. New York, 1972.
- [60] C. F. Wagner, I. W. Gross, B. L. Lloyd, "High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines," AIEE Trans, Vol. 73-Pt. III. pp. 196-210, 1954.
- [61] P. S. Maruvada, H. Menemenlis, R. Malewski, "Corona Characteristic of Conductor Bundles Under Impulse Voltages", IEEE Trans. PAS, Vol. 96, N°. 1, pp.102- 115, 1977.
- [62] J. R. Marti, F. Castellanos, N. Santiago, "A Wide Bandwidth Corona Model", Proceedings PSCC, 11th Power Systems Computation Conference, France, pp. 899-905, 1993.
- [63] H. J. Ryan, H. H. Henline, "The Hysteresis Character of Corona Formation", AIEE, Trans. Power. App. Syst., Vol. 43, Pt. III, pp. 1118-1124, 1924.
- [64] H. H. Skilling, P. K. Dykes, "Distortion of Travelling Waves by Corona", AIEE, Trans. Power. App. Syst., Vol. 56, pp 850-857, 1937.
- [65] C. F. Wagner, I. W. Gross, B. L. Lloyd, "High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines", AIEE Trans., Vol. 73, Pt. III, pp. 196-210, 1954.
- [66] C. F. Wagner, B. L. Lloyd, "Effects of Corona on Traveling Waves", AIEE, Trans Vol. 74, Pt. III, pp. 858-872, 1955.
- [67] T. J. Gallagher, I. M. Dudurych, "Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines", IEE Proceedings-Generation,

- Transm. Distrib, Vol. 151, N°. 1, pp. 61-66, 2004.
- [68] K. Huang, X. Zhang, S. Tao, "Electromagnetic Transient Analysis of Overhead lines Including Corona and Frequency Dependence Effects under Damped oscillation Surges", IEEE Trans. Power Deliv., pp(99).1-1,2018.
- [69] G. Dragan, G. Florea, C.A. Nucci, M. Paolone, "On the influence of corona on lightning induced overvoltages", 30<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection – ICLP, 1499.1-1499.5, 2010.
- [70] E. M. Stafford, M.Sc., D. J. Evans, Ph.D., M.Sc., and N. G. Hingorani, Ph.D., M.Sc. Tech., "Calculation of Travelling Waves on Transmission Systems by Finite Differences", Proceedings IEE, Vol. 112, N°. 5, pp. 941-948, 1965.
- [71] J. S. Zielinski, "Examples of Travelling wave Analysis in Single-Conductor Power Lines, using Bergeron's Method", Int. J. Elect. Engng. Educ., Vol. 8, pp.401-409, 1970
- [72] L. M. Wedepohl, S. E. T. Mohamed, "Multiconductor Transmission Lines - Theory of Natural Modes and Fourier Integral Applied to Transient Analysis", Proc. IEE, Vol. 116, N°. 9, pp. 1553-1563, 1969.
- [73] P. Moreno, R. de I. Rosa, J. L. Naredo, "Frequency Domain Computations of Transmission Line Closing Transients", IEEE Trans. Power Deliv, Vol. 6, N°. 1, pp. 275-281, 1991.
- [74] Hermann W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Trans. Power. App. Syst., Vol. PAS-88, N°. 4, pp. 388-399, 1969.
- [75] A. Semlyen, A. Dabuleanu, "A System Approach to Accurate Switching Transient Calculations based on State Variable Component Modelling", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-94, pp. 572-578, 1975.
- [76] J. R. Marti, "Accurate Modelling of Frequency-dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol.PAS-101, pp. 147-157, 1982.
- [77] K. C. Lee, "Non-linear Corona Models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP)", IEEE Trans. Power. App. Syst., Vol.PAS-102, N°.9, pp. 2936-2942, 1983.
- [78] A. Semlyen, W. G. Huang, "Corona Modelling for the Calculation of Transients on Transmission Lines", IEEE Trans. Power. Deliv. Vol. PWRD-1, N°. 3, pp.

228-239, 1986.

- [79] W. G. Huang, A. Semlyen, "Computation of Electro-Magnetic Transients on Three-Phase Transmission Lines with Corona and Frequency Dependent Parameters", IEEE Trans. Power. Deliv, Vol. PWRD-2, N°. 3, pp. 887-898, 1987.
- [80] H. Hamadani. Zadeh, "Dynamic Corona Model and Frequency-Dependent Line Model for the EMTP", IREQ Report, 1986.
- [81] S. Carneiro, Hermann W. Dommel, J. R. Marti, "Efficient Implementation of Corona Models in the EMTP", 10th Power Systems Computation Conference, PSCC, 1990.
- [82] S. Carneiro, J. R. Marti, "Evaluation of Corona and Line Models in Electromagnetic Transients Simulations", IEEE Trans. Power. Deliv. Vol. 6, N°. 1, pp. 334-341, 1991.
- [83] C. Gary, G. Dragan, D. Cristescu, "Attenuation of Travelling waves caused by Corona", CIGRE Report 33-13, 1978.
- [84] M. Abdel-Salam, E. Keith Stanek, "Mathematical-Physical Model of Corona from Surges on High-Voltage Lines", IEEE Trans. Industry. App, Vol. IA-23, N°. 3, pp. 481-489, 1987.
- [85] C. Gary, D. Critescu, G. Dragan, "Distortion and Attenuation of Travelling Waves Caused by Corona", CIGRE Report, Study Committee 33: Over voltages and Insulation Coordination, 1989.
- [86] M. Afghahi, R. J. Harrington, "Charge Model for Studying Corona During Surges on Overhead Transmission Lines," IEE Proc, Vol. 130, Pt. C, N°.1, pp. 16-21, 1983.
- [87] X. R. Li, O. P. Malik, Zhi-da Zhao, "Computation of Transmission Line Transients Including Corona Effects Lines", IEEE PES Winter Meeting Paper 89 WM 109-0 PWRD, 1989.
- [88] M. Ouyang, P. G. Kendall, "Tests on Distortion and Attenuation of Waves on an Overhead Line", IEEE Trans. Power. App. Syst., Vol. PAS-94, N°. 2, pp. 498-507, 1975.
- [89] A. Inoue, "High Voltage Traveling Waves with Corona Discharge on Bundled Conductors", IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, Paper A 78 170-3, 1978.
- [90] A. Inoue, "Propagation Analysis of Overvoltage Surges with Corona Based

- upon Charge versus Voltage Curve", IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-104, N°. 3, pp. 655-660, 1985.
- [91] W. Janischewskyji, G. Gela, "Discussion to A Nonlinear Circuit Model for Transmission Lines in Corona", IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-100, N°.3, pp. 1429-1430, 1981.
- [92] N. Harid, D. M. German, R. T. Waters, "Characteristics of corona discharge under oscillatory impulse voltages", in Proc. 25th Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1990.
- [93] K. Huang, X. Zhang, S. Tao, "Electromagnetic Transient Analysis of Overhead lines Including Corona and Frequency Dependence Effects under Damped oscillation Surges", IEEE Trans. Power. Deliv. pp (99):1-1, 2018.
- [94] Z. Anane, A. Bayadi, K. Huang, "Distortion phenomena on transmission lines using corona modeling ATP/EMTP", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, Issue. 2, pp 383 - 389. 2018
- [95] T. J. Gallagher, I. M. Dudurych, "Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines", IEE Proceedings-Generation, Transm. Distrib., Vol. 151, N°. 1, pp. 61-66, 2004.
- [96] Rickard, N. Harid, R. T. Waters, "Modelling of corona at a high-voltage conductor under double exponential and oscillatory impulses", IEE Proceedings-Science, Meas. Technol., Vol. 143, N°. 5, pp. 277–284, 1996.
- [97] P. Yang, S. Chen, R. Zeng, "Lightning impulse corona characteristic of 1000 kv UHV transmission lines", Int. Symp. Light. Prot. SIPDA, N°. 2009, pp. 108-112, 2013.
- [98] Thang, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, N. Itamoto, V. A. Rakov, "FDTD simulation of direct lightning strike to a phase conductor: Influence of corona on transient voltages at the tower", Electr. Power Syst. Res., Vol. 123, pp. 128–136, 2015.
- [99] , X. Zhang, P. Yang, S. Chen, R. Zeng, "Attenuation and deformation characteristics of lightning impulse corona traveling along bundled transmission lines", Electr. Power Syst. Res., Vol. 118, pp. 29-36, 2015.
- [100] W. Gang, W. Xiao-Ping, "Corona QV characteristics under unipolar-damped oscillating impulses [substations]", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 4, N°. 6, pp. 758-762, 1997.

- [101] K. Huang, X. Zhang, "An experimental study on corona q-u curves under non-standard lightning impulses", *J. Electrostat.*, Vol. 81, pp. 37-41, 2016.
- [102] H. M. Kudyan, C. H- Shih, "A nonlinear circuit model for transmission lines in corona", *IEEE Trans. Power. App. Syst.*, Vol. PAS-100, N°. 3, pp.1420-1430, 1981.
- [103] Nucci, Carlo Alberto Guerrieri, SilvaBarros, M Teresa Correia De Barros, Rachidi, Farhad , "Influence of Corona on the Voltages Induced by Nearby Lightning on Overhead Distribution Lines", *IEEE Trans. Power. Deliv.* Vol. 15, N°. 4, pp. 1265-1273, 2000.
- [104] Wang, Jia, Wang, Xiaohui, "Lightning Transient Simulation of Transmission Lines Considering the Effects of Frequency Dependent and Impulse Corona", *Intern. Conf. Electr. Control. Engin*, pp. 696-699. 2011.
- [105] Mohamed M. SAIED, "Corona Modeling for the Transient Analysis, Steady State and Corona Loss Performance of Transmission Lines", *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal Vol. XVI, N°. 2, pp. 11-20. 2013.
- [106] C. de Jesus, M. T. Correia de Barros, "Modelling of Corona Dynamics for Surge Propagation Studies", *IEEE Trans. Power. Deliv.*, Vol. PWRD-9, N°. 3, pp. 1564-1569, 1994.
- [107] Z. Anane, "Modélisation de l'effet couronne pour l'analyse de la propagation des ondes de choc sur les lignes de transmission aériennes", *Mémoire de Magister*, université de Sétif, 2011.
- [108] M. T. Correia de Barros, M. E. Almeida, "Computation of Electromagnetic Transients on Non-uniform Transmission Lines", *IEEE Trans. Power Deliv.* Vol. 11, N°. 2, pp. 1082-1091, 1996.
- [109] A. Semlyca, H. W. Gang, "Corona modelling for the calculation of transients on transmission lines", *IEEE Trans. Power Deliv.* Vol. PWRD-1, N°. 3, pp. 228-239, 1986
- [110] F. Castellanos, "Full frequency-dependent phase-domain modeling of transmission lines and corona phenomena", *Doctoral Thesis*, University of British Columbia, 1997.
- [111] A. Haddouche, D. Djalel, A. Benretem, "Three phase line model with transient corona effect", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, pp. 47-52, 2007.

- [112] N. H. C. Santiago, A. J. S. Junqueira, C. M. Portela, A. R. Pinto, "Attenuation of Surges in Transmission Lines due to Corona Effect Three Phase Modelling", 7th International Symposium on High Voltage Engineering. 1991.
- [113] N. Santiago, F. Castellanos, "Physical Aspects of Corona Effect During Transient Overvoltages and Their Simulation with Circuit Models", Proc. IASTED. Power Syst. Engine. pp. 9-14, 1992.
- [114] M. T. Correia de Barros, "Efeito corona en line has de transporte de energia", (In portuguese), Doctoral Thesis, Instituto Superior of Tecnico, Lisboa, Portuga1, 1985.
- [115] M. Hideki, A. Akihiro, "Development of a Linear Model for Corona Wave Deformation and its Effects on Lightning Surges", Electr. Engine. in Japan, Vol. 107, N°. 2, pp 155-162, 1987.
- [116] C. Christopoulos, "Propagation of surges above the corona threshold on a line with a lossy earth return", COMPEL, Vol. 4, N°. 2, pp. 91-102, 1985.
- [117] EPRI, "Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above", Electric Power Research Institute. USA, 1975.
- [118] C. Portela, "Regimes Transitorios", (In portuguese). Vol. 2. COPPE/UFRJ. Brazil. 1983.
- [119] M. T. Correia de Barros, C. A. Nucci, F. Rachidi, "Corona on multiconductor overhead lines illuminated by LEMP", Intern. Conf. Power. Syst. Trans. pp. 429-432, 1999.
- [120] S. Carneiro, "A Comparative Study of Some Corona Models and Their Implementation in the EMTP", Trans. CEA, Engineering and Operation Division, Vol. 27, 1988.
- [121] J.L. Naredo, A.C. Soudack, J.R. Martí, "Simulation of Transients on Transmission Lines with Corona via the Method of Characteristics", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 142, N°.1, pp. 81-87, 1995.
- [122] A. Inoue. "High Voltage Travelling Waves with Corona Discharge on Bundled Conductors", IEEE PES Winter Meeting. A78, pp. 170-173. New York. 1978.
- [123] H. J. Koster, K. H. Weck, "Attenuation of Travelling Waves by Impulse Corona", CIGRE 33-18, 1981.
- [124] C. Gary, A. Timotin, D. Critescu, "Prediction of Surge Propagation Influenced by Corona and Skin Effect", Proc. IEE, 130-A, pp. 264-272, 1983.

- [125] X. Li, O. P. Malik, Z. Zhao, "A Practical Mathematical Model of Corona for Calculation of Transients on Transmission Lines", IEEE PES Summer Meeting, 88 SM, 579-5, 1988
- [126] M. M. Suliciu, I. Suliciu, "A Rate Type Constitutive Equation for the Description of the Corona Effect", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, pp. 3681-3685, 1981.
- [127] H. Hamadani. Zadeh, "Dynamic Corona Model and Frequency-Dependent Line Model for EMTP", Internal Report IREQ, Quebec, Canada, 1986.
- [128] L. Hofmann, B. R. Oswald, "Line model in the time domain considering frequency dependent parameters, leakance and corona", 14 PSCC, Sevilla, Session. 35, pp. 3, 2002
- [129] K.C. Lee, B.C. Hydro, "Non-linear corona models in an electromagnetic transients program (EMTP)", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, N°. 9, pp. 2936-2942, 1983.
- [130] J. Umoto, T. Hara, "Numerical analyzing of line equations considering corona loss on single-conductor system", J. Inst. Electr. Eng. Jpn. 89, pp. 909 - 916. 1969.
- [131] C. Gary, G. Dragan, I. Langu, "Impulse corona discharge energy around the conductors", Conference Record of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1990.
- [132] S. Carneiro, H. W. Dommel, J. R. Martí, H. M. Barros, "An Efficient Procedure for the Implementation of Corona Models in Electromagnetic Transients Programs", Paper 93SM 401-0 PWRD, IEEE Trans. on Power Deliv. Vol. 9, N°. 4, 1994.
- [133] N. Harid, "Impulse voltage testing of phase conductor models", Doctoral Thesis submitted to University of Wales College of Cardiff, U. K, 1990.
- [134] C. de Jesus, M. T. Correia de Barros, "Modelling of Corona Dynamics for Surge Propagation Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-9, N°. 3, pp. 1564-1569, 1994.
- [135] H.W. Dommel, "Electro-Magnetic transients program (EMTP Theory Book)", BPA, Portland. USA, 1986.
- [136] X. Li, O. P. Malik, Z. Zhao, "A practical mathematical model of corona for calculation of transients on transmission lines", IEEE Trans. Power Deliv. Vol.

- 4, N°2, pp. 1145-1149, 1989.
- [137] J.J. Clade, C.H. Gary, C.A. Lefevre, "Calculation of Corona Losses Beyond the Critical Gradient in Alternating Voltage", IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-88, pp. 695-703, 1969.
- [138] A. Gherbi, "influence de l'effet couronne sur les surtensions de choc dans les lignes de transmission de l'énergie électrique", Mémoire de Magister, Université de Sétif, 1995.
- [139] Z. Anane, A. Bayadi, N. Harid, "A dynamic corona model for EMTP computation of multiple and non-standard impulses on transmission lines using a type-94 circuit component", Electric Power Systems Research, Vol. 163, pp. 133-139, 2018.
- [140] A. Budner, "Introduction of Frequency Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp. 88-97, 1970.
- [141] J. K. Snelson, "Propagation of Travelling Waves on Transmission Lines-Frequency Dependent Parameters", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp. 85-91, 1972.
- [142] L. Martí, "Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency-Dependent Modal Transformation Matrices", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 3, N° 3, pp. 1099-1110, 1988.
- [143] B. Gustavsen, A. Semlyen, "Combined Phase Domain and Modal Domain Calculation of Transmission Line Transients Based on Vector Fitting", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 13, N° 2, pp. 596-604, 1998.
- [144] F. Castellanos, J. R. Martí, "Full Frequency-Dependent Phase-Domain Transmission Line Model", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 12, N° 3, pp. 1331-1339, 1997.
- [145] F. Castellanos, J. R. Martí, "Phase Domain Multiphase Transmission Line Models", Proc. Intern. Conf. Power Syst. Trans, pp. 17-22, Lisbon, Portugal, 1995.
- [146] F. J. Marcano, "Modeling of Transmission Lines Using Idempotent Decomposition", Doctorate Thesis, Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1996.

- [147] F. J. Marcano, J. R. Martí, "Idempotent Line Model: Case Studies», Proc. Intern. Conf. Power Syst. Trans., pp. Seattle, Washington, 1997.
- [148] H. V. Nguyen, H. W. Dommel, J. R. Martí, "Direct Phase-Domain Modelling of Frequency-Dependent Overhead Transmission Lines", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 12, N°. 3, pp. 1335-1342, 1997.
- [149] L.M. Wedepohl, "Theory of Natural Modes in Multiconductor Transmission Lines", Lecture Notes for Course ELEC-552, The University of British Columbia, 1982.
- [150] A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi, "A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables", IEEE Trans. on Power Deliv. Vol. 14, N°. 3, pp. 1032-1037, 1999.
- [151] T. Noda, N. Nagaoka, A. Ametani, "Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 11, N°. 1, pp. 401-411, 1996.
- [152] A. Semlyen, "Some Frequency Domain Aspects of Wave Propagation on Non-uniform Lines", IEEE Trans. Power Deliv. 2003.
- [153] Sonelgaz, "Pylônes", Cahier de charge, 2004.
- [154] C. A. Jordan, "Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires", Gen. Elec. Rev., Vol. 37, 1934.
- [155] C. F. Wagner, A. R. Hileman, "A new approach to calculation of lightning performance of transmission lines III – A simplified method: Stroke to tower", AIEE Trans. Power App. Syst., Vol. 79, pp. 589-603, 1960.
- [156] M. A. Sargent, M. Darveniza, "Tower surge impedance", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-88, N°. 5, pp. 680-687, 1969.
- [157] IEEE Working Group, "A Simplified method for estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-104, N°. 4, pp. 919-932, 1985.
- [158] C. Menemenlis, Z. T. Chun, "Wave propagation on nonuniform lines", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-101, N°. 4, pp 833-839, 1982.
- [159] W. A. Chisholm, Y. L. Chow, K. D. Srivastava "Travel time of transmission towers", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-104, N°. 10, pp. 2922-2928, 1985.

- [160] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, "IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines", Proposed IEEE P1243 draft, 1996.
- [161] T. Hara, O. Yamamoto, "Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis", IEE Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, N°. 3, pp. 283-289, 1996.
- [162] M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 6, N°. 3, 1991.
- [163] T. Yamada, A. Mochizuki ; J. Sawada ; E. Zaima ; T. Kawamura ; A. Ametani ; M. Ishii ; S. Kato , " Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10 , 1995.
- [164] Horacio Torres, Diego Gonzàles, "Design and Construction of a Distribution Transformer for Tropical Zones With High Lightning Activity", 25th Intern. Conf. Lightning Protection, Vol. B, pp. 599-605, Greece, 2000.
- [165] C. Menemenlis , Z. T. Chun, "Wave Propagation on Nonuniform Lines", IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-101, N°. 4, pp. 833-839, 1982.
- [166] Pantelis N. Mikropoulos , Thomas E. Tsovilis, Zacharias G. Datsios and Nikos C. Mavrikakis, "Effects of Simulation Models of Overhead Transmission Line Basic Components on Backflashover Surges Impinging on GIS Substations", 46th International Universities Power Engineering Conference , UPEC2010.
- [167] E. E. Oettle, "A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 3, N°. 4, pp 2020-2029, 1988.
- [168] E. A. Oufi, A. S. Alfuhaid, M. M. Saied, "Transient Analysis of Lossless Single-phase Nonuniform Transmission Lines", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 9, N°. 3, p.1694-1700, 1994.
- [169] J. A. M-Velasco, F. C. Aranda, "Parametric Analysis of the Lightning Performance of Overhead Transmission Lines Using an Electromagnetic Transients Program", Intern. Conf. Power Syst. Trans. New Orleans, USA, 2003
- [170] J. A. M-Velasco, F. C. Aranda, "Modeling of Overhead Transmission Lines for Lightning Studies", Intern. Conf. Power Syst. Trans. Montreal, Canada, N°. IPST05 – 047, pp. 1-6, 2005.
- [171] C. J. C- Teixeira, A. M-Moura, "Study of the Backflashover Phenomena in

- Overhead Transmission Lines using the EMTP”, IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Exposition Latin America, Venezuela, pp. 1-5, 2006.
- [172] Y. A. Wahab, Z. Z. Abidin, S. Sadovic, "Line Surge Arrester Application on the Quadruple Circuit Transmission Line”, IEEE Bologna Power Tech Conf. 2003.
- [173] W. A. Chisholm, W. Janischewskyj, "Lightning surge response of ground electrodes”, IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 4, N°. 2, pp. 1329-1337, 1989.
- [174] CIGRE Working Group 33.01, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”, Technical Bulletin 63, 1991.
- [175] P. Chowdhuri, "Grounding for protection against lightning”, in Electromagnetic transients in power systems. Research Studies Press Ltd., John Wiley & sons inc., New York, pp. 104-113. 1996.
- [176] A. V. Korsuntchev, "Application of the theory of similitude to the calculation of concentrated earth electrodes», *Electrichestvo*, N°.5, pp.31-35, 1958.
- [177] Y. Yasuda, Y. Hirakawa, K. Shiraishi, T. Hara, "Sensitivity analysis on grounding models for 500kV transmission lines”, *Trans.IEE Japan B*, Vol. 121, N°. 10, pp. 1386–1393, 2001.
- [178] M. Z. A. Ab Kadir, J. Sardi, W. F. Wan Ahmad, H. Hizam, J. Jasni, "Evaluation of a 132 kV Transmission Line Performance via Transient Modelling Approach”, *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, Vol.29 N°.4, pp. 533-539, 2009
- [179] T. Toledo, "Modélisation des isolations axisymétriques basées sur l’utilisation des matériaux semi-conducteurs par couplage des éléments finis et des éléments de frontière”, *Thèse de Doctorat, Université de Lyon*, 2004.
- [180] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Estimation of the minimum shielding failure flashover current for first and subsequent lightning strokes to overhead transmission lines”, *Electric Power Systems Research* Vol. 113, pp. 141–150. 2014.
- [181] C. F. Wagner, A. R. Hileman, "Mechanism of breakdown of laboratory gaps”, *Trans. AIEE Pt III. Power App. Syst.*, Vol. 80, N°. 3, pp. 604-618, 1961.
- [182] T. Shindo, T. Suzuki, "A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps”, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-104, N°. 6, pp. 1556-1563, 1985.
- [183] CIGRE Working Group 33.01, "Guide to procedures for estimating the

- lightning performance of transmission lines”, Technical Brochure 63, 1991.
- [184] A. Pignini, G. Rizzi, E. Garbagnati, A. Porrino, G. Baldo, G. Pesavento, "Performance of large air gaps under lightning overvoltages: Experimental study and analysis of accuracy of predetermination methods", IEEE Trans. Power Del., Vol. 4, N°. 2, pp. 1379-1392, 1989.
- [185] H. Motoyama, "Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulse”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 11, N°. 2, pp. 972-979, 1996.
- [186] T. Mozumi, Y. Baba, M. Ishii, N. Nagaoka, A. Ametani, "Numerical electromagnetic field analysis of archn voltages during back-flashover on a 500-kV twin-circuit line", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, N°. 1, pp. 207-213, 2003.
- [187] X. Wang, Z. Yu, J. He, "Breakdown process experiments of 110- to 500-kV insulator strings under short tail lightning impulse”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 29, Iss. 5, pp. 2394 - 2401, 2014.
- [188] CIGRE Working Group 33.01, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”, Technical Brochure 63, 1991.
- [189] LAGRANJA, "Catalogue sur les isolateurs en verre, usine, 2000.
- [190] J.A. Morales, Z. Anane, R.J. Cabral, "Automatic lightning stroke location on transmission lines using data mining and synchronized initial travelling”, Electric Power Systems Research, Vol. 163, pp. 547–558, 2018.
- [191] C. Garry, "La foudre dans les propriétés diélectriques de l’air et les très haute tensions”, Ed. EDF, Eyrolles. (Paris), pp. 92-229, 1984.
- [192] F. Heidler, "Calculation of Lightning Current Parameters”, IEEE Trans. Power Deliv. Vol.14, N°. 2, pp. 399- 404, 1999.
- [193] Nucci, C. A. Guerrieri, S. Barros, M Teresa C. De Barros, Rachidi, Farhad, "Influence of Corona on the Voltages Induced by Nearby Lightning on Overhead Distribution Lines”, IEEE Trans. Power Deliv, Vol. 15, N°. 4, pp. 1265-1273 2000.

## ملخص:

أغلبية أقسام هذه الأطروحة تهتم بدراسة وتحليل ظاهرة الكورونا (الإكليل أو الحلقة أو الهالة) التي تظهر نتيجة للجهد الزائد على مستوى خطوط نقل الطاقة الكهربائية. لأسباب قد تكون خارجية مثل حدوث الصواعق الكهربائية أو داخلية مثل الأعطاب، وهذا ما أدى بنا إلى تقسيم هذا العمل إلى جزأين أساسيين يمكن تلخيصهما كما يلي:

**الجزء الأول:** تمثل الصاعقة الكهربائية أهم خطر كهربائي على مستوى شبكة خطوط النقل الكهربائية حيث تبلغ سعة تيارها حتى 200kA في بضع ثوان. مما يؤدي إلى حدوث الجهد الزائد على خطوط النقل وبالتالي حدوث ظاهرة الكورونا. حيث قمنا بعمل نموذج رياضي ديناميكي والذي يتماشى مع كل أشكال النواقل الكهربائية وكذا معظم أنواع أمواج الجهد الزائد المطبق مثل: الأمواج ذات النبض الأسي و الأسي المضاعف وكذا التذبذبية. فيعتبر عمل نموذج لهذه الظاهرة في برنامج الطواهر الكهرومغناطيسية العابرة ATP/EMTP ميزة هذا الجزء ومدخل مهم للجزء الثاني من هذا العمل.

**الجزء الثاني:** بعد تطوير وتمثيل ظاهرة الكورونا بنموذج ديناميكي في برنامج ATP/EMTP قمنا بإعادة إدخاله في عنصر غير خطي ملحق بلغة MODELS في برنامج ATP/EMTP من أجل إدماجه في خطوط النقل للطاقة الكهربائية وكان ذلك بغرض تحليل تنقل أمواج الجهد العالي على مستوى هذه الخطوط حيث أثبتت الدراسة فعالية النموذج الديناميكي المعتمد للكورونا ودوره المهم في تخميد وتشويه أمواج الجهد الزائد على خطوط النقل وبالتالي حماية باقي أجزاء الشبكة من خطر الجهد الزائد.

**الكلمات المفتاحية:** فرط التوتر، ظاهرة الهالة، النموذج الديناميكي، MODELS, EMTP, خط النقل، التوهين والتشويه.

## Résumé

La majorité des sections de cette thèse concerne par l'étude et l'analyse du phénomène couronne (ou corona) qui apparaissent à la suite des surtensions au niveau des lignes de transport d'énergie électrique, pour des raisons peut être externe, comme l'apparition de la foudre électrique ou interne, comme les défauts, ce qui est nous a conduit à diviser le travail en deux grandes parties qui peuvent être résumé comme suit: **Partie I:** La foudre représente le risque électrique le plus important au niveau de réseau des lignes de transmission électrique où sa valeur de crête peut atteindre jusqu'à 200 kA en quelques secondes, ce qui conduit à l'apparition d'une surtension sur les lignes de transmission et donc un phénomène couronne se produit. Nous avons fait un modèle mathématique dynamique, ce qui est conforme à toutes configurations des conducteurs électriques, ainsi que la plupart des formes d'ondes de surtension appliquées, telles que: les ondes exponentielles, multiples et oscillatoires. Un modèle de ce phénomène dans le programme ATP / EMTP est l'avantage de cette partie et un apport important à la deuxième partie de ce travail.

**Partie II:** Après le développement et la représentation du phénomène couronne par un modèle dynamique dans le programme ATP / EMTP, nous avons de l'entrée de nouveau dans un élément non-linéaire additionné au langage MODELES dans le programme ATP / EMTP pour l'intégration dans les lignes de transport d'énergie électrique, et qui était dans le but d'analyser la propagation des ondes de surtensions niveau de ces lignes, où l'étude a prouvé l'efficacité du modèle dynamique de l'effet couronne approuvé et son rôle important dans l'atténuation et la distorsion des ondes de surtension sur les lignes de transmission et ainsi protéger le reste des parties du réseau au risque de ces surtensions.

**Mots clés :** Surtensions, Effet couronne, EMTP, MODELS, Ligne de transmission, Atténuation et déformation.

## Abstract:

The majority of the sections of this thesis concerned with the study and analysis of corona phenomenon that appear as a result of overvoltages on electric power lines level, for reasons may be external, such as the appearance of lightning strike or internal, such as the faults, which is led us to divide this work into two major parts which can be summarized as follows:

**Part I:** Lightning is the most important electrical risk at level of power transmission lines network where its peak value can reach up to 200 kA in a few seconds, leading to the occurrence of a surge on transmission lines and therefore a corona phenomenon occurs, where we made a dynamic mathematical model, which is consistent with all configurations of electrical conductors, as well as most applied surge waveforms, such as: exponential waves, multiple and oscillatory impulses. A modeling of this phenomenon in the electromagnetic transients program ATP / EMTP is the advantage of this part and an important contribution to the second part of this work.

**Part II:** After the development and the representation of the corona phenomenon by a dynamic model in the ATP / EMTP program, we have entered it again into a nonlinear element of the MODELES language in the ATP / EMTP program for the integration into power transmission lines, and that was in order to analyze the propagation of surge waves at the level of these lines, where the study proved the effectiveness of the dynamic model of the approved corona effect and its important role in the attenuation and distortion of surge waves on the transmission lines and thus protect the rest of the network parts from the risk of these overvoltage's.

**Key words:** Overvoltages, Corona effect, MODELS, EMTP, Transmission line, Attenuation and deformation.