

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيادة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté des sciences et de la Technologie

Département d'Electrotechnique et d'Automatique



## **MEMOIRE**

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En :** Électrotechnique

**Spécialité :** Réseaux Électriques

**Par :** Mouedden Djillali

Mostefai Ahmed Nour Al islem

**Sujet**

**Etude des perturbations EM générées par l'interaction d'un  
coup de foudre avec une éolienne**

Soutenue publiquement en /06/2025 devant le jury composé de :

<b>Dr. BEKRI Oum el Fadhel Loubaba</b>	MCA	Univ. Saida	Président
<b>Dr. ARZAG Kaddour</b>	MCA	Univ. Saida	Rapporteur
<b>Pr. Mankour Mohamed</b>	Prof	Univ. Saida	Examineur

# Remerciement

*Le plus grand Merci tout d'abord revient à «ALLAH » qui, lui seul, nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous a donné le courage, et la force pour élaborer ce travail de recherche*

*Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à tous les professeurs et enseignants qui ont contribué à notre formation scientifique et éducative tout au long de nos années d'études, et qui ont été pour nous des phares de savoir et des modèles à suivre.*

*Nous tenons à mentionner tout particulièrement notre encadrant, Dr. ARZAG KADDOUR pour ses orientations et ses remarques précieuses tout au long de la préparation de ce mémoire. Nous lui exprimons toute notre gratitude et notre estime.*

*Nous adressons également nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt et l'estime qu'ils ont manifestés à l'égard de notre travail, ce qui s'est traduit par leur aimable accord à l'évaluer.*

*Enfin, nos remerciements vont à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué au développement et à l'élaboration de ce modeste travail, ainsi qu'à leur bienveillance.*

# Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*Nos familles Mouedden et Moustefai, qui ont été à l'origine de notre réussite grâce à leurs précieux conseils.*

*À tous les enseignants et le personnel du département d'électromécanique qui nous ont grandement soutenus tout au long de nos années d'études.*

*Et à la promotion*

*Master électromécanique 2025*

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<i>Chapitre I: Phénoménologie de foudre</i>	
I.1 Introduction.....	2
I.2 La foudre à travers l’histoire .....	2
I.3 Physique du Phénomène Orageux .....	2
I.3.1 Nuages Orageux .....	2
I.3.2 Electrification du Nuage Orageux .....	3
I.4 Phénomène naturel dit « la foudre » .....	4
I.4.1 Foudre, Éclair et Tonnerre .....	4
I.4.2 Différents types de décharges de foudre .....	4
I.4.3 Classification des décharges nuage-sol .....	5
I.5 Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés .....	8
I.5.1 Courant de l’arc en retour .....	8
I.5.2 Différentes caractéristiques et données expérimentales .....	8
I.5.3 Mesure du courant d’arc en retour en utilisant des tours instrumentées	8
I.5.4 Foudre déclenchée artificiellement.....	12
I.6 Caractérisation du champ électromagnétique générée par la foudre.....	13
I.7 Caractéristiques de l'occurrence de la foudre / systèmes de .....	16
I.7.1 Localisation de la foudre .....	16
I.8 Effets de la foudre .....	16
I.8.1 Effets électriques .....	16
I.8.2 Effets thermiques .....	17
I.8.3 Effets Électrodynamiques .....	17
I.8.4 Effets électrochimiques .....	18
I.8.5 Effets liés aux champs électromagnétiques .....	18
I.9 Conclusion .....	18
<i>Chapitre II : Généralité sur les éoliennes</i>	
II.1 Introduction .....	19
II.2 L'énergie éolienne à travers l'histoire .....	19

II.3 Production éolienne .....	20
II.4 Définition de l'énergie éolienne.....	20
II.5 Direction et vitesse du vent. ....	21
II.6 Aérogénérateur .....	22
II.6.1 Principaux composants d'une éolienne .....	23
II.6.2 Types d'aérogénérateurs .....	24
II.7 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation .....	26
II.7.1 Vitesse Fixe .....	26
II.7.2 Vitesse Variable .....	26
II.8 Transformation de l'énergie du vent en électricité .....	27
II.9 Domaine de fonctionnement d'une éolienne .....	27
II.10 Application des éoliennes .....	28
II.11 Conclusion .....	29

***Chapitre III : Modélisation et simulation du champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne***

III.1 Introduction.....	30
III.2 Classification des modèles du courant de l'arc en retour.....	30
III.3 Distribution du courant de foudre dans les modèles d'ingénieur.....	31
III.3.1 Géométrie du problème.....	31
III.3.2 Représentation générale des modèles d'ingénieur.....	32
III.4 Courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre.....	33
III.4.1 Le modèle bi-exponentiel.....	33
III.4.2 Modèle d'Heidler.....	36
III.4.3 Modèle hybride .....	39
III.5 Extension des modèles d'ingénieur pour prendre en compte les objets élevés (cas des tours).....	40
III.5.1 Modèle de Rachidi.....	40
III.5.2 Modèle de Baba et Rakov.....	41
III.6 Champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour.....	42
III.7 Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).....	43
III.7.1 Origine de la FDTD.....	43
III.7.2 L'algorithme de Yee .....	44
III.7.3 Principe de la méthode FDTD.....	45

III.7.4 FDTD-3D en coordonnées cartésiennes.....	47
III.7.5 Critère de stabilité de la méthode FDTD.....	50
III.7.6 Conditions aux limites.....	51
III.7.7 Conditions aux limites UPML de Taflove.....	51
III.8 Application de la méthode FDTD pour le calcul du champ électromagnétique de la foudre tombant sur une éolienne.....	54
III.9 Conclusion.....	60
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>61</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>63</b>

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

L'énergie éolienne s'impose comme l'une des principales sources d'énergie propre et durable, bénéficiant d'un intérêt mondial croissant. Cependant, malgré ses avantages environnementaux et économiques, l'énergie éolienne fait face à des défis techniques notables, notamment l'exposition des turbines aux impacts de la foudre un phénomène naturel imprévisible et potentiellement destructeur, qui nécessite une étude approfondie de ses effets.

Les décharges électriques dues à l'interaction entre la foudre et les tours des éoliennes génèrent des champs électromagnétiques puissants qui affectent la compatibilité électromagnétique des systèmes, causant parfois des dommages ou des dysfonctionnements dans les équipements électriques et électroniques.

L'étude de ce phénomène physique exige le développement de modèles mathématiques précis permettant d'extraire les caractéristiques liées au courant et au champ de la foudre.

A cet effet nous nous intéressons dans cette modeste étude à la présentation, la modélisation et la simulation des différents aspects liés au phénomène naturel dit la foudre.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres principaux :

*Chapitre I* : « Phénoménologie de la foudre », qui explore les propriétés physiques de la foudre, les conditions de son apparition et les caractéristiques des courants qu'elle génère.

*Chapitre II* : « généralités sur les éoliennes », qui retrace l'évolution de cette source d'énergie et présente les différents types de turbines.

*Chapitre III* : « Modélisation et simulation du champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne », qui traite de l'interaction entre la foudre et les pales des tours éoliennes du point de vue du champ rayonné. Il s'appuie sur le modèle de *Babà-Rakov*, pour simuler le courant de retour le long du canal de foudre et de la tour, ainsi que sur la méthode FDTD-3D pour analyser la propagation du champ électromagnétique.

L'étude se conclut par une synthèse des résultats obtenus, accompagnée de perspectives de recherche futures dans ce domaine crucial.

# **Chapitre I**

## **Phénoménologie de la foudre**

## **I.1 Introduction**

La foudre est un phénomène naturel qui se produit à la suite d'une décharge électrique soudaine lorsque des charges électrostatiques s'accumulent entre le nuage orageux et la terre. Le danger que ce phénomène apporte pour les différents systèmes électriques, électroniques et de télécommunication qui sont placés sur la terre a forcé les spécialistes à l'étudier afin de limiter ces dégâts.

L'objectif de ce chapitre est de fournir un aperçu général du phénomène naturel dit «la foudre », en mettant l'accent sur la décharge électrique entre le nuage et la terre lors de la phase d'arc en retour.

Enfin, nous présentons une observation expérimentale des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés. Ces observations aident à mieux comprendre les phénomènes liés à la foudre et son impact sur l'environnement électromagnétique.

## **I.2 La foudre à travers l'histoire**

Depuis l'Antiquité, la foudre était considérée comme un symbole de la colère des dieux, et l'homme l'interprétait comme un châtiment pour les péchés. Au VIIe siècle, des scientifiques tels que *Descartes* et *Boerhaave* ont commencé à proposer des théories physiques pour expliquer ces phénomènes. Au XVIIIe siècle, la compréhension scientifique de la foudre a évolué grâce à l'expérience célèbre de *Benjamin Franklin*, et avec les progrès scientifiques du XXe siècle, de nombreux secrets de la foudre ont été révélés [1].

## **I.3 Physique du Phénomène Orageux**

### **I.3.1 Nuages Orageux**

Les nuages d'orage sont des nuages massifs composés de gouttes d'eau et de cristaux de glace, formés par des courants d'air ascendants. Il existe deux types de tempêtes : les tempêtes thermiques, qui sont locales et de courte durée, et les tempêtes frontales, qui se produisent en raison de la rencontre de masses d'air avec des conditions différentes, durent plus longtemps et sont plus violentes [2].

### I.3.2 Electrification du Nuage Orageux

Les vents ascendants provoquent un frottement des particules dans l'air, ce qui entraîne l'accumulation de charges statiques à l'intérieur du nuage. Ainsi, les particules les plus légères, chargées positivement, montent vers le haut, tandis que les particules plus lourdes, chargées négativement, descendent vers le bas. La figure (I.1) montre la distribution des charges électriques dans le nuage orageux et le champ électrique au sol. Lorsque l'intensité du champ électrique atteint entre -10 et -15 kV/m, la probabilité d'un déchargement électrique vers le sol augmente, ce qui peut indiquer la possibilité d'un éclair [3].

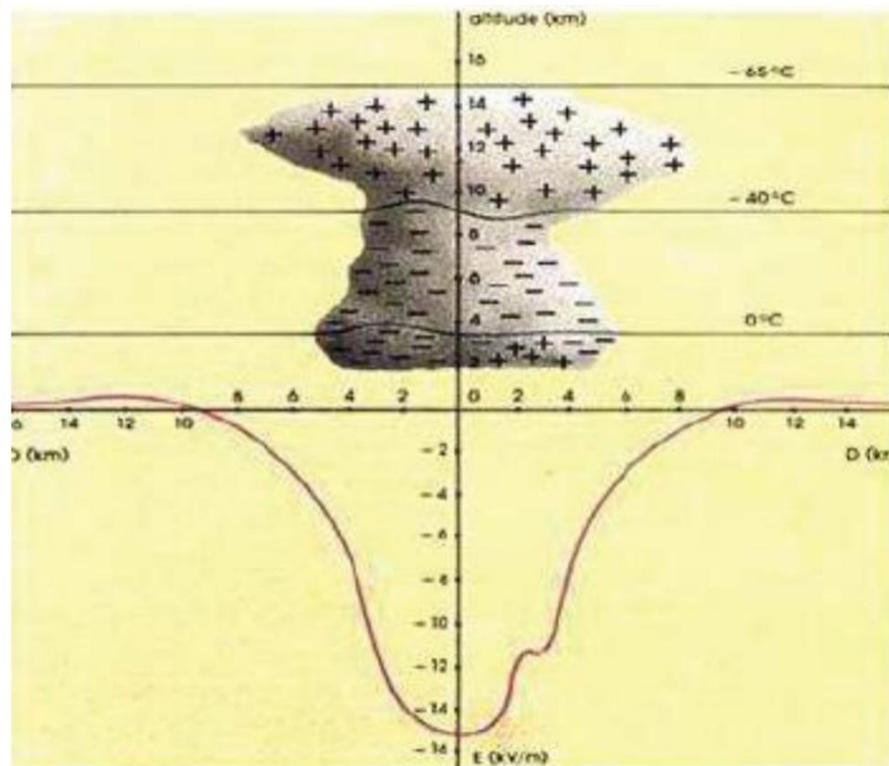


Figure I-1 Séparation des charges électriques à l'intérieur du nuage orageux. [4]

## I.4 Phénomène naturel dit « la foudre »

### I.4.1 Foudre, Éclair et Tonnerre

L'éclair est défini comme une décharge électrostatique qui se produit par l'accumulation de l'électricité statique soit dans le nuage lui-même, soit entre deux nuages orageux ou entre un nuage et le sol [4]. La décharge électrique lors d'un orage génère le bruit du tonnerre, qui résulte de l'onde de choc causée par l'expansion soudaine de l'air en raison de l'augmentation de la température dans le canal de la foudre. L'onde sonore se propage à une vitesse d'environ 330 m/s. En raison de la vitesse élevée de la lumière par rapport à celle du son, l'observateur voit d'abord l'éclair avant d'entendre le tonnerre [4].

### I.4.2 Différents types de décharges de foudre

Les décharges électriques liées au phénomène de la foudre se divisent en trois types : le premier se produit à l'intérieur du nuage (intra-nuage), le second type est celui qui manifeste entre différents nuages (inter-nuage), tandis que le troisième est l'éclair qui provient des nuages orageux dit « cumulonimbus » et se dirige vers le sol (nuage-sol). Elles sont distinguées en fonction du type de courant et de sa direction. [2]

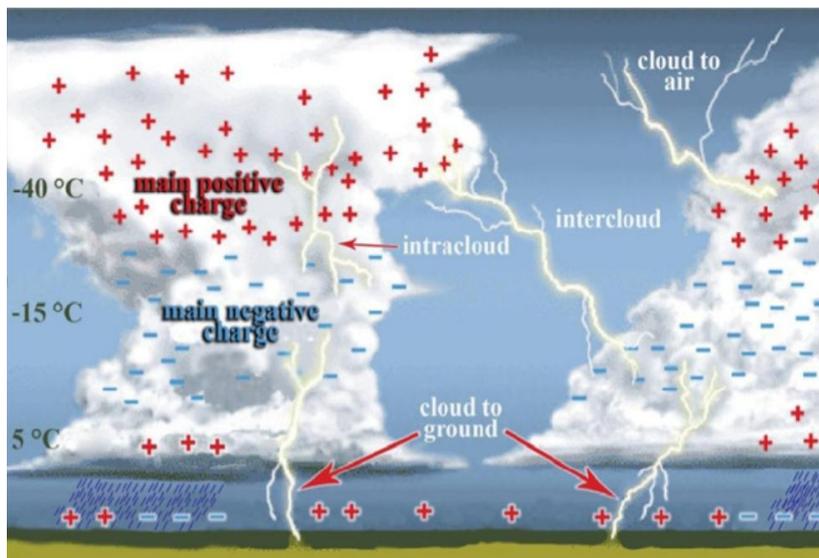


Figure I-2 Différents types de décharges électriques [5].

La figure I.2 présente les différents types des décharges électriques de la foudre cités précédemment. Le type le plus étudié est celui présenté par une décharge nuage-sol. Ainsi, pour ce type, les charges positives se trouvent dans le sol et les charges négatives à la base des nuages. Les décharges qui atteignent le sol représentent 25% de l'activité électrique totale, tandis que les 75% restants sont des décharges non reliées au sol [5].

### I.4.3 Classification des décharges nuage-sol

Dans la figure I.3, *Dwyer et Uman* expliquent la propagation de quatre trajectoires de courant qui établissent une connexion à la terre lors du décharge électrique, avec des différences dans la direction et le signe du courant. Les éclairs entre les nuages et le sol sont classés en quatre catégories distinctes, à savoir [5] :

- ⚡ coup de foudre descendant négative,
- ⚡ coup de foudre descendant positive,
- ⚡ coup de foudre ascendant négative,
- ⚡ coup de foudre ascendant positif,

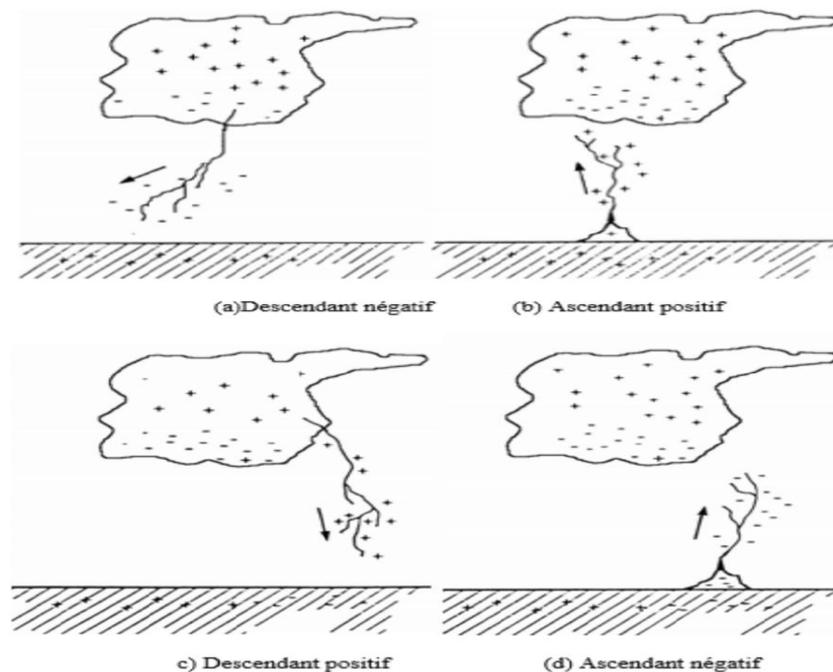
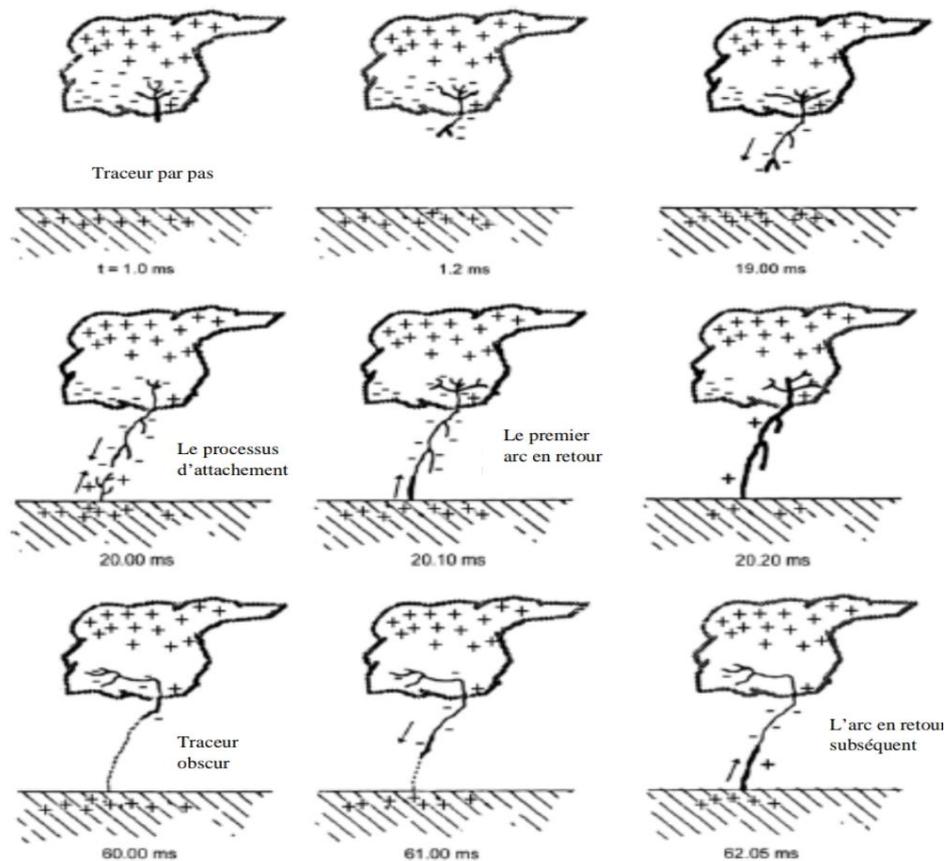


Figure I-3 Quatre types de formation des éclairs entre les nuages et le sol [5].

La figure I.4 explique le déplacement de la charge négative du nuage vers le sol à travers une série de sauts successifs à grande vitesse, ce qui augmente le champ électrique et conduit à la formation d'une marque ascendante positive à la surface du sol. Les deux marques sont reliées par un canal ionisé, permettant le passage d'un courant de foudre rapide.



**Figure I-4** Étapes de la foudre négative, du nuage au sol [5]

Après le premier coup de foudre, l'éclair peut disparaître, mais si des charges résiduelles restent au sommet du canal, un "leader sombre" se forme, se déplaçant à une vitesse de  $3 \cdot 10^6$  m/s, portant une charge d'environ 1 coulomb et un courant de 1 kA. Entre la fin du premier coup de foudre et le début du leader sombre, des activités électriques se produisent. Le leader sombre déclenche ensuite les coups de foudre subséquents, qui sont généralement plus rapides dans leur montée que le premier coup. Plusieurs coups de foudre peuvent se produire, pouvant atteindre jusqu'à 15 coups. Enfin,

le dernier coup de foudre provoque un courant puissant d'environ 100 A pour dissiper la charge résiduelle de la cellule orageuse [6].

Le coup de foudre nuage-sol positif est rare et plus puissant, généralement observé à la fin de la vie d'une cellule orageuse, et est lié à des phénomènes météorologiques intenses comme la grêle [6].

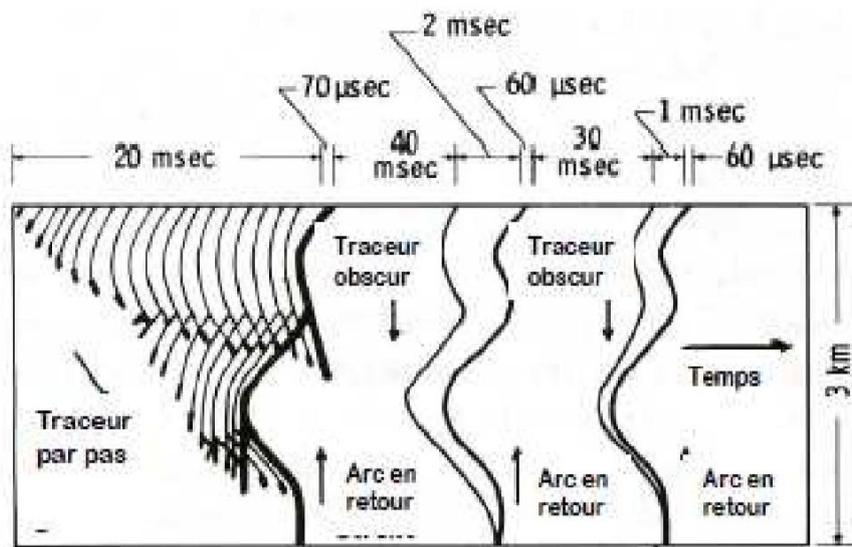


Figure I-5 : Séquence traceur descendant-arc en retour dans un éclair [6].



Figure I-6 : Un éclair contenant 12 arcs de retour [6]

La figure I-5 présente les différentes étapes concernant la séquence traceur-arc en retour, tandis que la figure I-6 montre une photographie d'un éclair de coup de foudre ayant 12 arcs.

## **I.5 Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés**

### **I.5.1 Courant de l'arc en retour**

Les paramètres utilisés pour mesurer la foudre incluent l'amplitude du courant, la dérivée maximale du courant et le taux moyen d'augmentation du courant, basés sur les mesures effectuées par *Berger* et son équipe en Suisse, et qui ont été adoptées par les normes de protection contre la foudre. Le courant a également été mesuré à l'aide de tours instrumentées en Russie, en Afrique du Sud et au Japon au cours des 20 dernières années. Pour mesurer directement le courant du coup de foudre jusqu'à la base du canal de foudre, il est nécessaire de connaître le point d'impact de la foudre [7].

### **I.5.2 Différentes caractéristiques et données expérimentales**

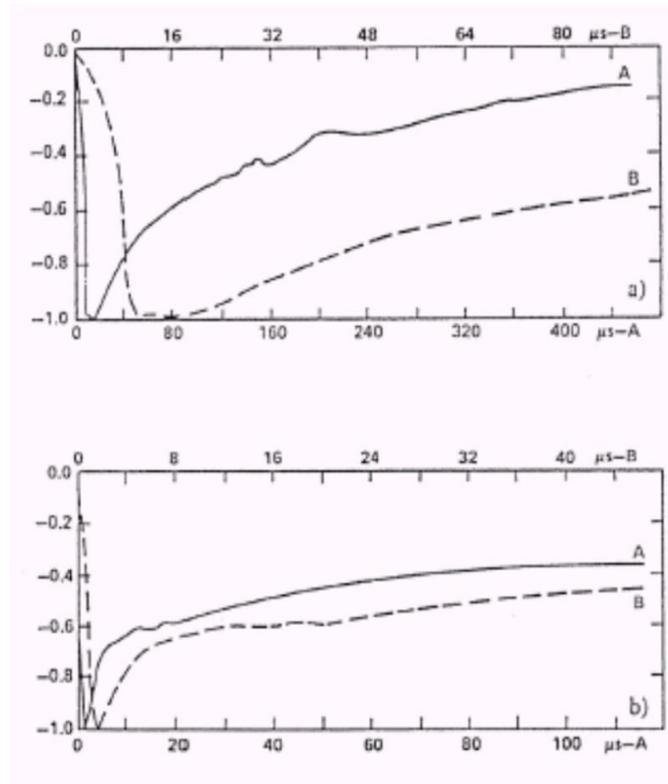
Les mesures incluent le courant à la base du canal, la vitesse de l'arc en retour et le champ électromagnétique généré, et concernent à la fois les coups de foudre naturels et artificiels.

### **I.5.3 Mesure du courant d'arc en retour en utilisant des tours instrumentées**

#### ***a. Tours de petite taille:*** moins de 100 m

Les recherches menées par l'équipe du professeur *Berger* entre 1950 et 1980 sur le courant électrique mesuré à la base du canal de foudre sont effectuées au sommet du Monte San Salvatore en Suisse. Les données ont été collectées à partir de deux tours de 55 mètres de hauteur, où la majorité des décharges observées étaient dues à des leaders ascendants. La figure I.7 présente les courants typiques d'une décharge négative, avec une accélération rapide du courant lors du coup de foudre subséquent. Une distribution

statistique des principaux paramètres du courant a également été fournie, basée sur le rapport de *Uman* [6].



**Figure I-7** : Forme moyenne normalisée des courants d'arcs en retour premier et subséquent (A) premier arc en retour, (B) arc en retour subséquent [6].

### **b. Tours élevées (plus de 100 m)**

#### **✓ tour d'Ostankino à Moscow**

Une tour de 540 mètres de hauteur, le courant est mesuré en trois endroits différents : à 47 mètres, 272 mètres et 533 mètres (figure I.8). Il a été observé que la forme du courant varie en fonction de l'emplacement, la valeur du pic du courant augmentant à mesure que l'on descend du sommet de la tour vers sa base. Selon Bermudez ce changement est dû aux réflexions multiples de l'onde de courant au sommet et à la base de la tour [8].

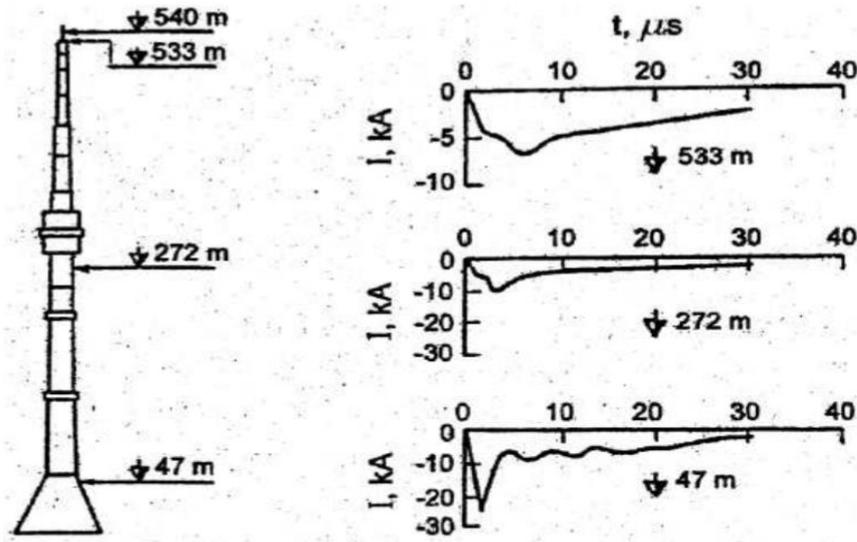


Figure I-8 : Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d’Ostankino, Moscow [8].

✓ La tour CN à Toronto au Canada

La tour CN est l'une des plus hautes tours du monde, avec une hauteur de 553 mètres (figure I.9). Le courant électrique a été mesuré à des hauteurs de 474 mètres et 509 mètres. Les mesures effectuées en 1999 sont présentées dans la figure I.10 [9].



Figure I-7 : Tour CN à Toronto, Canada [9].

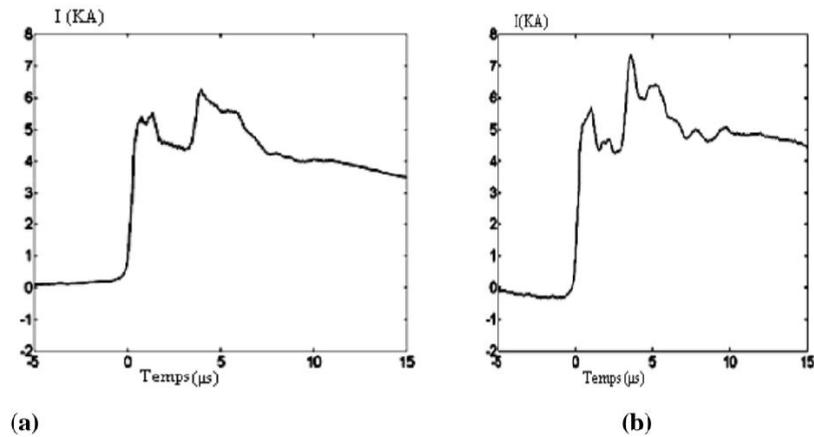


Figure I-10 : Représentation temporelle du courant d’arc en retour mesuré à [9]  
 (a) 509 m et  
 (b) 474 m

✓ *Tour Peissenberg en Allemagne*

La tour de Peissenberg (figure I-11(a)) est caractérisée par une hauteur de 168 mètres, a permet d’obtenir des mesures du courant électrique à des hauteurs de 167 mètres et 13 mètres, montrant clairement les variations temporelles du courant et les multiples réflexions (figure I-11(b)) [9].

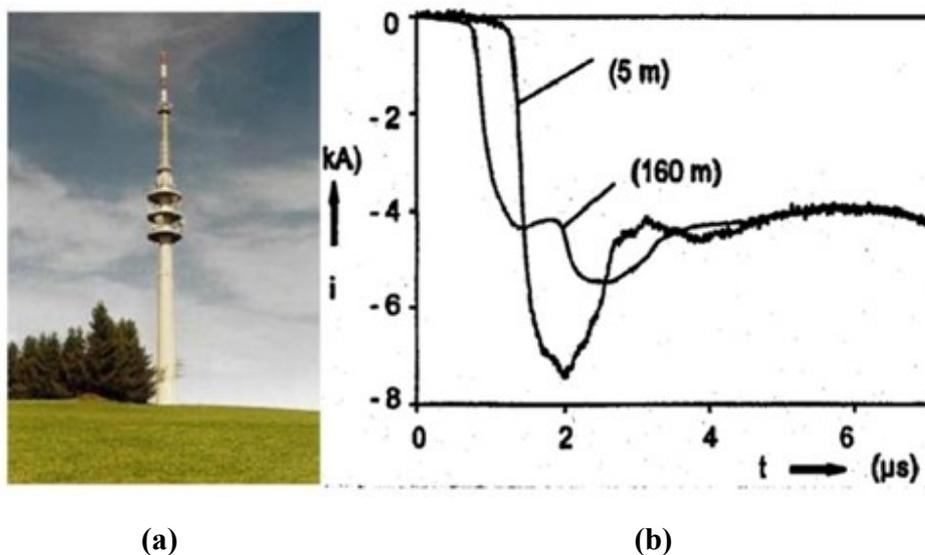


Figure I-11: (a) Tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour [9]

### I.5.4 Foudre déclenchée artificiellement

La technique du déclenchement artificiel de la foudre est un moyen efficace pour comprendre la foudre naturelle, car elle fournit des informations sur le courant à la base du canal de foudre et sur le champ électromagnétique associé. Le processus consiste à lancer un missile vers la base du nuage orageux, portant un fil métallique qui se connecte au sol, créant ainsi un court-circuit permettant le flux de l'arc de foudre retour. La détermination précise du point d'impact permet de mesurer le courant et le champ électromagnétique émis [10]. Les figures I-12 et I-13 représentent respectivement les étapes d'un déclenchement artificiel de la foudre et une photographie des opérations de déclenchement de cette dernière en Floride, USA.

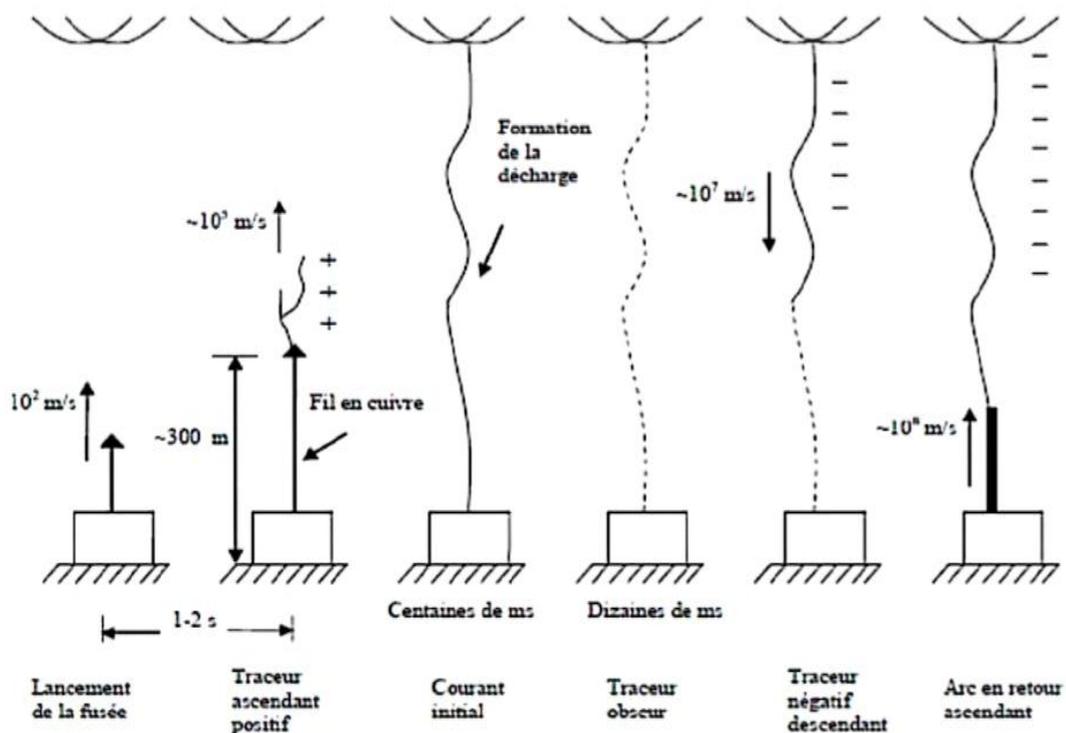


Figure I-12 : Processus de génération de la foudre artificielle [10].



**Figure I-13** : Exemple d'un déclenchement artificiel de la foudre en Floride [9].

*Rakov* a résumé les caractéristiques du courant de l'arc en retour de la foudre à partir d'expériences menées en France et aux États-Unis (Tableau I.1). La comparaison des données montre une correspondance entre la valeur moyenne du pic de courant mesurée en Floride et celle rapportée par *Berger et al.* en Suisse [11].

Endroit de la mesure	Année	Nombre d'événements	Valeur moyenne du pic du courant d'arc en retour (kA)	Valeur moyenne du pic de la dérivée du courant (kA/ $\mu$ s)
Floride	1985-1991	305/134	12.1	91.4
France	1986, 1990-1991	54/47	9.8	36.8

**Tableau I-1** : Caractérisation du courant de l'arc en retour [12].

## I.6 Caractérisation du champ électromagnétique générée par la foudre

En 1979, *Lin et al.* ont publié des résultats sur les motifs des champs magnétiques azimutaux et des champs électriques verticaux pour les premiers arcs de retour et les arcs

de retour subséquents, à des distances allant de 1 à 200 km, basés sur des mesures effectuées en Floride. *Nucci et al.* ont également identifié quatre caractéristiques du champ électromagnétique : un premier pic du champ électromagnétique qui est inversement proportionnel à la distance, un gradient du champ électrique après son pic pour les distances proches, une bosse dans le champ magnétique aux distances proches après le pic, et un changement de polarité pour les champs électriques et magnétiques à de grandes distances (voir les figures I-14 et I-15) [13].

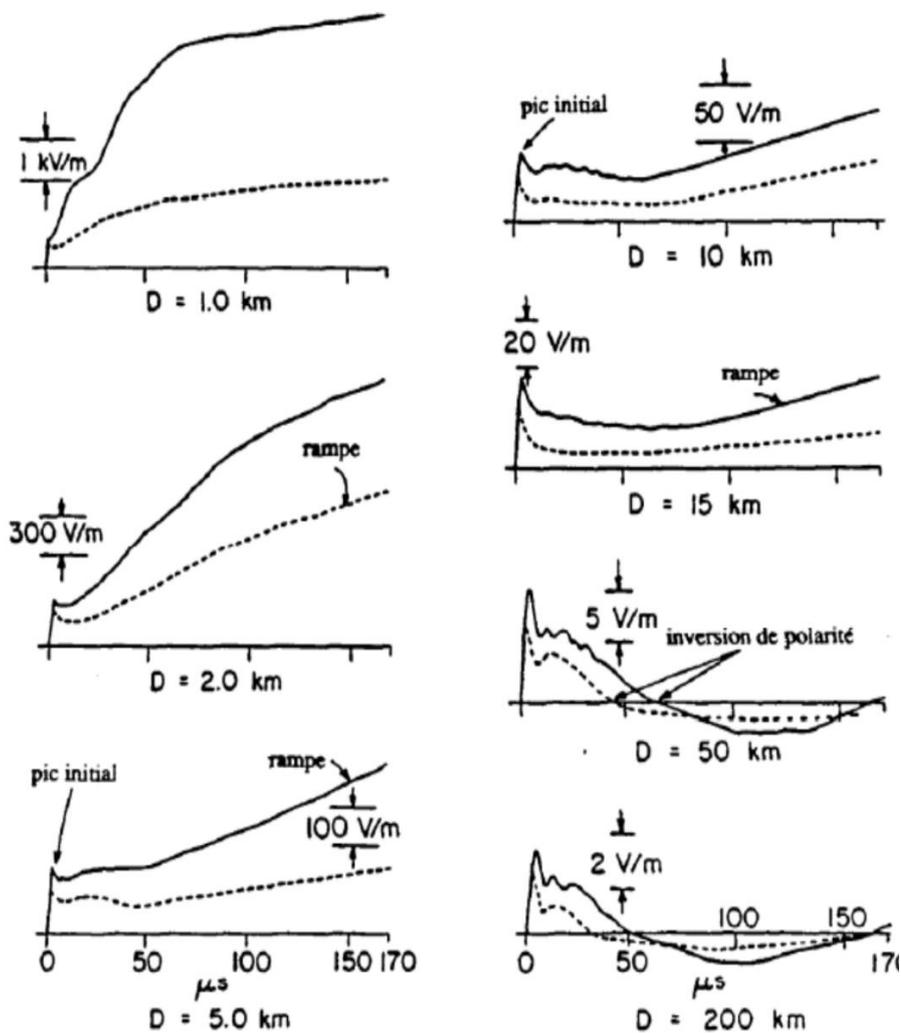


Figure I-14 : Champ électrique vertical, pour le premier arc en retour (ligne continue) et l'arc en retour subséquent (ligne Pointillée) à des distances de 1 à 200 km [13]

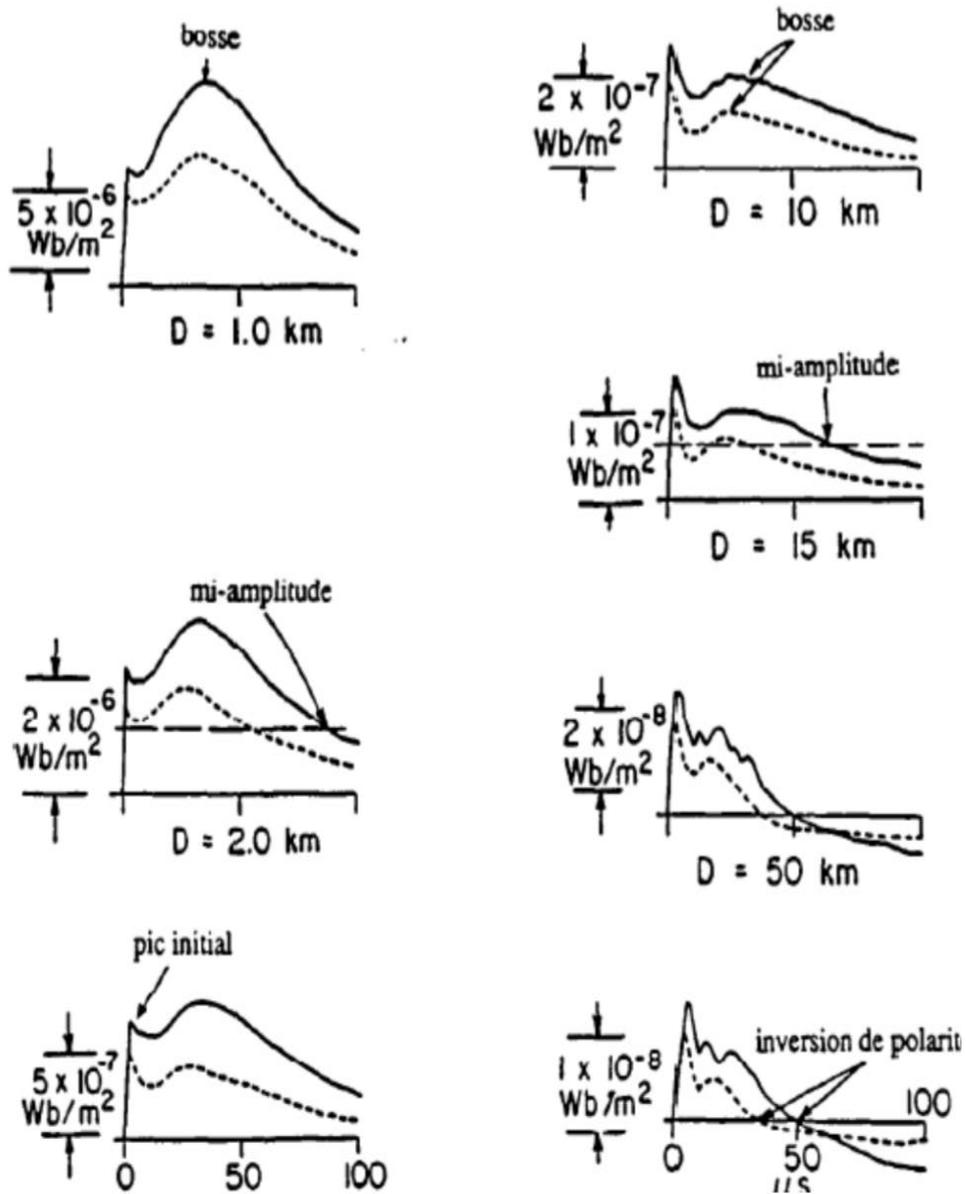


Figure I-15 : Densité du flux magnétique correspondant à un premier arc en retour (trait continu) et à un arc en retour subséquent (pointillés) à des distances variant de 1 Km à 200 Km [13]

## **I.7 Caractéristiques de l'occurrence de la foudre / systèmes de**

### **I.7.1 Localisation de la foudre**

Le facteur principal pour décrire la foudre dans une région donnée est la densité des éclairs nuage-sol par unité de temps, mesurée à l'aide de compteurs de foudre et de systèmes de localisation. La détermination précise des positions nécessite l'utilisation de réseaux multi-stations. Les performances du réseau NALDN en Amérique du Nord ont été évaluées sur la base du déclenchement artificiel de la foudre. *Schultz et al.* ont également présenté des données statistiques sur plus de trois millions d'éclairs nuage-sol à l'aide du système ALDIS. En 1999, le système LASA a été étendu pour inclure de nouvelles régions, avec une amélioration de la couverture pour offrir une capacité 3D [14].

### **I.8 Effets de la foudre**

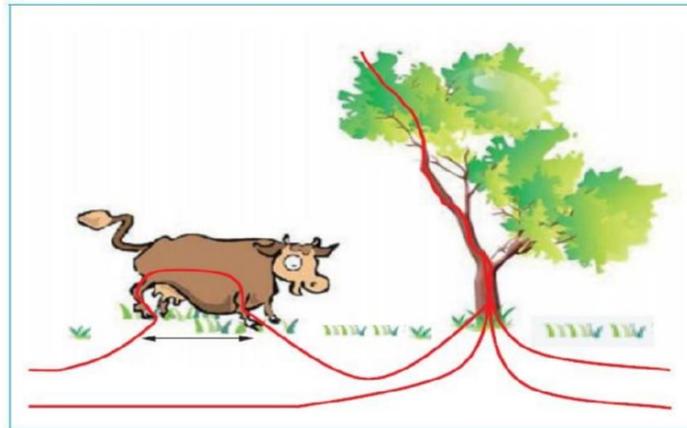
Les effets de la foudre se divisent en deux types : les effets directs résultant du passage du courant, et les effets indirects qui provoquent des hausses soudaines de la tension dans les éléments conducteurs en raison du rayonnement électromagnétique de la décharge orageuse et des variations importantes du potentiel terrestre. Le passage du courant de foudre à travers la terre et ses champs rayonnés entraîne une variété d'effets [15]:

- effets électriques
- effets thermiques
- effets électrodynamiques
- effets électrochimiques
- effets liés aux champs électromagnétiques

#### **I.8.1 Effets électriques**

Le courant de foudre qui traverse la terre entraîne une augmentation de la tension locale près du point d'impact, conformément à la loi d'Ohm, ce qui peut endommager les équipements connectés à la terre en cas de différence de potentiel. Les variations de

tension présentent un danger pour les êtres vivants, en particulier pour les animaux ayant de grandes distances entre leurs pattes, comme les vaches. La différence de potentiel peut atteindre plusieurs milliers de volts, ce qui entraîne généralement l'électrocution des animaux [16].



**Figure I-16** Tension de pas [16]

### **I.8.2 Effets thermiques**

Les impacts de la foudre entraînent des effets thermiques qui dépendent de la quantité de charge et de la durée du courant, ce qui peut provoquer la fusion des matériaux conducteurs ou l'inflammation des environs. En cas de bonne conductivité, le courant est dirigé vers le sol sans causer de dommages thermiques. [16].

### **I.8.3 Effets Électrodynamiques**

Les courants électriques génèrent des forces sur les conducteurs selon la loi de *Laplace*. Lors de coups de foudre sévères (100 kA), ces forces peuvent atteindre 105 N/m pour des conducteurs espacés de 5 mm et 103 N/m pour ceux espacés de 50 cm. Cela peut entraîner la destruction des structures métalliques, l'explosion des structures en béton armé et la coupure des câbles électriques [16].

### **I.8.4 Effets électrochimiques**

Ces phénomènes sont dus à l'accélération de la corrosion des matériaux métalliques enterrés, tels que les câbles, les tuyaux et les dispositifs de mise à la terre, en raison de l'effet des courants de fuite [15].

### **I.8.5 Effets liés aux champs électromagnétiques**

Les arcs en retour des coups de foudre génèrent des impulsions électromagnétiques puissantes pouvant dépasser 1 volt/mètre, avec un rayon d'effet de plus de 200 km, ce qui impacte la qualité des services électriques et de télécommunications [17].

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, le phénomène de la foudre a été étudié, se manifestant par des coups de foudre accompagnés de décharges électriques et de champs électromagnétiques. Des résultats expérimentaux issus de la littérature ont également été présentés, mettant en évidence la forme d'onde du courant de foudre et celle du champ électromagnétique rayonné. Une présentation générale des systèmes de production de l'énergie électrique en s'appuyant sur les éoliennes fera l'objet du prochain chapitre.

# **Chapitre II**

## **Généralités sur les éoliennes**

## **II.1 Introduction**

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et naturelle liée au mouvement du vent. Cette énergie a été exploitée dans des différents domaines comme l'agriculture, l'hydraulique et l'électricité. Dans notre domaine de l'électrotechnique l'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables qui sont utilisées comme énergie primaire afin de produire l'énergie électrique. De plus, pour atteindre ce but, il est indispensable de placé le système éolien sur une tour caractérisé par son altitude élevée, et cela a pour objective de bénéficier beaucoup plus de la puissance du vent. D'autre part, la haute altitude de la tour éolienne et le champ électrique élevé au niveau de son sommet la rendent exposée au coup de foudre. A cet effet, nous avons intéressé dans ce travail au sujet d'interaction entre les coups de foudre avec les tours éoliens.

Ce chapitre présente une définition de l'énergie éolienne et son histoire, ainsi que les différents types d'éoliennes. Ensuite, nous expliquons comment obtenir de l'énergie à partir du vent, suivie du processus de conversion de cette énergie en électricité.

## **II.2 L'énergie éolienne à travers l'histoire**

Le vent est une source traditionnelle d'énergie propre, utilisée à travers l'histoire pour propulser les navires et faire fonctionner les moulins. Dans les temps anciens, l'empereur babylonien *Hammurabi* a inventé un système d'irrigation utilisant l'énergie éolienne, et le scientifique grec *Héros* d'Alexandrie a décrit une simple turbine éolienne pour extraire de l'eau. Au septième siècle, les Perses utilisaient des moulins à vent verticaux pour irriguer les terres agricoles et moudre le grain, et cette technologie s'est propagée dans le monde arabe. La production de l'énergie électrique en s'appuyant sur les moulins à vent est débutée en 1890, au Danemark [18].

La figure II-1 présente deux moulins, tel que la première qui se trouve dans le coté gauche est une Moulin traditionnel perse, tandis que la seconde est celle qui se trouve à droite présente un moulin à vent [18].

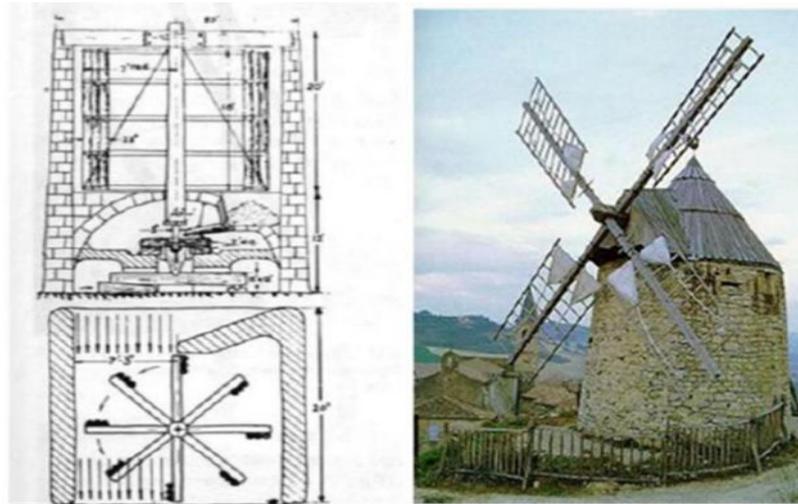


Figure II-1 Moulin traditionnel perse (à gauche) et moulin à vent (à droite) [18].

### II.3 Production éolienne

L'énergie éolienne provient du mouvement de l'air dû aux différences de température à la surface de la Terre, ce qui crée des variations de pression et entraîne un mouvement continu de l'air. Bien qu'elle ait été exploitée depuis l'Antiquité, cette énergie a connu un développement considérable au cours des trente dernières années, notamment après les crises pétrolières qui ont stimulé la recherche de sources d'énergie alternatives [19].

### II.4 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie provenant du mouvement du vent, qui résulte des différences de chauffage de la Terre par le soleil, créant ainsi des zones de températures et de pressions atmosphériques variées. Ces différences contribuent au mouvement de l'air, connu sous le nom de vent, qui est utilisé pour produire de l'électricité à l'aide de turbines éoliennes. Ces turbines convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique comme le montre la figure II-2 [20].

Selon la figure II.3, le système de conversion éolienne (SCE) se compose d'un générateur électrique entraîné par une turbine éolienne à travers un multiplicateur de vitesse, ainsi que d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et, enfin, il est connecté à un réseau électrique.

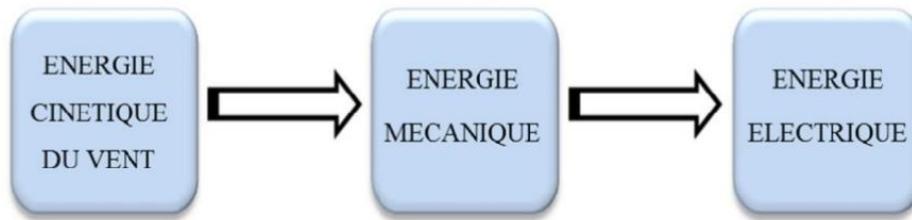


Figure II-2 Conversion du mouvement de l'air en énergie [20].

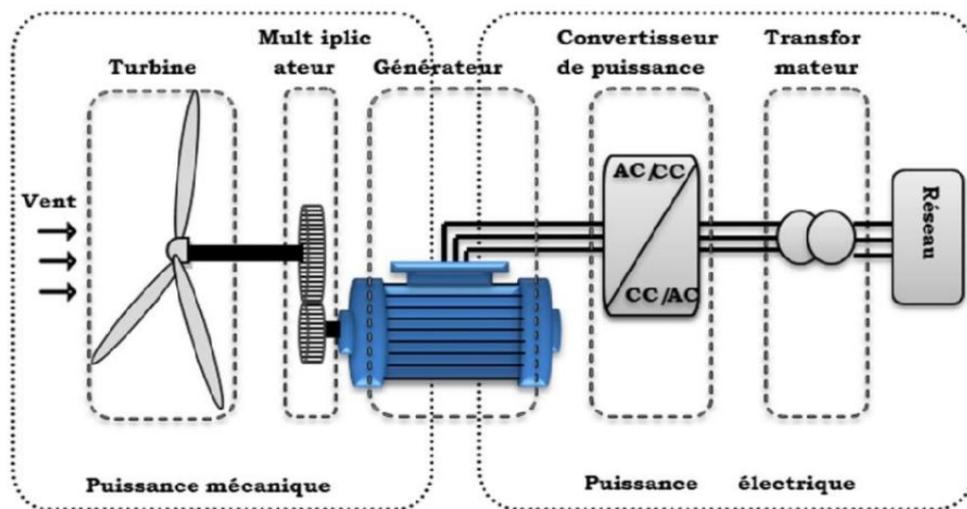


Figure II-3 Eléments essentiels du système de conversion de l'énergie éolienne [21]

## II.5 Direction et vitesse du vent

Le vent souffle des zones de haute pression vers les zones de basse pression, et sa trajectoire change dans les régions tempérées et élevées en raison de la rotation de la terre. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour des cyclones, et dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones, tandis que c'est l'inverse dans l'hémisphère sud [22]. La figure II-4 présente le mouvement du vent autour du monde.

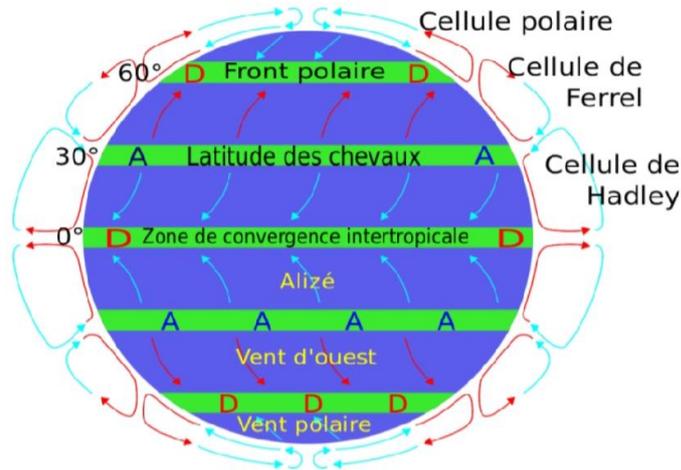


Figure II-4 Mouvement du vent autour du monde [ 23].

## II.6 Aérogénérateur

Les éoliennes sont des systèmes qui utilisent l'énergie du vent pour générer de l'électricité. Ces dispositifs convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis elle est transférée via un arbre rotatif pour produire de l'électricité à l'aide d'un générateur [24].

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [ 23]:

- 🏠 Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW,
- 🏠 Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW,
- 🏠 Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

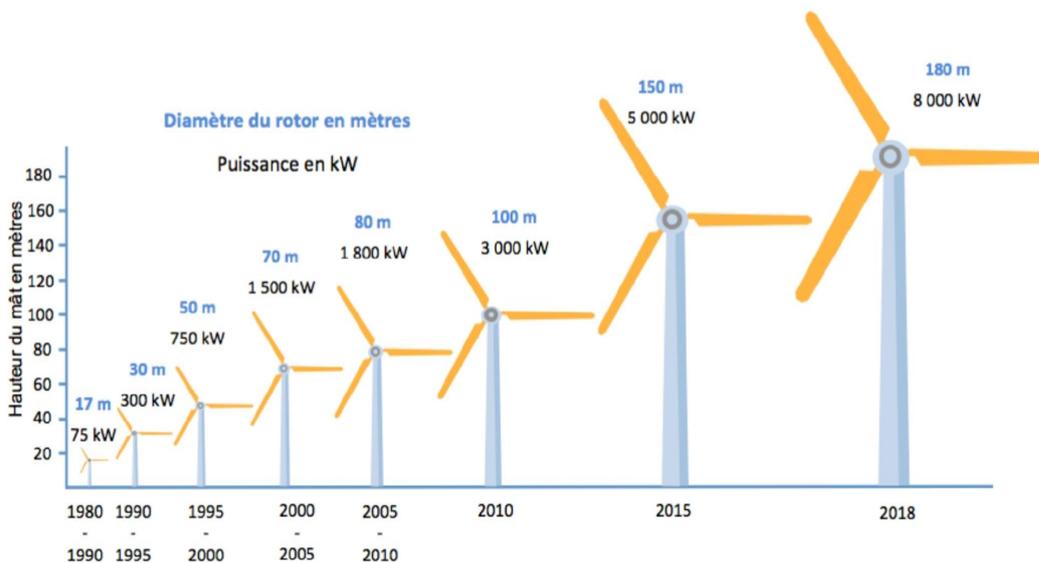


Figure II .5 Relation entre la taille des éoliennes et leur puissance [23].

La figure II-5 présente la progression des éoliennes depuis 1980 à 2013 en donnant la relation entre la taille de l'éolienne et sa puissance.

### II.6.1 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs conceptions d'éoliennes qui varient considérablement, mais le modèle traditionnel se compose généralement de trois composants principaux à savoir le mât, la nacelle et le rotor. La figure II-6 illustre en détaille les différentes parties de l'éolienne.

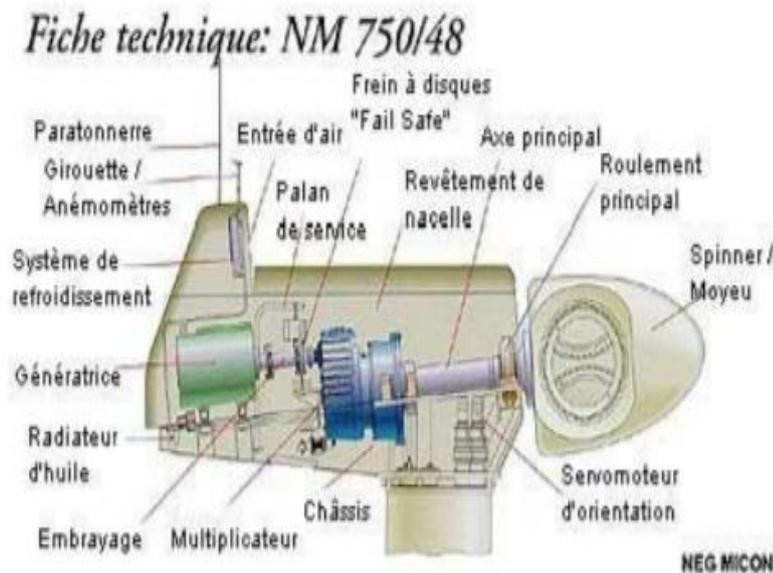


Figure II-6 Parties de l'éolienne [ 23].

#### a/ Le mât

Le mât élève le rotor à une hauteur permettant de le faire tourner grâce à des vents plus forts et plus stables. Il contient généralement des composants électriques et électroniques, et est souvent fabriqué en acier, bien que certaines entreprises commencent à utiliser des mâts en béton [25].

#### b/ La nacelle

Les éléments mécaniques qui relient le rotor éolien au générateur électrique comprennent les arbres, les roulements, le multiplicateur, le système de contrôle et de refroidissement, ainsi que les freins à disque pour arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement synchrone ou asynchrone, et fonctionne avec des systèmes hydrauliques ou électriques pour orienter les pales et la nacelle. Le système inclut également des systèmes de

refroidissement par air ou par eau, des anémomètres et un système de gestion électronique pour optimiser les performances [25].

### c/ Le rotor

La partie mobile de l'éolienne est composée de trois pales en matériaux composites, qui tournent grâce aux vents puissants. Elle est installée en hauteur pour capter les vents, et chaque pale mesure entre 25 et 60 mètres de long, tournant à une vitesse de 5 à 25 tours par minute [25].

## II.6.2 Types d'aérogénérateurs

Depuis l'époque ancienne de la Perse, la technologie d'exploitation de l'énergie éolienne a évolué de manière significative. Aujourd'hui, les éoliennes se composent d'une pale (rotor) pour capter le vent et le convertir en mouvement rotatif, d'un système d'engrenages pour augmenter la vitesse de rotation, et d'une machine électrique pour transformer l'énergie mécanique en électricité. Les éoliennes peuvent également être classées de différentes manières. Comme il est présenté dans la figure II-7, les éoliennes sont classées en deux types principaux selon l'orientation de leur axe de rotation en horizontal et vertical [26].

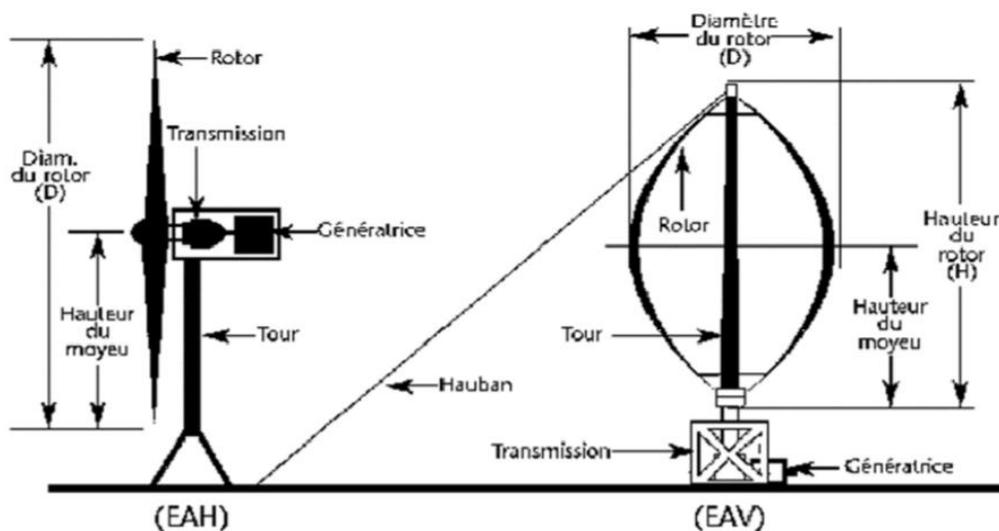


Figure II-7 Différents types d'éoliennes [23].

### a/ Éoliennes à axe vertical

Les turbines de *Savonius* et de *Darrieux* étaient parmi les premiers systèmes conçus pour produire de l'électricité. Bien qu'elles soient moins couramment utilisées par rapport à d'autres

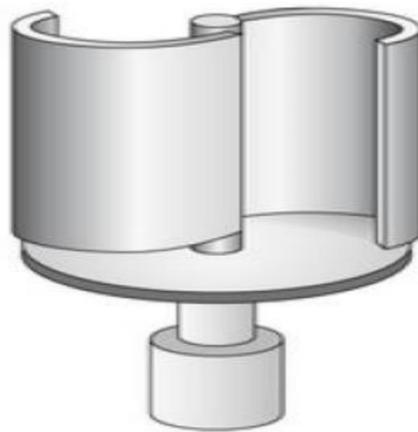
types de turbines éoliennes, elles présentent des avantages et des inconvénients qui sont les suivants [27] :

✓ **Avantages**

En raison de la conception de l'axe vertical et symétrique des éoliennes, elles fonctionnent quel que soit le sens du vent sans nécessiter de rotation du rotor. Le modèle est également robuste, simple et nécessite peu d'entretien, tout en permettant de placer les dispositifs de contrôle et la boîte de vitesses près du sol.

✓ **Inconvénients**

Les éoliennes à conception verticale fonctionnent avec les vents proches du sol, qui sont généralement faibles. Elles nécessitent plus d'espace et ont une efficacité inférieure par rapport aux éoliennes à axe horizontal.

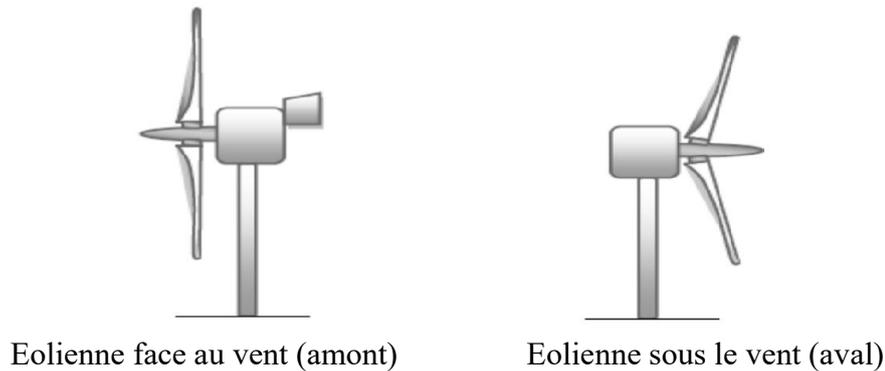


**Figure II-8** Structure d'une éolienne verticale [28]

La figure II-8 la structure d'une éolienne verticale.

***b/ Éoliennes à axe horizontal***

Ces éoliennes sont actuellement les plus courantes en raison de leurs avantages notables. Elles sont généralement équipées de deux ou trois pales orientées soit vers le vent, soit à l'opposé (figure II-9). Ce type présente aussi des avantages et des inconvénients qui peuvent présentés comme suit [29] :



**Figure II-9** Éolienne à axe horizontal [30]

✓ **Avantages**

Ce type de structure se distingue par sa capacité à capter les vents forts à haute altitude. Il occupe un espace beaucoup plus réduit par rapport aux éoliennes à axe vertical, avec les équipements de contrôle et le générateur situés dans la nacelle au sommet du mât, éliminant ainsi le besoin d'espaces supplémentaires pour les appareils.

✓ **Inconvénients**

Ces éoliennes se caractérisent par un coût de construction élevé et une efficacité faible. Elles sont conçues pour un usage permanent et nécessitent des systèmes d'orientation.

## II.7 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation

Les éoliennes sont classées en deux types selon leur vitesse de rotation : fixe et variable. Les éoliennes à vitesse fixe reposent sur un système électrique simple et produisent de l'énergie électrique fluctuante. En revanche, les éoliennes à vitesse variable utilisent des convertisseurs de puissance pour améliorer l'efficacité et fournir une meilleure énergie sur une large gamme de vitesses de vent, ajustant leur vitesse pour maximiser l'énergie produite. Ces éoliennes présentent des avantages et des inconvénients se présentent comme suit [31]:

### II.7.1 Vitesse Fixe

Ces éoliennes se caractérisent par des coûts de construction réduits et un design simple, robuste et fiable, tandis qu'elles souffrent de fluctuations notables dans la production d'énergie et d'une faible efficacité de conversion de l'énergie.

### II.7.2 Vitesse Variable

Les éoliennes se distinguent par la production d'énergie électrique de haute qualité et une grande efficacité de conversion de l'énergie, tandis que le contrôle des systèmes devient de

plus en plus complexe, et l'utilisation de convertisseurs peut entraîner des coûts supplémentaires et des pertes d'énergie.

### II.8 Transformation de l'énergie du vent en électricité

Les éoliennes convertissent l'énergie du vent en électricité en deux étapes : dans la première étape, l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique par la turbine, puis dans la deuxième étape, cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique par le générateur. Le générateur peut être connecté à un réseau électrique ou fonctionner de manière autonome en utilisant des générateurs de secours ou des batteries [32].

Le principe de conversion de l'énergie éolienne est illustré dans la figure II-10.

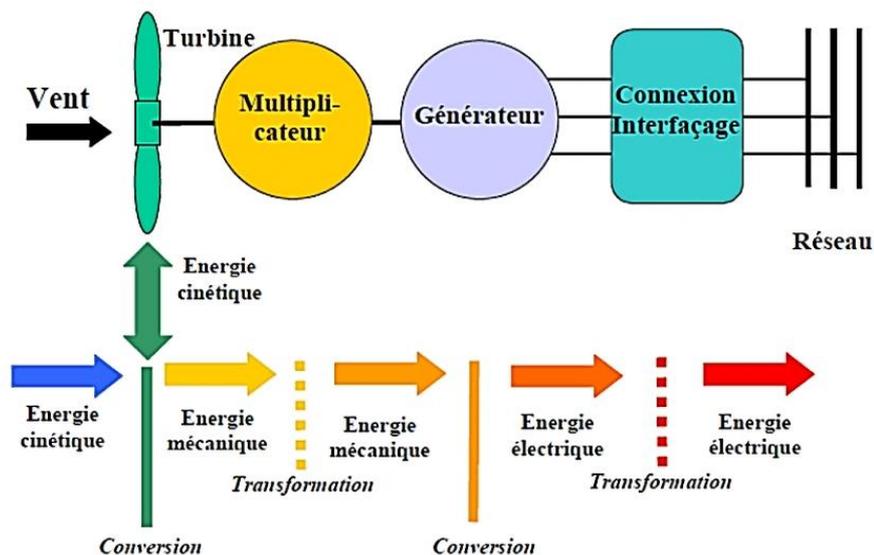


Figure II-10 Principes de la conversion d'énergie [33]

### II.9 Domaine de fonctionnement d'une éolienne :

La figure (II.11) montre la relation entre la puissance d'une éolienne et la vitesse du vent sous forme de courbe. Selon cette figure il existe quatre zones à savoir [34] :

**Zone I:** La turbine s'arrête lorsque la vitesse du vent descend en dessous de la vitesse de démarrage minimale.

**Zone II:** Dans cette zone, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

**Zone III:** à partir de la vitesse nominale, la puissance reste constante grâce à des techniques mécaniques pour limiter la vitesse de la turbine.

**Zone IV:** Lorsque la vitesse maximale est atteinte, la turbine doit être complètement arrêtée pour éviter tout danger.

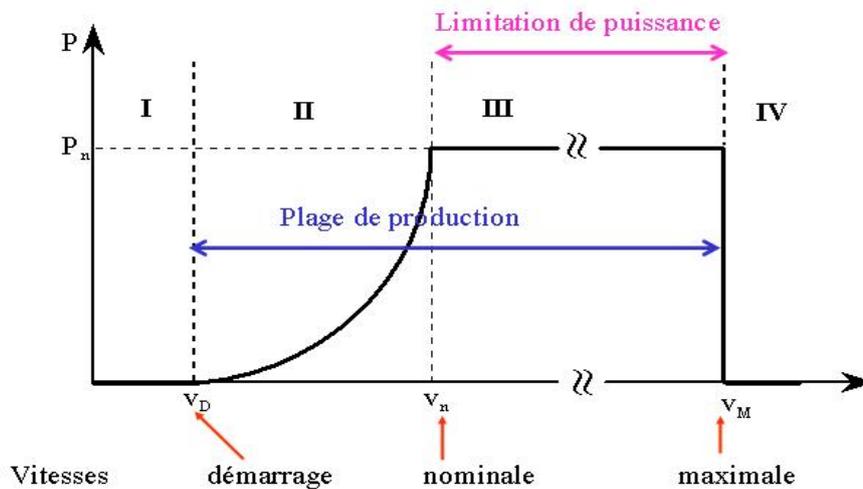


Figure II-11 Courbe de puissance et zone de fonctionnement d'une éolienne [34].

## II.10 Application des éoliennes

L'importance des éoliennes réside dans leur capacité à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation de manière efficace. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières, à savoir le fonctionnement d'une pompe à eau ou un générateur électrique. En ce qui concerne la production d'électricité, elle peut soit être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure, soit être utilisée immédiatement en étant injectée dans le réseau de distribution [34].

Les applications électriques de l'énergie éolienne se manifestent par son intégration avec les moyens de production traditionnels dans les régions disposant d'infrastructures existantes, ainsi que par la possibilité de production dans des sites non raccordés aux réseaux de distribution traditionnels. L'importance de l'énergie éolienne se révèle particulièrement dans son rôle pour réduire l'isolement des régions reculées et ses applications dans les pays en développement, telles que l'alimentation des unités de dessalement, la cogénération avec des groupes diesel et des panneaux photovoltaïques [34].

L'avantage et inconvénient de l'énergie éolienne [34]:

**a/ Avantages**

- ❖ Le vent est une énergie gratuite et renouvelable.
- ❖ Elle ne produit aucune gaz nuisible ni déchets toxiques.
- ❖ Les éoliennes sont recyclables.
- ❖ Sa technologie est simple et facile.
- ❖ Les éoliennes fournissent de l'électricité aux zones isolées.
- ❖ L'énergie éolienne aide à réduire les factures et à se protéger des coupures de courant.
- ❖ Les parcs éoliens nécessitent seulement 2% des terres agricoles.

**b/ Inconvénients**

- ❖ La production d'énergie est liée à la vitesse du vent.
- ❖ La pollution sonore et visuelle.
- ❖ La création de turbulences de l'air six fois le diamètre du rotor derrière elle.
- ❖ Interférence dans la réception des ondes électromagnétiques
- ❖ La production d'énergie dépend de la force et de la direction du vent.
- ❖ Le bruit et la déformation visuelle.
- ❖ Les parcs éoliens peuvent affecter les oiseaux sauvages en raison des collisions avec les pylônes ou les pales.

**II.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu complet de l'énergie éolienne, en abordant son histoire d'utilisation, en discutant des différents types d'éoliennes, ainsi qu'en expliquant leur principe de fonctionnement et la manière dont elles génèrent de l'électricité. Nous avons également abordé les domaines dans lesquels cette énergie peut être utilisée. Enfin, nous avons présenté les diverses applications des éoliennes, tout en exposant leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous concluons que les éoliennes fonctionnent selon un système simple et peuvent être utilisées dans n'importe quel endroit où les conditions de vent sont suffisantes. Elles représentent, dans certains cas, l'une des meilleures solutions de production d'énergie, tout en ne polluant pas l'environnement par des gaz ou des liquides.

# **Chapitre III**

## **Modélisation et Simulation du champ électromagnétique Rayonné par l'interaction foudre-éolienne**

### III.1 Introduction

L'étude des interactions entre la foudre et les structures élevées, telles que les tours de télécommunication et les éoliennes, prend de plus en plus d'importance en raison de leurs effets sur la sécurité des installations électriques. Ce chapitre se concentre sur le phénomène de rayonnement électromagnétique résultant de l'interaction entre la foudre et les éoliennes.

Ainsi, dans ce chapitre, nous étudierons le courant de l'arc en retour et son interaction avec des structures élevées telles que les éoliennes. Nous commencerons par une revue des différents modèles de ce courant, en mettant l'accent sur les modèles géométriques choisis pour cette étude. Ensuite, nous présentons les modèles de courant étendus pour inclure les éoliennes, en tenant compte de l'importance de la géométrie spécifique de ces éoliennes lors de l'analyse de leur interaction avec la foudre.

Après avoir établi les bases théoriques, nous passerons à la modélisation du champ électromagnétique résultant de l'interaction en utilisant la méthode FDTD (Finite-Difference-Time-Domain). Puis, nous nous intéressons à la présentation des résultats de simulations obtenus par la mise en œuvre numériques des différents modèles à savoir : le courant à la base des canal de foudre, la distribution spatio-temporelle du courant le long de l'éolienne et le long du canal de foudre et en dernier les composantes du champ électromagnétique généré par l'interaction entre un coup de foudre et une tour éolienne en utilisant la méthode FDTD en trois démentions basée sur la formulation de *Taflove* [35]. De plus, pour atteindre ce but il a été nécessaire pour nous de développer des programme de calcul sur l'environnement Matlab.

### III.2 Classification des modèles du courant de l'arc en retour

Selon *Rakov et Uman* [36], les modèles du courant de l'arc en retour sont divisés en quatre catégories principales :

- ✚ Modèles basés sur les principes physiques,
- ✚ Modèles basés sur les phénomènes électromagnétiques,
- ✚ Modèles de circuits électriques RLC,
- ✚ Modèles d'ingénieur.

*Les modèles physiques* reposent sur une approche physico-chimique pour décrire l'évolution de la décharge électrique dans un plasma cylindrique en utilisant les équations de conservation de la masse et de l'énergie ainsi que les équations de *Maxwell*. Bien que

théoriquement rigoureux, ces modèles n'ont pas donné de résultats précis pour prédire les champs électromagnétiques en raison de leur complexité et de la nécessité d'informations précises sur des phénomènes physiques difficiles à mesurer.

*Les modèles électromagnétiques* utilisent la théorie des antennes pour simuler le canal de foudre, où la distribution du courant est déterminée par des solutions numériques des équations de *Maxwell*. On utilise généralement la méthode des moments (MoM) ou la méthode FDTD pour calculer le champ électromagnétique.

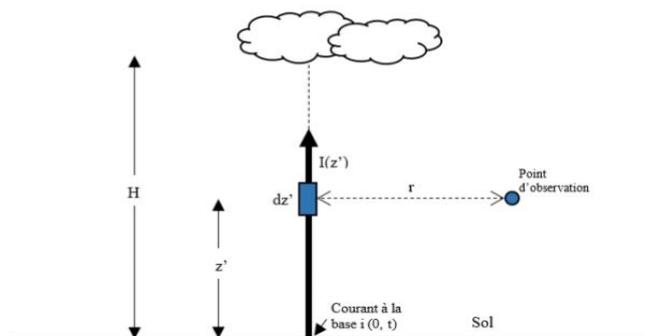
*Les modèles RLC* décrivent la décharge de foudre comme un processus transitoire sur une ligne de transmission avec une résistance, une inductance et une capacité. Ces modèles sont utilisés pour évaluer le courant de foudre en fonction du temps et de la hauteur, permettant ensuite de calculer le champ électromagnétique généré.

Les modèles connus sous le nom de "*modèles d'ingénieurs*" sont les plus utilisés dans la recherche scientifique, car ils se basent sur des observations expérimentales des caractéristiques de l'arc de retour de la foudre, telles que le courant, la vitesse et la luminosité. Ces modèles se distinguent par leur simplicité, car ils ne prennent pas en compte les détails physiques complexes de l'arc de retour. Leur objectif est de simuler avec précision le champ électromagnétique expérimental pour des distances allant de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres.

### III.3 Distribution du courant de foudre dans les modèles d'ingénieur

#### III.3.1 Géométrie du problème

Dans les modèles d'ingénieurs, on considère que le courant dans l'arc de retour varie dans le temps et dans l'espace, comme le montre la figure III.1 illustrant la géométrie du problème.



**Figure III-1** Géométrie du problème adopté pour le calcul du courant de foudre

### III.3.2 Représentation générale des modèles d'ingénieur

La distribution du courant le long du canal de la foudre peut être exprimée par une formule unique et globale qui résume les cinq modèles géométriques (BG, TCS, TL, MTLL, MTLE) mentionnés dans [37]. Cette formule est exprimée mathématiquement par :

$$i(z', t) = P(z') * i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) * u\left(t - \frac{z'}{v^*}\right) \quad \text{III.1}$$

Avec :

- $u$  est la fonction d'Heaviside égale à 1 pour  $t \geq z'/v$  et égale à zéro par ailleurs.
- $P(z')$  le facteur d'atténuation du courant dépendant de la hauteur.
- $v$  la vitesse de propagation de l'onde de courant.
- $v^*$  la vitesse de propagation du front de l'arc en retour.

Le modèle de *Bruce et Golde* (BG) est le premier modèle à décrire l'arc de retour et vise à intégrer les données expérimentales dans un modèle mathématique permettant de calculer les champs électromagnétiques loin des arcs de retour.

Le modèle TCS (Travelling current sources), proposé par *Heidler*, suppose qu'une source d'énergie se déplace de la terre vers le nuage à une vitesse donnée, le courant se propageant vers la terre à la vitesse de la lumière.

Le modèle TL (Transmission Line) donné par *Uman et al.*, traite le canal de foudre comme une ligne de transmission sans pertes, ce qui signifie que le courant se déplace de la terre vers le nuage sans distorsion ni atténuation.

Le modèle MTLL (Modified Transmission Line with Linear decay) développé par *Rakov et al.*, considère que l'intensité du courant diminue linéairement lors de sa propagation dans le canal.

En dernier, dans le modèle MTLE (Modified Transmission Line with exponential decay) proposé par *Nucci et al.* en 1988, le courant de l'arc de retour décroît de manière exponentielle lorsqu'il se propage à travers le canal de foudre.

Le tableau III.1 résume les variables  $P(z')$  et  $v^*$  pour les cinq modèles différents, où  $H$  représente la hauteur maximale du canal,  $\lambda$  est la constante de décroissance du courant, et  $c$  est la vitesse de la lumière.

Modèle	$P(z')$	$v^*$
BG	1	$\infty$
TCS	1	$-c$
TL	1	$vf$
MTLL	$1 - z'/H$	$vf$
MTLE	$\exp(-z'/h)$	$vf$

Tableau III-1 Paramètres  $P(z')$  et  $v^*$  pour cinq modèles d'ingénieurs (adapté de [37]).

### III.4 Courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre

#### III.4.1 Le modèle bi-exponentiel

La fonction bi-exponentielle est souvent utilisée en raison de sa simplicité, et elle est particulièrement adaptée à l'analyse des fréquences du rayonnement de la foudre [38].

Le courant du premier arc de retour est déterminé par la formule suivante:

Premier arc en retour :

$$i(0, t) = I_{01}(e^{-\alpha t} - e^{\beta t}) \quad \text{III.2}$$

Arc en retour subséquent :

$$i(0, t) = I_{02}(e^{yt} - e^{\delta t}) \quad \text{III.3}$$

Une formule composée de l'addition de deux fonctions bi-exponentielles a été utilisée pour l'arc en retour suivant, comme indiqué dans [38] :

$$i(0, t) = I_{01}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{02}(e^{-\gamma t} - e^{-\delta t}) \quad \text{III.4}$$

Le tableau III.2 présente les coefficients associés aux deux formes, qui ont été déterminés avec précision pour ajuster le temps de montée, la valeur de crête et la durée de l'impulsion de courant, afin de reproduire au mieux les courbes expérimentales moyennes recueillies par Berger et al [39].

	$I_{01}(kA)$	$\alpha(s^{-1})$	$\beta(s^{-1})$	$I_{02}(kA)$	$\gamma(s^{-1})$	$\delta(s^{-1})$
<b>Premier arc en Retour</b>	33.7	$9.2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$	-	-	-
<b>Arc en retour Subsequent</b>	14.3	$18 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^6$	10	$10^4$	$9.4 \cdot 10^4$

**Tableau III-2** Paramètres des fonctions bi-exponentielles [39].

Dans les figures III-2 et III-3, nous présentons les formes d'ondes du courant du premier arc en retour et celui de l'arc en retour subséquent. Ces formes sont obtenues en utilisant le modèle bi-exponentiel du courant à la base du canal de foudre et en adoptant les paramètres de tableau III-2.

Selon les allures du courant présentées sur ces deux figures on constate que le courant à la base du canal est sous la forme d'une impulsion dont les valeurs de courant se débutent de 0 A et s'augmentent pour atteindre une valeur maximale, puis elles se décroissent exponentiellement. De plus, la comparaison entre le cas du premier arc en retour avec celui de l'arc en retour subséquent, démontre que le courant du premier arc en retour est caractérisé par une valeur maximale de son amplitude plus supérieure que celle remarquée au niveau du courant de l'arc en retour subséquent. Ainsi, le temps de du courant ce dernier est plus rapide que celui obtenu pour le cas du premier arc en retour.

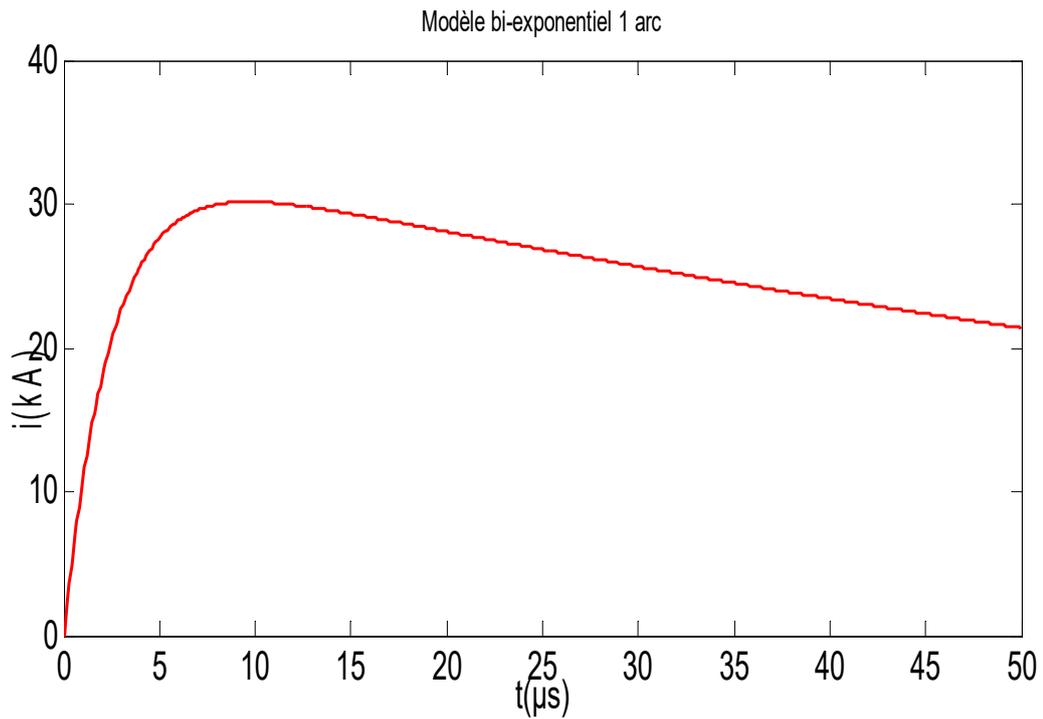


Figure III-2 Allure temporelle du courant à la base du canal calculée à l'aide du modèle bi-exponentiel (1<sup>er</sup> arc en retour)

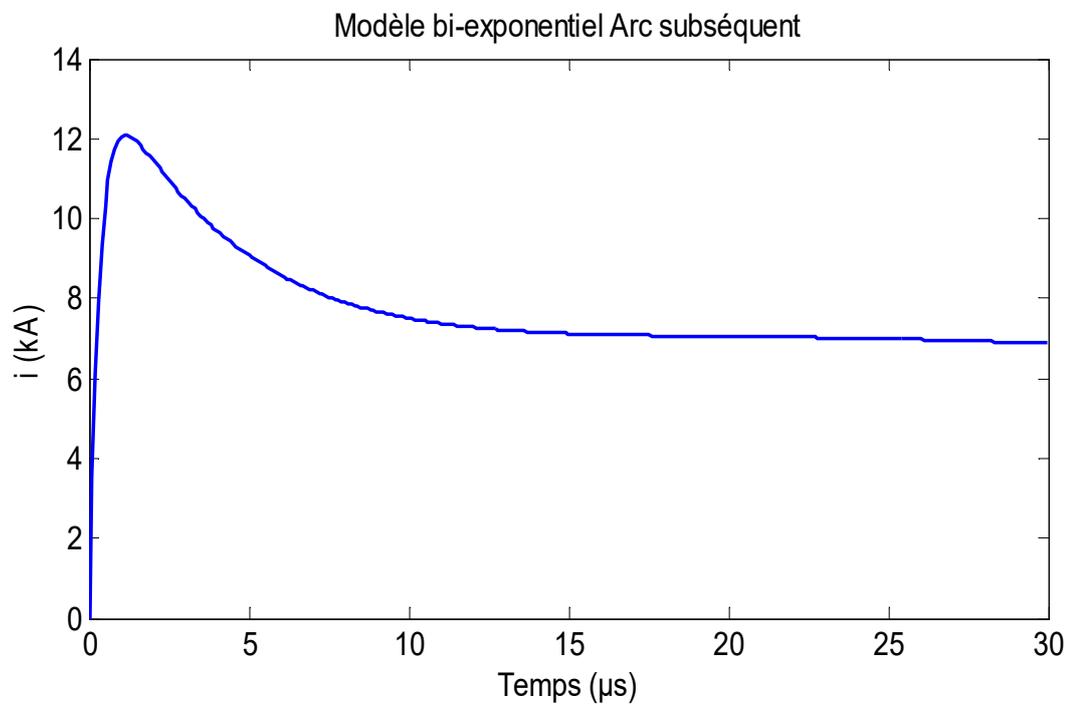


Figure III-3 Allure temporelle du courant à la base du canal calculée à l'aide du modèle bi-exponentiel (arc en retour subséquent)

**III.4.2 Modèle d'Heidler**

Des modèles analytiques sont généralement adoptés pour décrire le courant à la base du canal de foudre  $i_0(t)$ , et ces modèles reposent le plus souvent sur la formule proposée par *Heidler* [40] et connue sous le nom de 'fonction de *Heidler*' :

✓ *Pour le premier arc en retour :*

$$i_1(t) = \left(\frac{I_{01}}{\eta}\right) \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp - \left(\frac{t}{\tau_2}\right) \quad \text{III.5}$$

Avec :

- $i_0(t)$  l'amplitude du courant au pied du canal
- $\tau_1$  est le taux de remontée de l'impulsion du courant
- $\tau_2$  est la durée de l'impulsion du courant
- $n$  est un indice dont les chiffres sont inclus dans l'intervalle [2 ... 10]
- $\eta$  est le coefficient de correction d'amplitude du courant, obtenu par :

$$\eta = \exp \left[ - \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad \text{III-6}$$

✓ *Pour l'arc en retour subséquent:*

Cela peut être obtenu par la somme de deux fonctions d'*Heidler* :

$$I(0, t) = i_1(t) + i_2(t) \quad \text{III.7}$$

Ce qui donne mathématiquement:

$$i(0, t) = \left(\frac{I_{01}}{\eta}\right) \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}} \exp - \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right) + \left(\frac{I_{02}}{\eta}\right) \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}} \exp - \left(\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad \text{III.8}$$

$$\eta_1 = \exp \left[ - \left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{21}}\right) \left(n_1 \frac{\tau_{21}}{\tau_{11}}\right)^{\frac{1}{n_1}} \right] \quad \text{III.9}$$

$$\eta_2 = \exp \left[ - \left(\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}}\right) \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}}\right)^{\frac{1}{n_2}} \right] \quad \text{III.10}$$

Avec :

$I_{01}$  : Amplitude maximale du courant  $i_1$

$\tau_{11}$  : Temps de montée de l'impulsion du courant  $i_1$

$\tau_{12}$  : Durée de l'impulsion de courant  $i_1$

$\eta_1$  : Facteur de correction de l'amplitude du courant

$\eta_2$  : Facteur de correction de l'amplitude du courant

Mêmes définitions pour le courant  $i_2$

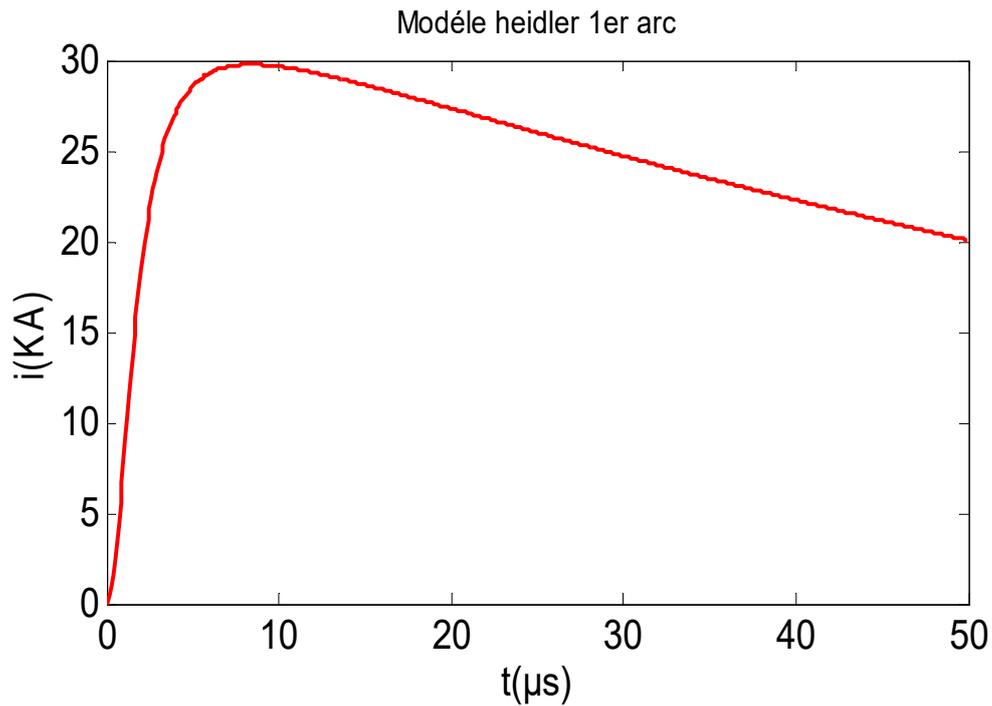
Le tableau III.3 présente les paramètres des deux fonctions d'*Heidler* utilisées pour calculés le courant du premier arc de retour et des arcs en retour subséquents [41].

	$I_{01}(kA)$	$\tau_{11}(\mu s)$	$\tau_{21}(\mu s)$	$n_1$	$I_{02}(kA)$	$\tau_{12}(\mu s)$	$\tau_{22}(\mu s)$	$n_1$
<b>Premier arc en retour</b>	28	1.8	95	2	-	-	-	2
<b>Arc en retour subsequent</b>	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2.1	230	2

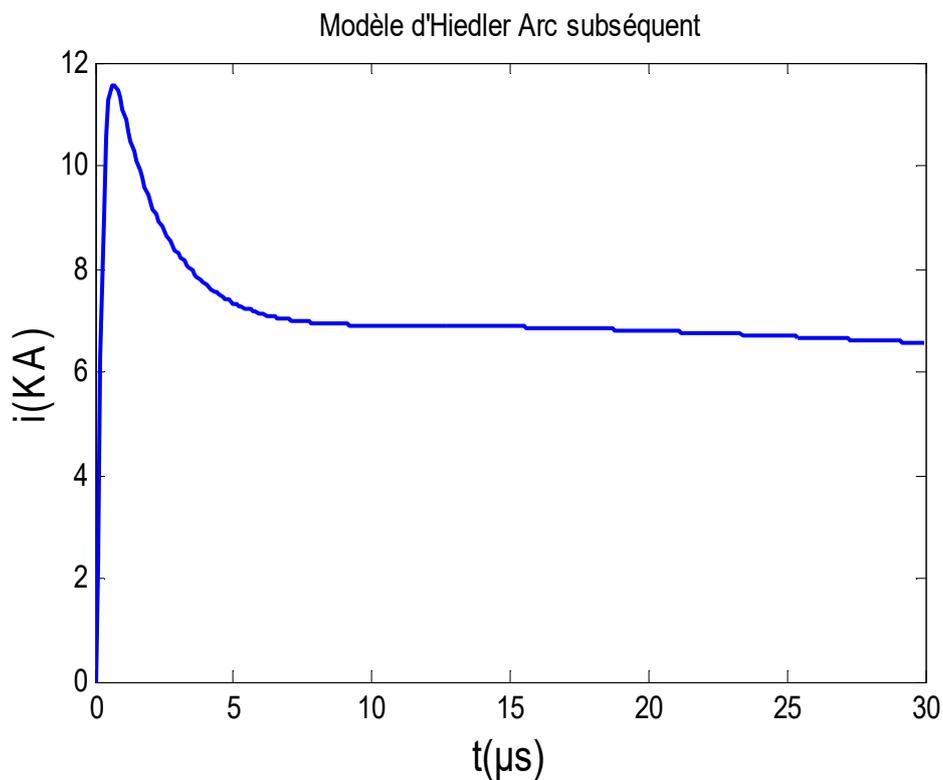
**Tableau III-3** Paramètres des deux fonctions d'*Heidler*

Les allures du courant calculées à la base du canal de foudre, à l'aide du modèle d'*Heidler*, sont présentées sur les figures III-4 et III-5. Ainsi, le courant simulé pour le cas du premier arc est illustré par la figure III-4, tandis que celui obtenue pour le cas d'arc en retour subséquent est tracé sur la figure III-5.

De plus, à l'issue de ces résultats, nous pouvons directement conclure que le modèle d'*Heidler* permet d'avoir des courbes de courant ayant les mêmes caractéristiques que ceux remarquées à partir de la comparaison effectuée entre les deux résultats simulées à l'aide du modèle bi-exponentiel.



**Figure III-4** Allure temporelle du courant à la base du canal calculé à l'aide du modèle d'Heidler (1<sup>er</sup> arc en retour)



**Figure III-5** Allure temporelle du courant à la base du canal calculé à l'aide du modèle d'Heidler arc en retour subséquent (arcs en retour subséquents)

### III.4.3 Modèle hybride

La combinaison de la fonction de *Heidler* et de la fonction double exponentielle est utilisée pour représenter la forme du courant de foudre de manière à reproduire les données mesurées. *Nucci et al.* ont proposé un modèle qui est utilisé comme référence standard à la base du canal de foudre, exprimé comme la somme de ces deux fonctions [42].

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + I_{02} \left(e^{-\frac{t}{\tau_3}} - e^{-\frac{t}{\tau_4}}\right) \quad \text{III.11}$$

Afin de reproduire la forme de l'onde de courant à la base du canal telle qu'observée expérimentalement par *Leteinturier et al.* [43], nous avons réalisé une simulation en nous appuyant sur l'équation (III.11) et les paramètres définis dans le tableau (III-4). Le courant simulé présente un pic initial atteignant 11 kA dans une durée de 0.7  $\mu$ s, comme le montre la figure III-6.

Paramètres de la première fonction d' <i>Heidler</i>				Paramètres de la deuxième fonction bi- exponentielle		
$I_{01}$ (kA)	$\tau_1$ $\mu$ s	$\tau_2$ ( $\mu$ s )	$n$	$I_{02}$ (kA)	$\tau_3$ ( $\mu$ s )	$\tau_4$ ( $\mu$ s )
9.9	0.072	5	2	7,5	100	6

**Tableau III-4** Paramètres du modèle hybride simulant le courant de foudre  
à la base du canal [43].

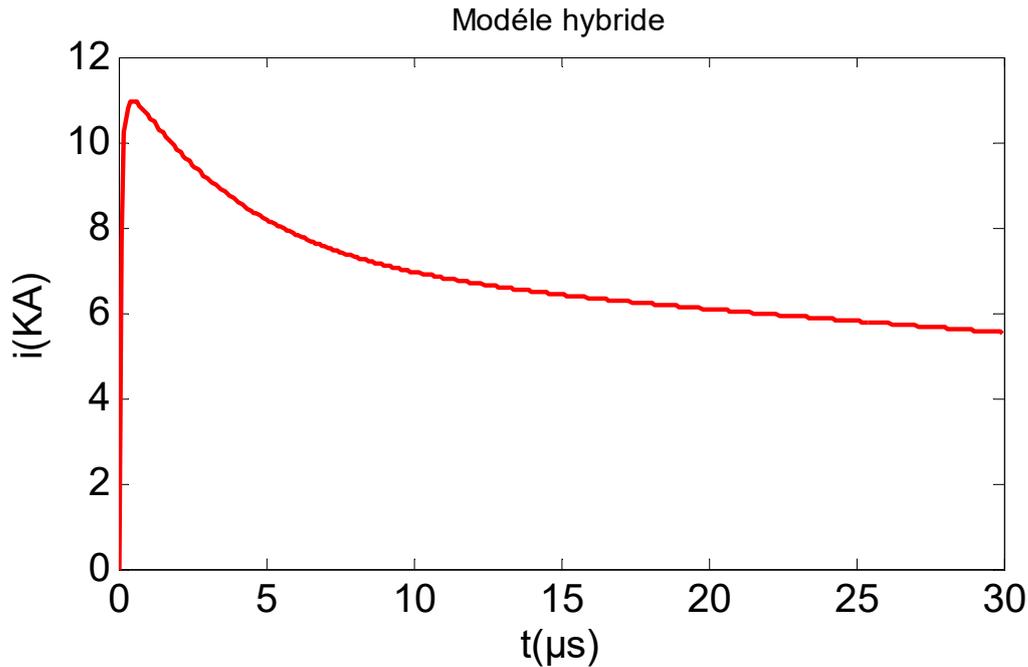


Figure III-6 Courant à la base du canal de foudre simulé à l'aide du modèle hybride

### III.5 Extension des modèles d'ingénieur pour prendre en compte les objets élevés (cas des tours):

#### III.5.1 Modèle de Rachidi

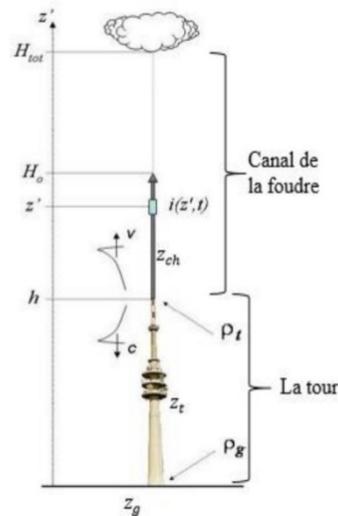
Rachidi *et al.* [44] ont développé des modèles classiques en prenant en compte la présence d'une tour haute, où un courant  $i_0(t)$  est injecté au sommet de la tour, générant deux impulsions de courant, l'une se propageant le long de la tour et l'autre le long du canal de la foudre. L'onde ascendante se propage le long du canal à une vitesse  $v$ , tandis que l'onde descendante se propage le long de la tour à la vitesse de la lumière  $c$ . La tour est considérée comme une ligne de transmission longue avec une impédance caractéristique  $Z_t$  et des coefficients de réflexion constants  $\rho_t$  et  $\rho_g$  aux sommets et à la base, respectivement.

Pour :  $0 \leq z' \leq h$

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \rho_t^n \rho_g^n i_0 \left( h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_0 \left( h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] u \left( t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \quad \text{III.12}$$

Pour :  $h \leq z' \leq H$

$$I(z', t) = \left[ p(z' - h) i_0 \left( h, t - \frac{z'-h}{v} \right) - \rho_t i_0 \left( h, t - \frac{z'-h}{c} \right) + (1 - \rho_t)(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_0 \left( h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] u \left( t - \frac{z'+h}{v} \right) \quad \text{III.13}$$



**Figure III-7** Propagation des impulsions de courant le long du canal et le long de la tour

Les paramètres dans les équations (III.12) et (III.13) sont :

$h$ : Hauteur de la tour

$\rho_t$  et  $\rho_g$ : sont respectivement les coefficients de réflexion du courant au sommet et à la base de la tour,

$c$  : vitesse de la lumière

$v$ : vitesse du front de l'arc en retour

$v^*$  : vitesse de propagation de l'onde du courant

$P(z')$  : Facteur d'atténuation du courant

$u(t)$  : Fonction unit

$n$  : Nombre de réflexions aux deux extrémités de la tour

### III.5.2 Modèle de *Baba et Rakov*

En 2005, *Baba et Rakov* [45] ont proposé une méthode alternative pour décrire la répartition spatiotemporelle du courant de l'arc de retour, que ce soit le long du canal de la foudre ou sur une structure élevée. Dans leur modélisation, ils ont utilisé le courant de court-

circuit  $i_{sc}(t)$  pour représenter cette distribution. Ils ont ainsi formulé un ensemble d'équations illustrant ce modèle, comme suit:

Pour  $0 \leq z' \leq h$

$$i(z', t) = \frac{1-\rho_t}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \rho_t^n \rho_g^n i_{sc} \left( h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \\ + \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_{sc} \left( h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right] \quad \text{III.14}$$

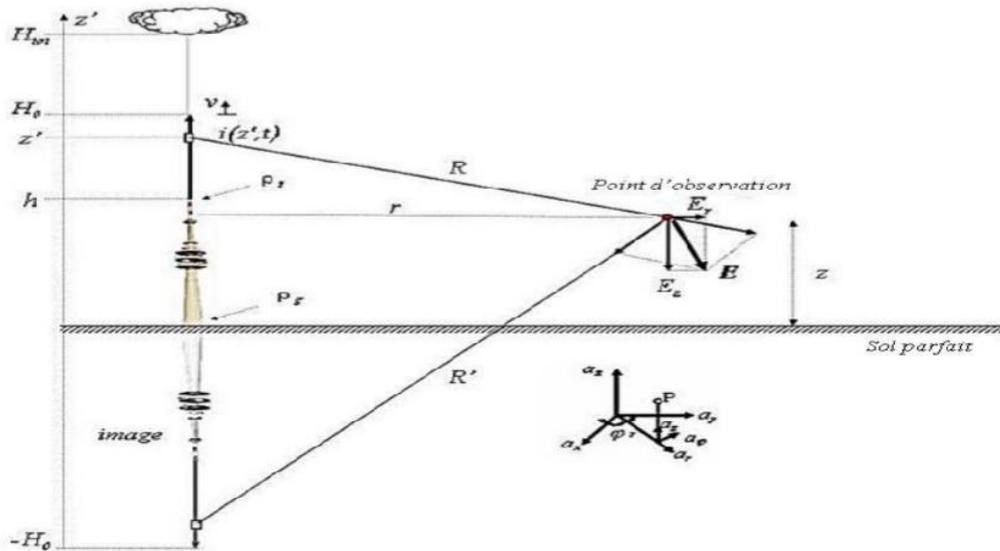
Pour  $z' \geq h$

$$I(z', t) = \frac{1-\rho_t}{2} \left[ \begin{array}{l} I_{sc} \left( h, t - \frac{h-z'}{c} \right) \\ + \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^n \rho_t^{n-1} (1 + \rho_t) I_{sc} \left( h, t - \frac{h+z'}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right] \quad \text{III.15}$$

### III.6 Champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour

Les modèles géométriques sont utilisés pour calculer le courant de l'arc en retour le long du tour et du canal en cas de foudre provenant d'un objet élevé. Le champ électromagnétique est calculé en utilisant la même géométrie que celle employée lorsque la foudre provient du sol, comme illustré dans la figure III.8.

La tour est généralement représentée par une ligne de transmission homogène et sans pertes. Cependant, ce qui change, c'est la manière dont le champ est calculé, où la distribution spatio-temporelle du courant le long du conducteur vertical  $i_0(z', t)$  est remplacée par deux distributions de courant différentes, l'une le long du canal de la foudre et l'autre le long de la tour [46].



**Figure III-8** Représentation géométrique du problème pour le calcul du champ électromagnétique généré par la foudre en présence d'une tour [46].

### III.7 Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)

#### III.7.1 Origine de la FDTD

Si la fonction  $f(x)$  ait été développée en série de *Taylor* par un décalage autour du point  $x_0$  [47].

$$f\left(x_0 + \frac{\delta}{2}\right) = f(x_0) + \frac{\delta}{2} f'(x_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 f''(x_0) + \frac{1}{3!} \left(\frac{\delta}{2}\right)^3 f'''(x_0) + \dots \quad \text{III.16}$$

$$f\left(x_0 - \frac{\delta}{2}\right) = f(x_0) - \frac{\delta}{2} f'(x_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 f''(x_0) - \frac{1}{3!} \left(\frac{\delta}{2}\right)^3 f'''(x_0) + \dots \quad \text{III.17}$$

Le premier terme du côté gauche représente la dérivée de la fonction au point  $x_0$ , auquel s'ajoute un paramètre dépendant de  $\delta^2$  et un nombre infini de paramètres non définis. Les concepts suivants dépendent de puissances croissantes de  $\delta$  comme  $\delta^4$  et au-delà:

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + \frac{\delta}{2}) - f(x_0 - \frac{\delta}{2})}{\delta} + O(\delta^2) \quad \text{III.18}$$

Le terme "0" fait référence aux expressions non spécifiées, et  $\delta^2$  représente le plus bas ordre de  $\delta$ . Si  $\delta$  est suffisamment petit, la dérivée peut être estimée en ignorant ces expressions non spécifiées. L'approximation de la différence centrale est alors obtenue en conséquence:

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \approx \frac{f(x_0 + \frac{\delta}{2}) - f(x_0 - \frac{\delta}{2})}{\delta} \quad \text{III.19}$$

La méthode de la différence centrale est utilisée pour estimer la dérivée en un point  $x_0$  en utilisant les points voisins. Étant donné que l'erreur due à l'approximation de  $\delta$  est d'ordre 2, la précision de l'estimation est également d'ordre 2. Cela signifie que si  $\delta$  est réduit d'un facteur 10, l'erreur diminue d'un facteur 100, et lorsque  $\delta$  tend vers zéro, l'estimation devient exacte.

### III.7.2 L'algorithme de Yee

L'algorithme FDTD présenté par *Kane Yee* en 1966 utilise la différenciation centrale du second ordre pour calculer les variations des champs électriques et magnétiques dans le temps et l'espace. Les étapes principales de l'algorithme sont les suivantes:

1. Remplacer les dérivées dans les lois de *Maxwell* (loi d'*Ampère* et loi de *Faraday*) par des différences finies.
2. Diviser l'espace et le temps en un maillage régulier, avec des différences dans les positions des champs électriques et magnétiques (figure III-9).
3. Calculer les champs électriques et magnétiques à différents instants en fonction des valeurs précédentes des champs.
4. Répéter ce processus dans le temps pour obtenir une distribution complète des champs sur la période de temps souhaitée.

En résumé, l'algorithme FDTD utilise les différences finies pour calculer l'évolution des champs à travers un maillage spatial et temporel.

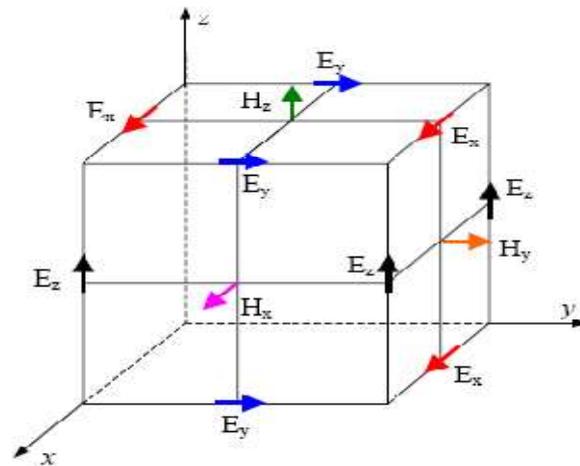


Figure III-9 La cellule de Yee en 3D et en coordonnées cartésiennes [47]

### III.7.3 Principe de la méthode FDTD

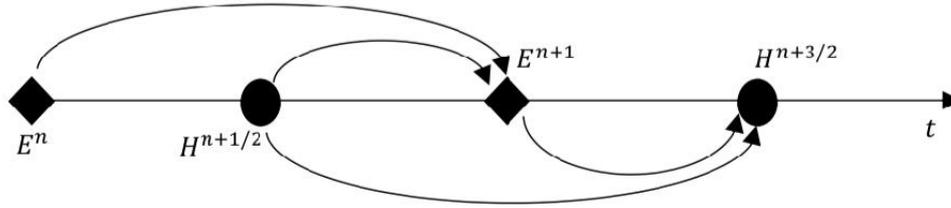
La base théorique de la technique FDTD est simple ; elle consiste à discrétiser les équations de *Maxwell* dans le temps et l'espace en utilisant la méthode des différences centrales pour traiter les problèmes électromagnétiques.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\mu(\partial \vec{H})}{\partial t} \quad \text{III.20}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{\varepsilon(\partial \vec{E})}{\partial t} \quad \text{III.21}$$

Les symboles utilisés dans les équations sont les suivants:

- $E$  : champ électrique.
- $H$  : champ magnétique.
- $\mu$  : perméabilité magnétique.
- $\sigma$  : conductivité électrique.
- $\varepsilon$  : perméabilité diélectrique du milieu.



**Figure III-10** Principe de la discrétisation temporelle [38]

L'équation III.20 permet de calculer la dérivée temporelle du champ magnétique en fonction de la dérivée spatiale du champ électrique, tandis que l'équation III.21 permet de calculer la dérivée temporelle du champ électrique en fonction de la dérivée spatiale du champ magnétique. Chaque champ est déplacé alternativement dans le temps à l'aide de ces équations, une méthode connue sous le nom de "Leap Frog" (Figure III-10).

La discrétisation spatiale et temporelle dans les coordonnées cartésiennes en trois dimensions des équations (III.20) et (III.21) par la méthode FDTD utilise un schéma de différences finies centrées permet d'écrire [48] :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad \text{III.22}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad \text{III.23}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad \text{III.24}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x \right) \quad \text{III.25}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} - \sigma E_y \right) \quad \text{III.26}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma E_z \right) \quad \text{III.27}$$

### III.7.4 FDTD-3D en coordonnées cartésiennes

L'utilisation de la méthode FDTD en trois dimensions demande la division du volume de travail en cellules cubiques ou en parallélépipèdes rectangulaires dont les dimensions sont  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ . Comme illustré dans la figure III.9, les composantes du champ électrique sont situées aux centres des côtés de la cellule, ainsi que les éléments du champ magnétique sont positionnées aux centres des faces de la cellule.

La formule suivante permet de déterminer la loi d'Ampère pour avoir les composantes du champ électriques suivant les trois directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  [48] :

$$\nabla \times H^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + J^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma E^{n-\frac{1}{2}} \quad \text{III.28}$$

Lorsque l'approximation des différences finies centrées est appliquée à l'équation (III-28) on obtient :

$$\varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma E^{n-\frac{1}{2}} \approx \varepsilon \frac{E^n - E^{n-1}}{\Delta t} + \sigma \frac{E^n - E^{n-1}}{2} \approx \nabla \times H^{n-\frac{1}{2}} \quad \text{III.29}$$

Le réarrangement de l'équation (III.29), donne la forme suivante du champ électrique en fonction d'une boucle carrée composée de quatre composantes du champ magnétique :

$$E^n = \left( \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \right) E^{n-1} + \left( \frac{\frac{\Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \right) \nabla \times H^{n-\frac{1}{2}} \quad \text{III.30}$$

Partons de la formule (III.30), l'équation du champ électrique  $E_x$  situé au point  $(i+1/2, j, k)$  peut être exprimée de la manière suivante:

$$E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) = \frac{1 - \frac{\sigma \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}} E_x^{n-1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}} \left[ \frac{H_z^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right)}{\Delta z} \right]$$

III.31

Les équations décrivant les composantes  $E_y$  et  $E_z$  du champ électrique peuvent être déduites de la même façon et elles sont écrites comme suit :

$$E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) = \frac{1 - \frac{\sigma \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}} E_y^{n-1} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}} \left[ \frac{H_x^{n-1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n-1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2} \right)}{\Delta z} - \frac{H_z^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n-1/2} \left( i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta x} \right]$$

III.32

$$E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) = \frac{1 - \frac{\sigma \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}}{1 + \frac{\sigma \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}} E_z^{n-1} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}}{1 + \frac{\sigma \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta t}{2\varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}} \cdot \left[ \frac{H_y^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n-1/2} \left( i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n-1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n-1/2} \left( i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} \right]$$

III.33

La loi de *Faraday* est exprimée par la formule suivante :

$$\nabla \times E^n = -\mu \frac{\partial H^n}{\partial t}$$

III.34

On obtient l'expression suivante en utilisant l'approximation des différences finies centrées pour l'équation (III.34) :

$$\mu \frac{\partial H^n}{\partial t} \approx \mu \frac{H^{n+\frac{1}{2}} - H^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \approx -\nabla \times E^n$$

III.35

Le réarrangement de l'équation (III.35) donne l'expression du champ magnétique qui s'exprime de la manière suivante:

$$H^{n+\frac{1}{2}} = H^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times E^n$$

III.36

D'après l'équation (III.36), on peut représenter la composante  $H_x^{n+\frac{1}{2}}$  du champ magnétique située au point  $(i, j+1/2, k+1/2)$  de la manière suivante :

$$H_x^{n+1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) = H_x^{n-1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right)} \cdot \left[ \frac{E_z^n \left( i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} - \frac{E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta z} \right] \quad \text{III.37}$$

Les équations des composantes  $H_y^{n+1/2}$  et  $H_z^{n+1/2}$  sont obtenue de la même façon :

$$H_y^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) = H_y^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right)} \cdot \left[ \frac{E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k + 1 \right) - E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta z} - \frac{E_z^n \left( i + 1, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta x} \right] \quad \text{III.38}$$

$$H_z^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) = H_z^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - \frac{\Delta t}{\mu \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)} \cdot \left[ \frac{E_y^n \left( i + 1, j + \frac{1}{2}, k \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta x} - \frac{E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta y} \right] \quad \text{III.39}$$

Le calcul des composantes  $E_x^n, E_y^n, E_z^n, H_x^{n+1/2}, H_y^{n+1/2}$  et  $H_z^{n+1/2}$ , permet l'évaluation du champ électromagnétique à tous les points de l'espace de travail et à tout instant de la durée concernée par ce calcul.

### III.7.5 Critère de stabilité de la méthode FDTD

Pour obtenir une stabilité de calcul par la mise en œuvre de la méthode FDTD-3D on peut agir sur la condition du *Courant, Friedrich et Levy* (connue sous le nom de CFL), qui donne une relation entre les pas de discrétisation spatiale et le pas temporel [48]. Cette condition est exprimée par la formule suivante :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (\text{III.40})$$

$c$  : étant la vitesse de la lumière.

### III.7.6 Conditions aux limites

L'évaluation du champ électromagnétique en exploitant la méthode FDTD demande l'étude des conditions aux limites pour le but de déterminer le mode de propagation (soit continu sans réflexion soit discontinu c-a-d l'existence des obstacles). il existe des conditions appelées les « condition aux limites parfaitement conductrices, 'Perfect electric conductor PEC' ». Ainsi, pour la propagation continue du champ on fait appel aux conditions aux limites dit "Conditions aux limites absorbantes" (*Absorbing Boundary Conditions ABC*). Ces dernières sont présentées par les conditions suivantes [48]:

- ✓ Conditions aux limites de *Mur*,
- ✓ Conditions aux limites PML (Perfectly Matched Layer),
- ✓ Conditions aux limites UPML (Pniaxial Perfectly Matched Layer)

Dans notre travail on adopte les conditions aux limites UPML

### III.7.7 Conditions aux limites UPML de *Taflove*

*Taflove* [35] a proposé des modifications pour les conditions aux limites PML développées par *Brenger* [49]. Ces modifications fait appel aux densités des champs électrique et magnétique permettant la réduction du nombre des équations à douze équations au lieu de dix-huit équations pour les conditions PML. La diminution du nombre d'équations obtenue par la mise en œuvre de la formulation de *Taflove* donne la possibilité de gagner considérablement le temps calcul et l'espace mémoire du calculateur utilisé [35, 48].

Les équations relatives aux composantes principales du champ électrique et du champ magnétique ainsi que leurs densités sont exprimées mathématiquement par les formules suivantes [35, 48] :

$$D_x^{n+1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) = \left( \frac{2\varepsilon k_y - \sigma_y \Delta t}{2\varepsilon k_y + \sigma_y \Delta t} \right) \cdot D_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) + \left( \frac{2\varepsilon \Delta t}{2\varepsilon k_y + \sigma_y \Delta t} \right).$$

$$\left[ \frac{H_z^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right)}{\Delta z} \right]$$

III.41

$$E_x^{n+1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) = \left( \frac{2\varepsilon k_z - \sigma_z \Delta t}{2\varepsilon k_z + \sigma_z \Delta t} \right) \cdot E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) + \left[ \frac{1}{(2\varepsilon k_z + \sigma_z \Delta t) \varepsilon} \right].$$

$$\left[ (2\varepsilon k_x + \sigma_x \Delta t) \cdot D_x^{n+1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) - (2\varepsilon k_x - \sigma_x \Delta t) \cdot D_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right]$$

III-42

$$B_x^{n+3/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) = \left( \frac{2\varepsilon k_y - \sigma_y \Delta t}{2\varepsilon k_y + \sigma_y \Delta t} \right) \cdot B_x^{n+1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{2\varepsilon \Delta t}{2\varepsilon k_y + \sigma_y \Delta t} \right).$$

$$\left[ \frac{E_z^{n+1} \left( i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^{n+1} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} - \frac{E_y^{n+1} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^{n+1} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta z} \right]$$

III.43

$$H_x^{n+3/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) = \left( \frac{2\varepsilon k_z - \sigma_z \Delta t}{2\varepsilon k_z + \sigma_z \Delta t} \right) \cdot H_x^{n+1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) + \left[ \frac{1}{(2\varepsilon k_z + \sigma_z \Delta t) \mu} \right].$$

$$\left[ (2\varepsilon k_x + \sigma_x \Delta t) \cdot B_x^{n+3/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - (2\varepsilon k_x - \sigma_x \Delta t) \cdot B_x^{n+1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \right]$$

III.44

Les composantes  $D_y, D_z, E_y, E_z, B_y, B_z, H_y, H_z$  sont obtenues par le même raisonnement que les composantes décrites par les équations III.41 à 44.

Les coefficients suivants sont exploités afin de faciliter la mise en œuvre numérique de ces équations, [35, 48] :

$$C_1(j) = \frac{2\varepsilon k_y - \sigma_y \Delta t}{2\varepsilon k_y + \sigma_y \Delta t} \quad \text{III.45}$$

$$C_2(j) = \frac{2\varepsilon \Delta t}{2\varepsilon k_y + \sigma_y \Delta t} \quad \text{III.46}$$

$$C_3(k) = \frac{2\varepsilon k_z - \sigma_z \Delta t}{2\varepsilon k_z + \sigma_z \Delta t} \quad \text{III.47}$$

$$C_4(k) = \frac{1}{(2\varepsilon k_z + \sigma_z \Delta t)\varepsilon} \quad \text{III.48}$$

$$C_5(i) = 2\varepsilon k_x + \sigma_x \Delta t \quad \text{III.49}$$

$$C_6(i) = 2\varepsilon k_x - \sigma_x \Delta t \quad \text{III.50}$$

Avec :

$$\sigma_x(x) = \left(\frac{x}{d}\right)^m \cdot \sigma_{max} \quad \text{III.51}$$

$$k_x(x) = 1 + (k_{x,max} - 1) \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^m \quad \text{III.52}$$

$$\sigma_{max} = -\frac{(m+1)\ln(R(0))}{2\eta d} \quad \text{III.53}$$

$$R(\theta) = e^{-2\eta \cos\theta \int_0^d \sigma(x) dx} \quad (\text{Erreur de réflexion}) \quad \text{III.54}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad \text{III.55}$$

$d$ : épaisseur de la région PML.

$x$ : un entier positif correspondant au numéro de la couche UPML ( $0 < x < d$ ).

La mise en œuvre des coefficients représentées par les équations III-45 à 50, permet de calculer à la fois le champ électromagnétique dans l'ensemble de l'espace de travail et la région PML. Les paramètres  $\sigma$  et  $k$  dans le volume de travail sont proportionnels à la nature du milieu en question. Pour le vide (air) où  $\sigma=0$  et  $k=1$  sont valables. Tandis que,  $\sigma$  et  $k$  sont des polynômes dans la région PML dont les équations mathématiques sont données par les équations III-52 et III-53 respectivement. Ainsi, les coefficients  $D_y, D_z, E_y, E_z, B_y, B_z, H_y, H_z$  sont obtenus en adoptant le même développement [35, 48].

### III.8 Application de la méthode FDTD pour le calcul du champ électromagnétique de la foudre tombant sur une éolienne

Les éoliennes sont représentées comme des tours pour étudier l'environnement électromagnétique de l'arc de retour généré par l'interaction de celles-ci avec un coup de foudre, en utilisant les équations de *Taflove* citées précédemment pour calculer le champ électromagnétique autour de l'éolienne, basé sur la géométrie présentée dans la figure III.11. Les calculs sont effectués à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol, et une distance horizontale par rapport à l'éolienne égale à 500 m, en tenant compte des coefficients de réflexion au sommet et à la base de la tour ( $\rho_t = -0.5$  et  $\rho_g = 1$ ). L'éolienne mesure 155 mètres de hauteur. Les calculs sont effectués à l'aide de l'environnement Matlab. Le courant au sommet de l'éolienne (point d'attachement entre la foudre et la pale de l'éolienne) est calculé à l'aide du modèle des deux fonctions d'*Heidler*, associé par les paramètres consignés sur le tableau III-5. Ainsi, la distribution spatiotemporelle du courant le long du canal de foudre et le long la tour de l'éolienne est simulé par la mise en œuvre numérique du modèle de *Baba et Rakov*, basé sur le model TL étendu pour la prise en compte des objets élevés. De plus, dans cette présente étude le sol est considéré comme un sol parfaitement conducteur (caractérisé par une valeur infinie pour sa conductivité électrique). De plus, les dimensions le volume de travail concerné par l'étude sont :  $2000 \times 500 \times 1000$  m. Cet espace est discrétisé en des cellules cubiques ayant une longueur de cote égale 5m. Le pas temporel est réglé à 2 ns.

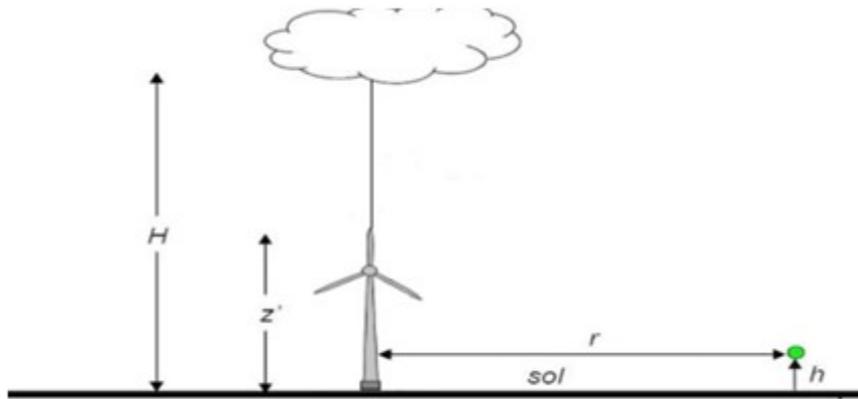


Figure III-11 Géométrie du problème

	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	$n_1$	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	$n_2$
<b>Arc subséquent</b>	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

Tableau III-5 Paramètres du courant de l'arc en retour subséquent [50].

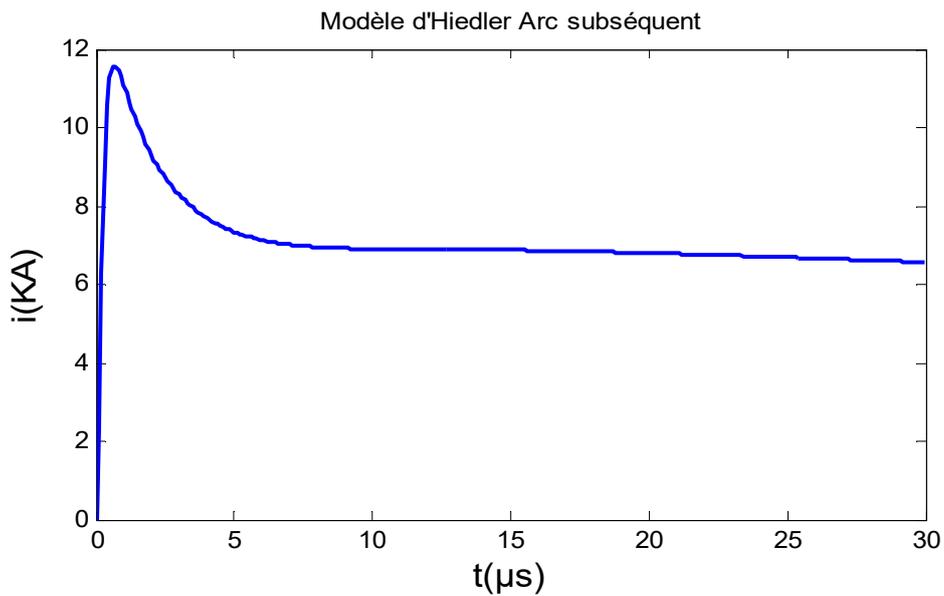
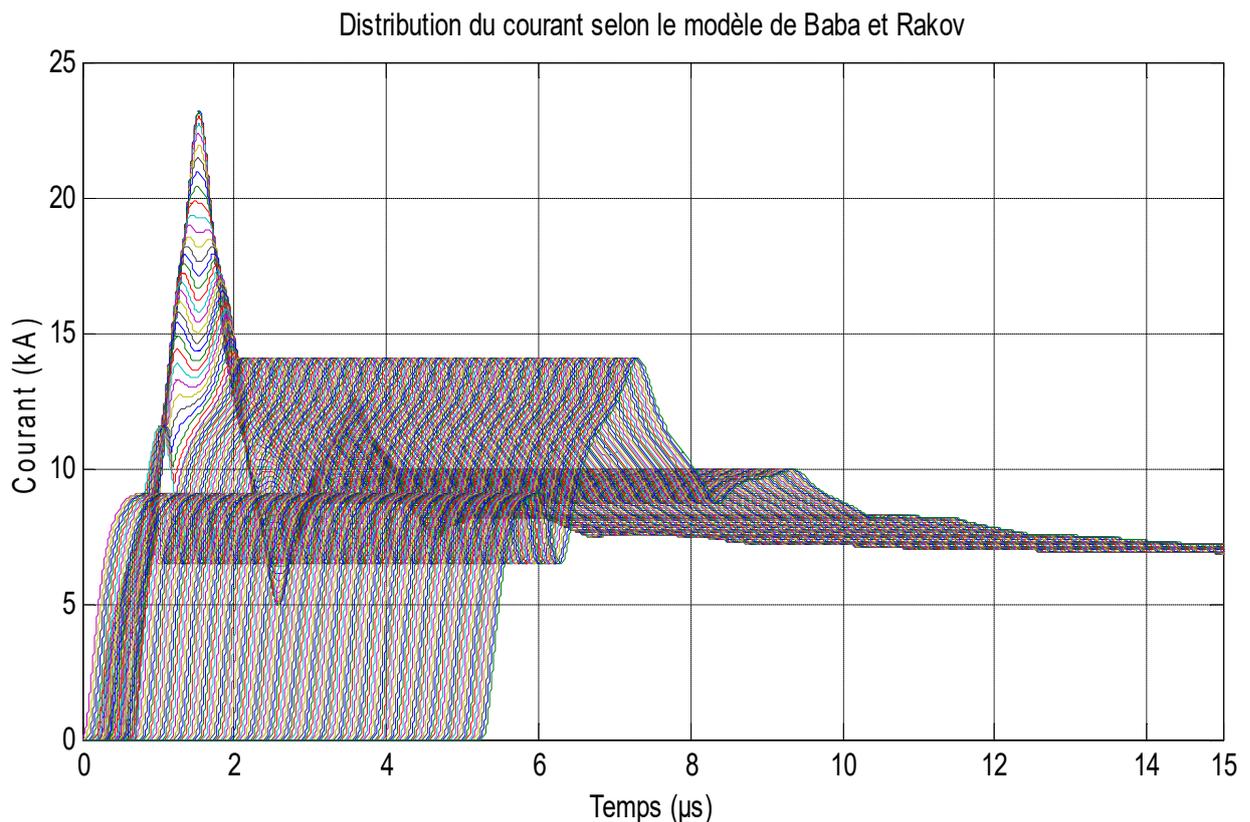


Figure III-12 Courant calculé au sommet de l'éolienne

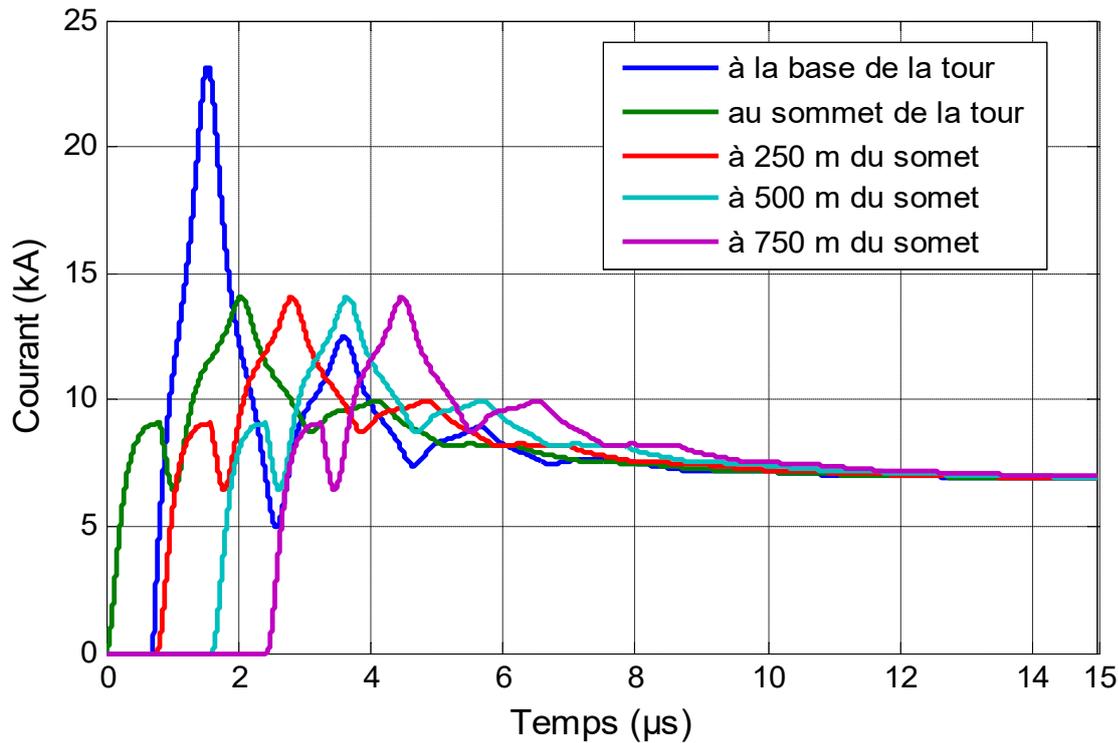
La forme du courant à la base du canal de foudre est illustrée dans la figure III.12, avec un pic de 12 kA et temps de montée égale à  $0.7 \mu\text{s}$ .

Après avoir calculé le courant au sommet de la tour de l'éolienne et exactement au niveau de la tête pointée de sa pale, ce courant est exploité pour simuler la distribution spatiotemporelle du courant le long de la tour de l'éolienne et le long du canal de foudre. Pour atteindre ce but nous avons appuyé sur le modèle de *Baba et Rakov* présenté par les équations III-14 et III-15.

Ainsi, la mise en œuvre numérique de ces deux équations a permis d'obtenir les résultats configurés sur la figure III-13. Ces résultats sont calculés à chaque pas de discrétisation spatiale le long du canal de foudre et le long de la tour éolienne (ce pas spatial est égal à 5m), et aussi le courant est simulé sur l'axe temporel de 15  $\mu\text{s}$  pour 2ns comme un pas de calcul.



**Figure III-13** Distribution spatiotemporelle du courant le long de l'éolienne et le long du canal de foudre calculée à l'aide du modèle de *Baba et Rakov*.



**Figure III-14** Courant calculé à cinq différents points distribués le long du canal de foudre et le long de la tour éolienne

Partons du fait que les allures tracées sur la figure III-13 sont concaténées et il est difficile d'extraire des informations à partir de ces résultats afin de faire les comparaisons nécessaires, nous avons placé dans ce travail autres résultats, qui son présenté par la figure III-14. Cette dernière illustre le courant calculé en cinq différents points situé soit, sur le canal de foudre soit sur la tour éolienne. Ces points sont localisés au sommet et la base de l'éolienne, et des altitudes égales à 250m, 500m, 750m par rapport à la pale frappée par la foudre.

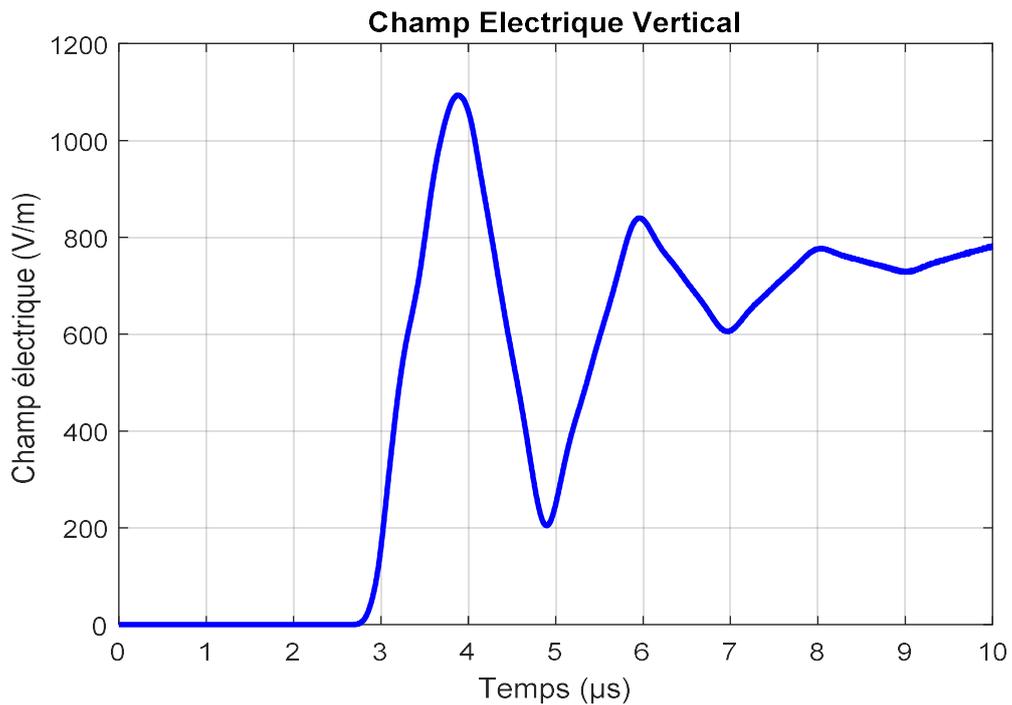
A l'issue des résultats présentés sur la figure III-14 on peut clairement remarquer que l'amplitude la plus supérieure est remarquée à la base de la tour éolienne, cela revient à la somme de l'onde du courant incidente avec l'onde du courant réfléchi qui se coïncident en même temps à ce point (la base de la tour éolienne au niveau du sol). De plus, les résultats simulés au niveau du sommet de la tour éolienne (au niveau de la pale), ainsi que ceux calculés en trois points le long du canal de foudre, sont caractérisés par la même forme d'onde et par valeurs égales. Cette dernière remarque est due à l'utilisation du modèle TL qui stipule que le courant de foudre propage le long du canal sans atténuation et sans distorsion. De plus,

les oscillations qui sont apparait sur les formes d'onde sont causées par les multi-réflexions de l'onde du courant entre la base et la tête de la pale de la tour éolienne.

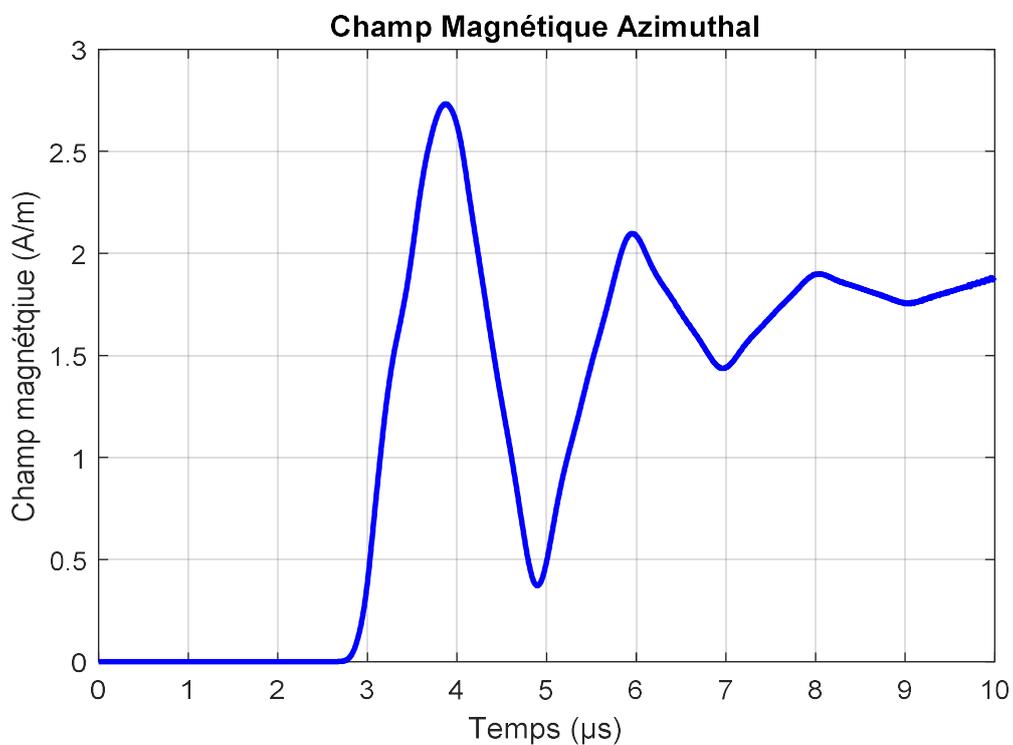
Comme nous savons que dans les études de la compatibilité électromagnétique le courant de la foudre est considéré comme une source intense des perturbations électromagnétiques qui entrave le bon fonctionnement des différents systèmes électriques et/ou électroniques. Dans notre cas d'étude, le courant qui se produit par l'interaction d'un coup de foudre avec une éolienne, et qui se propage le long de la tour de cette éolienne et le long du canal foudre, génère un champ électromagnétique propageant dans l'air.

De plus, en exploitant la méthode FDTD-3D et le modèle de *Baba et Rakov* nous avons calculé les composantes du champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne. Les composantes en question sont le champ électrique vertical et le champ magnétiques azimuthal.

La figure III-15 et III-16 présente les résultats de simulation du champ électromagnétique. Le champ électrique vertical  $E_z$  est tracé sur la figure III-15. Selon l'allure illustrée sur cette figure on peut constater que le champ électrique vertical est caractérisé par un premier pic dont l'amplitude égale à 1,1 kV/m et il atteint cette valeur dans un temps de montée égale à 1  $\mu$ s. De plus, il existe des oscillations sur la forme d'onde qui sont dus aux réflexions du courant entre le sommet et la base de l'éolienne. L'écart entre les valeurs maximales et les valeurs minimales de chaque pic est diminué avec la progression du temps, car la foudre est un phénomène transitoire qui se disparaître avec le passage du temps. Les résultats calculés pour la composante azimuthal du champ magnétique sont montrés par la figure III-16. A l'issue de ces résultats, le champ magnétique est aussi caractérisé par une oscillante ayant un premier pic égale à 2.75 A/m et un temps de montée égale 1  $\mu$ s. Ainsi, les mêmes remarques concernant la forme d'onde du champ électrique sont signalées pour le champ magnétique du point de vue oscillations et écart entre le maximum et le minimum des pics.



**Figure III-15** Variations temporelles du champ électrique vertical calculées à 500m par rapport à l'éolienne et à une hauteur de 10m par rapport à la surface du sol.



**Figure III-16** Variations temporelles du champ magnétique azimuthal calculées à 500m par rapport à l'éolienne et à une hauteur de 10m par rapport à la surface du sol.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, une analyse détaillée des modèles de courant d'arc de retour a été présentée, avec une extension pour inclure des objets élevés tels que les éoliennes. La méthode utilisée pour calculer le champ électromagnétique résultant de l'interaction entre la foudre et les éoliennes a également été abordée. L'analyse a commencé par l'étude des différents modèles de courant d'arc de retour, en choisissant le modèle d'ingénieur comme base. Ce modèle a ensuite été adapté pour prendre en compte l'impact des objets élevés tels que les pales des éoliennes. Enfin, la méthode FDTD-3D a été adoptée pour calculer le champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne utilisant Matlab. Cela a permis d'évaluer les champs électromagnétiques autour des éoliennes, et sert à améliorer les procédures de protection de ces structures voisines des éoliennes et même aide à une conception robuste pour les systèmes placés sur ces éoliennes.

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion générale**

L'objectif fondamental de cette recherche est de déterminer les composantes du champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour éolienne. Pour atteindre ce but, nous avons appuyé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel en trois dimensions (FDTD-3D), associée au modèle de *Baba et Rakov* pour la distribution spatiotemporelle du courant le long du canal de foudre et le long de la tour éolienne.

Dans un premier temps, nous avons entamé le phénomène de la foudre, en joutant une lumière sur les différents façades liées à ce phénomène naturel. Puis, nous avons intéressé à la présentation générale des systèmes éoliennes, en donnant les idées générales concernant les systèmes de production de l'énergie électrique en utilisant l'énergie éolienne comme énergie primaire.

Par la suite, la modélisation du courant et la simulation du courant de la foudre en adoptant les modèles dédiés au courant à la base des canal, la distribution du courant le long du canal ainsi que les modèles étendus pour prise en compte la présence d'un objet élevé a été présentée et discutée. Ainsi, la modélisation du champ électromagnétique en se basant sur les équations de *Maxwell* et la méthode FDTD-3D a été élaborée. Sur la base de cette méthode les variations temporelles des composantes du champ électromagnétique généré par l'interaction foudre-éolienne ont été calculées et analysées.

Les résultats ont montré que l'approche exploitée dans notre travail, présente une bonne procédure pour modéliser, simuler, discuter et analyser à la fois la distribution du courant le long du canal de foudre et le long de la tour éolienne, ainsi que les composantes du champ électromagnétiques rayonnées par l'interaction foudre-éolienne.

Cette étude représente l'étape préventive pour quantifier les effets des champs électromagnétiques générés par un coup de foudre qui frappe une tour d'éolienne sur les différents systèmes qui se trouvent en voisinage de ces tours, ainsi que pour avoir une protection optimale contre ces effets.

Enfin, nous espérons qu'à l'aide de ce travail nous avons donné un aperçu sur le sujet des perturbations électromagnétiques générées par la foudre en présence d'une tour éolienne, ce qui peut encourager des futurs travaux dans ce même domaine.

Comme perspective nous proposons les travaux suivants :

✓ L'étude de l'interférence entre les systèmes d'énergie éolienne et les perturbations électromagnétiques causées par la foudre.

✓L'intégration de la conductivité limitée du sol dans les modèles de calcul du champ électromagnétique.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] D. Khelil, “Contribution à la modélisation de la décharge de foudre dans un environnement protégé,” Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2019.
- [2] C. Gary and M. P. Demazure, « La foudre: nature, histoire, risques et protection », 3<sup>rd</sup> ed. Paris, france: Dunod, 2004
- [3] E. Perrin, « Modélisation des effets indirects de la foudre sur avion composite » Thèse de doctorat, Limoges, 2010.
- [4] C. Gary, « La Foudre. Des Mythologie Antiques A La Recherche Moderne », 2eme ed. Elsevier Masson, 1994
- [5] J.R. Dwyer and M. A. Uman, “The physics of lightning,” Physics Reports, vol. 534, no. 4, pp. 147–241, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.physrep.2013.09.004
- [6] M.A. Uman “The lightning discharge”, Dover Publications, INC, Mineola. New York, 2001.
- [7] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, “Parameters of lightning flashes,” Electra, vol. 80, pp. 223–237, 1975
- [8] V. Shostak “Modeling of return stroke current for lightning events at a complex tall structures”, International Workshop on Electromagnetic radiation from lightning to tall structures, pp. 4, Toronto, Canada, 2001
- [9] K. Berger, R.B.Anderson, H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes", Electra. No. 41,1975.
- [10] G. Diendorfer, M. Mair, and W. Schulz "Detailed brightness versus lightning current amplitude correlation of flashes to the Gaisberg tower", 26<sup>th</sup> ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 8-13, Cracow, Poland, 2002
- [11] J. Jerauld et al., "An evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning," Journal of Geophysical Research, vol. 110, Oct. 2005, doi: 10.1029/2005JD005924
- [12] V. A. Rakov, “Fundamentals of Lightning”, 1<sup>st</sup> edition. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2016
- [13] Y. T. Lin et al., "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements," Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 84, no. C10, pp. 6307-6314, 1979, doi: 10.1029/JC084iC10p06307

- [14] K. L. Cummins and M. J. Murphy, "An Overview of Lightning Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 3, pp. 499–518, Aug. , 2009doi: 10.1109/TEMC.2009.2023450
- [15] A. Younes "Protection des éoliennes modernes contre La foudre "en vue de l'obtention du diplôme de: Doctorat (L.M.D) Spécialité : Réseaux Électriques Université de Tiaret -2023-2024
- [16] D. Sonia AIT-AMAR and Z. Ahmed, "Protection contre la foudre-Principes généraux et normes en vigueur," p. 32, Feb. 10, 2015.
- [17] B. Piquette, « Protection contre la foudre 'des installations classées pour la protection de l'environnement ». In INERIS Direction des risques accidentels. INERIS – Direction des risques accidentels, 2011
- [18] S. Sadkine, A. Rachedi « Etude d'un système éolienne au réseau base sur une gas auto-excité », Mémoire de Master, Université de Béjaia, 2017
- [19] N. Hamdi « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire magister, Université de Constantine, 2008.
- [20] H. Derbouba « Etude, conception et réalisation d'une éolienne », Mémoire de Master, Université de Biskra, 2016.
- [21] T. Zoheir «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [22] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation». Thèse de Doctorat de Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [23] A. Tebbal et M. Sekhri "Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent" Mémoire de Master en Electrotechnique
- [24] F. Poitiers «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [25] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat de Ecole Militaire polytechnique d'Alger, 2011
- [26] M. Lopez, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unite de production isolée », Thèse de Doctorat de l'Université de paris, 2008

- [27] R. Rouabhi, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée," Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, 2016.
- [28] A. Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT, 2007. Accessed: Jan. 17, 2023.
- [29] A. Khairredine, "Modélisation et analyse de l'intégration d'un jumelage éolien-diesel dans un réseau électrique autonome," Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, ANNABA, 2015.
- [30] M. Smaili, "Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 2013.
- [31] A. Soualmia, "Amélioration de la chute de tension sur réseau BT par l'apport d'un générateur hybride PV/Eolien.," Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri – Constantine1, Constantin, 2020.
- [32] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la Qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I 2018.
- [33] [https://www.researchgate.net/figure/Conversion-de-lenergie-cinetique-du-vent\\_fig1\\_324929383](https://www.researchgate.net/figure/Conversion-de-lenergie-cinetique-du-vent_fig1_324929383)
- [34] M. Kaddour et I. Bouster « Etude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau » Mémoire de Master, Université de Annaba, 2019
- [35] A. Taflove "Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method", first Edition, Artech House, Boston, USA, 1995
- [36] V. A. Rakov and M. A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 40, no. 4, pp. 403-426, Nov. 1998, doi: 10.1109/15.736202.
- [37] V. A. Rakov, "Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements," in Proc. 12<sup>th</sup> Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat, 1997, pp. 59-64.
- [38] A. Mimouni, "analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre," Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf, Oran, 2007.
- [39] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes," Electra, vol. 80, pp. 223–237, 1975

- [40] F. Heidler, "Travelling current source model for LEMP calculations," Proceedings of 6<sup>th</sup> international symposium on EMC, Zurich, Switzerland, 29F2, pp. 157-162, 1985
- [41] F. Rachidi et al., "Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 43, no. 3, pp. 356–367, Aug. 2001, doi: 10.1109/15.942607
- [42] Y. Baba, V. A. Rakov, « On the mechanism of attenuation of current waves propagating along a vertical perfectly conducting wire above ground: Application to lightning », IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility, Vol.47, No. 3, Aout 2005.
- [43] C.A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Janoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel base current: A review and comparison", Journal of Geophysical Research, Vol. 95, n°. D12, pp. 20395-20408, 1990
- [44] F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J. L. Bermudez, "Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 107, no. D23, p. ACL 16-1-ACL 16-6, 2002, doi: 10.1029/2002/0002119
- [45] Y. Baba, M. Ishii, Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures, IEEE Tran. On power delivery, Vol. 16. No. 2, pp. 324-328, April 2001
- [46] J. L. Bermudez, "Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects," Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.
- [47] J. B. Schneider, "Understanding the finite-difference time-domain method," School of electrical engineering and computer science Washington State University, vol. 28, 2010
- [48] K. Arzag « Calcul du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre à l'aide de la méthode FDTD en 3D », thèse doctorat 2017, USTO-MB, Oran, Algérie
- [49] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for absorption of electromagnetic waves", Journal of Computational Physics. Vol.114, 1994, pp 185-200
- [50] F. Rachidi et al., "Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 43, no. 3, pp. 356-367, Aug. 2001, doi: 10.1109/15.942607

## ملخص

يتناول هذا العمل دراسة الاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن تفاعل الصواعق مع التوربينات الهوائية. يستعرض الجزء الأول من الدراسة ظاهرة الصاعقة، بينما يقدم الجزء الثاني لمحة عامة عن طاقة الرياح. أما الجزء الأخير، فيُخصص لدراسة نمذجة ومحاكاة الحقل الكهرومغناطيسي الناتج عن تفاعل الصاعقة مع أبراج التوربينات الهوائية. الهدف الرئيسي كان حساب مكونات الحقل الكهرومغناطيسي الناتج عن ضربة صاعقة، اعتمادًا على طريقة الفروق المنتهية في المجال الزمني ثلاثي الأبعاد (FDTD-3D)، باستخدام نموذج "بابا وراكوف" لتيار القوس الكهربائي الراجع. تتيح هذه المنهجية دراسة دقيقة لتطور الحقل الكهرومغناطيسي الناتج عن تفاعل الصاعقة الرعدية مع شفرات التوربينات الهوائية.

**الكلمات المفتاحية:** الصاعقة الرعدية، التوربينات الهوائية، الحقل الكهرومغناطيسي، لتيار القوس الكهربائي الراجع، FDTD-3D.

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude des perturbations électromagnétiques résultantes de l'interaction de la foudre avec les éoliennes. La première partie du travail présente le phénomène de la foudre. La deuxième partie offre un aperçu général de l'énergie éolienne. Enfin, la dernière partie est consacrée à l'étude de la modélisation et de la simulation du champ électromagnétique émis par l'interaction entre la foudre et les éoliennes. L'objectif principal était de calculer les composantes du champ électromagnétique généré par un coup de foudre en se basant sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel en trois dimensions (FDTD-3D), en utilisant le modèle de *Baba et Rakov* pour le courant de l'arc de retour. Cette approche permet d'étudier avec précision l'évolution du champ électromagnétique résultant de l'interaction entre un éclair descendant et les pales des éoliennes.

**Mots clé:** la foudre, les éoliennes, champ électromagnétiques, courant de l'arc en retour, FDTD-3D

## Abstract

This work focuses on the study of electromagnetic disturbances resulting from the interaction between lightning and wind turbines. The first part of the study presents the phenomenon of lightning, while the second part provides a general overview of wind energy. The final part is dedicated to the modeling and simulation of the electromagnetic field generated by the interaction between lightning and wind turbine tower. The main objective was to calculate the components of the electromagnetic field generated by a lightning strike using the three-dimensional Finite-Difference Time-Domain method (3D-FDTD), based on the *Baba and Rakov* model for the return stroke current. This approach enables an accurate study of the evolution of the electromagnetic field resulting from the interaction between a downward lightning strike and wind turbine blades.

**Key words:** Lightning, wind turbine, electromagnetic field, return stroke current, FDTD-3D