

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTER DE L'ENSEINEMENT SUPERIEURET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

*Université de Jijel*

*Faculté des sciences et de la technologie*

*Département de l'électrotechnique*



*Projet de Fin d'Etude pour l'Obtention du Diplôme de Master en  
Electrotechnique*

**Option :**

**Réseaux électriques**

***Thème***

---

**Comportement Transitoire d'une Mise à la  
Terre pour un Parc Eolien Suite à un Impact  
Direct de Foudre**

---

**Encadré par :**

*Dr. B. Harrat*

**Réalisé par :**

*Mlle. Meroua Boukhouna*

*Année universitaire 2019/2020*

# Remerciement

*Je remercie avant tout « Allah » le tout puissant*

*A mes très chers parents Aucun remerciements ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai pour vous. Merci pour tous vos conseils ainsi que votre soutien et vos encouragements*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au professeur B. Nekhouf d'avoir dirigé ce travail avec une attention soutenue, pour ses grandes qualités scientifiques et humaines, sa disponibilité et le suivi continu de ce travail.*

*A Dr. Bessma .Harrat qui m'a permis de bénéficier de son encadrement, et son aide durant toute la période*

*Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail on particulier : Dr.Bochra.khelifi*

*Je remercie les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail et je remercie tout l'équipe réseaux électrique*

*Enfin, Un remerciement spécial à Ma collègue ...ma Copine...ma sœur Loubna Pour le soutien et l'encouragement qu'elle m'a fourni durant cette période de travail.*

*A ma famille...*

*A tous ceux et celle qui ont une place dans ma vie...*

# *Sommaire*

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités</b>	
<b>Introduction</b> .....	7
<b>I. Les besoins en énergie</b> .....	8
I.1. La part de l'énergie électrique "électricité" .....	8
I.1.1. Hausse de la demande d'électricité.....	8
I.2. Les énergies fossiles .....	9
<b>II. Anticiper l'épuisement des réserves fossiles et faire face à plus de besoin en électricité</b> .....	10
<b>III. Energies renouvelables comme source de production dans le réseau électrique</b> .....	11
III.1. organisation classique du réseau électrique avec sources centralisées.....	11
III.1.1. Structure des réseaux.....	11
III.2. Réseau électrique avec production décentralisée (système électrique hybride).....	12
III.2.1. Systèmes d'énergie hybride avec ferme éolienne.....	14
III.2.1.1. ferme éolienne (parc éolien).....	16
<b>IV. Phénomène de Foudre et ses conséquences</b> .....	17
IV.1. Introduction .....	17
IV.2. Phénoménologie et caractéristiques électriques.....	18
IV.2.1. Modèle électrique du canal de foudre .....	19
IV.3. Point d'impact et effets de la foudre.....	21
IV.3.1. Présence d'un objet élevé foudroyé.....	21
<b>V. Transitoires électromagnétiques de foudre</b> .....	22
V.1. Interaction onde de foudre – réseaux électriques.....	22
V.2. Mode de propagation et conséquences des perturbations transitoires de foudre.....	23
<b>VI. Principes de la protection du réseau électrique contre la foudre</b> ....	25
VI.1. Rôle des systèmes de mise la terre (MALT).....	25
VI.1.1. Réseau de terre.....	26
VI.2. Circuit de terre d'un parc éolien .....	26
VI.2.1. Fonction électrique d'un parc éolien.....	26

VI.2.2. Différentes mises à la terre d'un parc éolien.....	27
VI.2.2.1. Grille de mise à la terre d'une éolienne	27
VI.2.2.2. Mise à la terre du blindage du câble collecteur .....	28
VI.2.2.3. Mise à la terre du poste d'interconnexion.....	30
<b>VII. Notre Problématique : Protection d'un parc éolien contre la foudre.....</b>	<b>31</b>
<b>Références Bibliographiques du chapitre I .....</b>	<b>33</b>

## *Chapitre II : Modèles mathématiques pour l'analyse des transitoires électromagnétiques de foudre*

<b>Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>I. Transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique .....</b>	<b>37</b>
I.1. Catégories des phénomènes transitoires.....	37
I.2. Notions de surtensions .....	38
I.3. Caractérisation des transitoires électromagnétiques .....	39
<b>II. Modélisation des surtensions transitoires dans le réseau électrique.....</b>	<b>40</b>
II.1. Qu'est-ce qu'un modèle ?.....	40
II.2. Pourquoi faut-il modéliser ?.....	40
II.3. Quels sont les différents modèles ?.....	40
II.4. De la modélisation à la simulation numérique.....	41
II.5. Principes de modélisation dans les réseaux électriques .....	41
II.5.1 Méthodes classique pour l'analyse des transitoires .....	41
II.5.2. Méthodes numériques pour l'analyse des transitoires .....	44
II.5.2.1 bref aperçu sur la modélisation par la théorie des antennes .....	45
<b>III. Modélisation du foudroiement d'un parc éolien.....</b>	<b>48</b>
III.1. Choix du modèle mathématique .....	49
<b>IV. Théorie des lignes de transmissions.....</b>	<b>50</b>
IV.1. Introduction .....	50
IV.2. Hypothèses générales pour la théorie des lignes de transmissions.....	51

IV.3. Équations de base des lignes de transmission.....	52
<b>V. Formalisme topologique pour l'analyse des transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique .....</b>	<b>54</b>
V.1. Introductions.....	54
V.2. Formalisme topologique .....	55
V.2.1. Formalisme topologique en fréquentiel.....	56
V.2.2. Formalisme topologique en temporel.....	59
V.2.2.1. Rappel des différences finies points centrés.....	59
V.2.2.2. Discrétisation des équations des lignes de transmissions par les différences finies.....	60
V.2.2.3. Construction du système $[A][X] = [B]$ en temporel.....	62
<b>Conclusion.....</b>	<b>66</b>
<b>Références Bibliographiques chapitre II.....</b>	<b>67</b>

### ***Chapitre III :***

## ***Simulations à l'aide du Formalisme Topologique De L'Interaction Foudre-Ferme Eolienne : Validations et Applications***

<b>Introduction .....</b>	<b>70</b>
<b>I. Validations.....</b>	<b>71</b>
I.1. Validation de la condition aux extrémités pour une prise de terre.....	71
I.2. Confrontation avec BMTL.....	74
I.3. Confrontation avec Simulink sous Matlab.....	79
I.3.1. Simulink.....	79
I.3.2. Analyse de deux éoliennes connectées.....	80
I.4. Confrontation avec NEC-4.....	82
I.5. Validation sur une ferme d'éolienne.....	84
<b>II. Applications .....</b>	<b>88</b>
II.1. Effet du câble d'interconnexion sur la résistance de terre.....	88
II.2. Effet sur le GPR de la forme géométrique de la prise de terre.....	93
II.3. Impact de la tour foudroyée sur la tour mitoyenne .....	95
II.4. Simulation du circuit de terre complet.....	97

<b>Conclusion</b> .....	101
<b>Références Bibliographiques du chapitre III</b> .....	102
<b>Conclusion Générale</b> .....	103

## **Annexe**

### *Expressions pour le calcul des paramètres linéiques des lignes*

<b>I. Equations générales des lignes de transmissions</b> .....	108
<b>II. Représentation d'une électrode enterrée par une ligne de transmission</b> .....	108
<b>III. Conducteurs aériens au-dessus d'un sol de conductivité finie</b> .....	110
<b>VI. Câble simplement isolé et enterré</b> .....	111
<b>Références bibliographiques annexe</b> .....	114

# *Introduction Générale*

---

## ***Introduction Générale***

### **Motivation :**

De par son étendue et son architecture, le réseau de transport d'énergie est soumis à diverses agressions (mécaniques, vent, neige, foudre,.....).

Le phénomène naturel de foudre par son impact direct ou indirect est parmi les principales agressions en mesure d'affecter le réseau électrique. La structure métallique (conductrice) du réseau électrique fait que ces perturbations électromagnétiques sont généralement véhiculées vers les extrémités des lignes où elles peuvent entraîner des dégâts ou des dysfonctionnements plus ou moins importants.

Avec l'arrivée de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables, pour faire face à l'épuisement des énergies fossiles ainsi qu'à leur impact sur le climat, les réseaux électriques hybrides (source centralisée + source décentralisée) vont prendre des extensions plus importantes en intégrant les parcs éoliens et les centrales photovoltaïques.

Les parcs éoliens présentent des caractéristiques particulières ; ils sont généralement installés dans les zones montagneuses en raison de leur fort potentiel éolien, et la hauteur d'une éolienne de forte puissance peut atteindre les deux cent (200) mètres. Les parcs éoliens qui par leur positions géographiques et la hauteur des éoliennes sont ainsi des cibles privilégiées en cas d'épisodes orageux. Les perturbations électromagnétiques, principalement les surtensions transitoires qui affectent la coordination des isolements des équipements du réseau électrique et engendrent des dysfonctionnement voir des détériorations des équipements, générées par la foudre induite sur ce type de site peuvent être produites par un impact direct sur la structure ou encore par un impact sur les réseaux filaires conducteurs alimentant le site.

Les systèmes de protection contre la foudre (Lightning Protection Systems "LPS") sont conçus pour minimiser et même limiter les effets d'un impact direct en canalisant le courant de foudre vers la terre par le trajet le plus direct et tout particulièrement en assurant un choix optimale de la prise de terre qui évite une augmentation rapide du potentiel de la terre (Ground Power Rise) pour protéger les équipements électriques propres au réseau et assure une diminution de la tension de pas et de touchée. Dans le LPS, la prise de terre tient un rôle fondamental.

Le concepteur des systèmes de mise à la terre doit alors trouver les moyens pour réduire l'impédance de terre (résistance transitoire) et pour éliminer les valeurs hors limites. Pour cet objectif, les aspects de conception d'un système de mise à la terre, les méthodes de mesure de la résistivité du sol, les méthodes de calcul des tensions de pas et de contact sont décrites dans la littérature. Aussi, plusieurs outils logiciels ont été développés afin d'appliquer les exigences de la IEEE dans la conception de systèmes de mise à la terre.

### **Définition objectif :**

Les considérations relatives à la conception du système de mise à la terre d'un parc éolien sont particulières et comprennent la mise à la terre de l'éolienne, le câble souterrain de connexion des mises la terre des éoliennes, la mise à la terre du câble collecteur et la mise la terre du poste électrique qui relie le parc au réseau de transport. Le but de la conception d'un système de mise à la terre d'un parc éolien unique est de diminuer les surtensions transitoires tout en assurant un écoulement rapide des courants.

Ce mémoire de Projet de Fin d'Etudes de master en électrotechnique (option : réseaux électriques) se concentre plus particulièrement sur la protection d'un parc éolien contre les transitoires électromagnétiques de foudre lors d'un impact direct. Le but est d'analyser par modélisation numérique le comportement transitoire d'un circuit de terre unique.

Dans la littérature, souvent la modélisation, des transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique, proposée est principalement basée sur la solution numérique des équations de Maxwell pleine onde (Full Wave). Récemment, le groupe de travail C4.501 du CIGRE a publié un guide sur la modélisation appliquée au calcul des phénomènes transitoires électromagnétiques dans les réseaux électriques [II.7]. Pour illustrer ce travail plusieurs applications d'intérêt pour les ingénieurs en réseaux électriques sont proposées. Ce rapport [II.6] commence par un examen des méthodes conventionnelles utilisant la théorie des circuits avec l'hypothèse de propagation TEM en soulignant spécialement ses limites, puis développe un examen des formalismes qui utilisent des équations de Maxwell pleine onde (PEEC, TLM, MoM, ...).

Ces solutions purement numérique en Full Wave sont rigoureuses dans leurs formulations, mais nécessite généralement des passages fréquence-temps et inversement par transformée de Fourier, prohibitives en temps de calcul et surtout difficiles à utiliser

même par un ingénieur de recherche sachant la lourdeur mathématique de ces formalismes (prise en compte de l'interface sol-air et des frontières ouvertes). Aussi, le modèle pour l'éolienne actuellement disponible dans les simulateurs de transitoires adopte plusieurs simplifications qui limitent son applicabilité ; l'impédance du système de mise à la terre est approximée par une résistance qui n'est pas précise pour les études qui impliquent l'injection de courants avec des composants haute fréquence dans le système électrique, tels que les courants de foudre. En effet, dans ce contexte, l'impédance de mise à la terre joue un rôle fondamental dans la détermination de l'élévation du potentiel électrique induite par la foudre dans la tour (éolienne) et dans la terre.

Le but de notre travail est de montrer qu'il est possible de modéliser notre problématique (foudroiement direct d'un parc éolien) en utilisant un modèle complet et simplifié basé sur la théorie des lignes de transmission et la méthode numérique dite Finite Difference Time Domain sans affecter la qualité des résultats et en plus réalisé directement en temporel. L'idée de simplifier la modélisation est justifiée par le fait que le contenu spectral du transitoire dans les réseaux de puissance ne dépasse pas quelques MHz, les dimensions importantes des équipements (éolienne, mise à la terre, câble...) qui peuvent être représentés par de simples conducteurs filiformes, la présence de l'interface sol-air et aussi les frontières ouvertes.

### **Contenu :**

De manière à pouvoir introduire notre sujet, estimer les surintensités et surtensions induites par un impact direct de foudre par modélisation et ensuite de proposer une optimisation des systèmes de protections (circuit de terre), notre mémoire a été divisé en trois chapitres.

Le premier est consacré à la description de la nécessité des énergies renouvelables dans la production de l'électricité, du réseau électrique, du phénomène foudre, d'un parc éolien, des protections et à la présentation détaillée de notre problématique (circuit de terre d'un parc éolien).

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des transitoires électromagnétiques par les méthodes de modélisation, connues à ce jour. Après un bref rappel des méthodes les plus rencontrées, nous avons justifié notre choix de l'utilisation du formalisme topologique en temporel. Nous proposons dans ce deuxième chapitre un exposé détaillé sur son fondement théorique dans le cas d'un réseau de lignes bi-filaires interconnectées par des

réseaux localisés ; cet exposé permettra aussi d'identifier les différentes étapes nécessaires pour l'implémentation sous Matlab du formalisme topologique en temporel.

Dans le troisième chapitre, nous proposons dans un premier temps de valider, sur des applications simples (configurations de dimensions raisonnables) notre travail en confrontant nos résultats de calcul ceux obtenus avec des logiciels commercialisés. Nous complétons ensuite ce chapitre par des applications où nous considérons des cas réels de parc éoliens et faire ressortir l'avantage de notre modélisation.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre I :***

---

***Généralités***

## ***Introduction***

Spectaculaire décharge électrostatique disruptive, on estime à 32 millions le nombre de foudre qui frappent le sol chaque année dans le monde, soit plus d'un éclair chaque seconde (compteur).

Le réseau de transport d'énergie, de par son étendu, la présence des pylônes et sa nature métallique, est une cible privilégiée de la foudre. Malgré les multiples et redondants dispositifs de protection, des dysfonctionnements voir d'importants dégâts matériels sont souvent constatés dans le réseau électrique.

Avec l'arrivée des sources d'énergie renouvelables, particulièrement les parcs éoliens généralement installés en région montagneuse, la fréquence des incidents à augmenter. Régulièrement, des composants de ces installations sont détruits (pales et nacelles d'éoliennes, régulateurs, ...), entraînant une baisse de fiabilité, et une hausse des coûts d'exploitation.

L'expérience montre que les protections installées contre la foudre, quand elles existent, ont souvent été mises en place sans étude sérieuse sur leur efficacité. Avec l'accroissement du nombre d'installations de production d'électricité par énergie renouvelable principalement par éolienne moderne dont la hauteur avoisine les 150 m, il semble important d'examiner le problème avec attention, afin de pouvoir proposer des solutions adaptées et efficaces.

Notre mémoire de fin d'études de master en électrotechnique (option : réseaux électriques) étant d'étudier le comportement transitoire d'un réseau de terre lors du foudroiement d'un parc éolien. Dimensionné une simple prise de terre n'est pas un exercice facile; concevoir le réseau de terre d'un parc éolien, qui a la particularité d'être complexe au vu de la présence de plusieurs mises à la terre connectées, est bien évidemment un travail qui demande une réflexion particulière pour optimiser son rôle et permettre ainsi un écoulement rapide des courants de foudre et d'éviter une augmentation importante du potentiel de la terre (Ground Power Rise).

Dans ce premier chapitre nous présentons quelques éléments théoriques sur l'énergie fossile, les énergies renouvelables, le réseau électrique, le parc éolien, la foudre, la protection du réseau électrique contre la foudre, l'organisation d'un réseau de terre d'un parc éolien et enfin notre problématique pour familiariser le lecteur avec notre travail.

## I. Les besoins en énergie

Depuis l'avènement de l'ère industrielle au milieu du XIXe siècle, l'humanité ne cesse d'accroître sa consommation d'énergie sous des formes multiples pour répondre à la demande des sociétés (industrie, transports, chauffage, électricité, etc...). Ce développement n'a pu se produire que grâce à l'utilisation massive des combustibles dits fossiles, essentiellement le charbon et le pétrole. La figure I.1 [I-1] montre de manière très claire l'évolution de la consommation mondiale en milliards de tep (Gtep) sur un siècle et demi depuis le début de l'ère industrielle jusqu'à l'année 2000. Des étapes technologiques importantes jalonnent cette courbe (moteur électrique, voiture, électronique, etc...). Cette figure I.1 est intéressante car elle montre aussi la part des principales sources d'énergie.

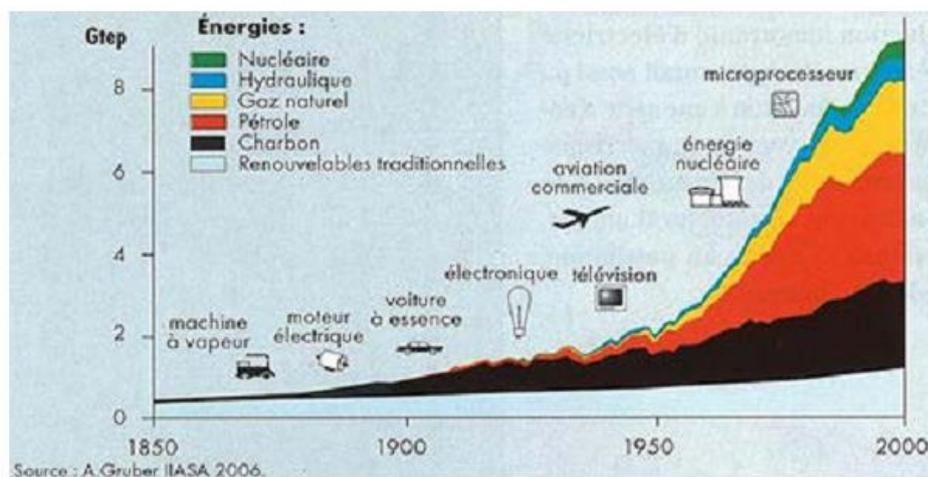


Figure I.1. Evolution de la consommation mondiale d'énergie.

### I.1. La part de l'énergie électrique "électricité"

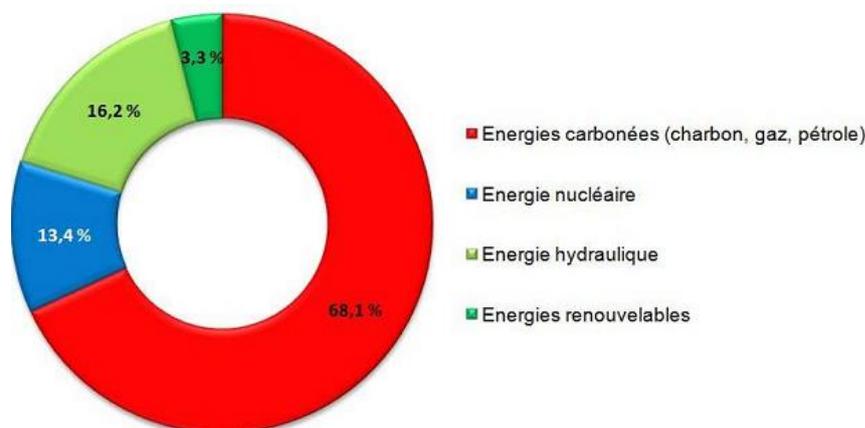
Notons que presque 20% de l'énergie consommée dans le monde est sous forme électrique.

#### I.1.1. Hausse de la demande d'électricité

Avec l'augmentation attendue de la population mondiale (1 à 2 milliards supplémentaires) et l'urbanisation croissante, les besoins en électricité à l'horizon 2040 vont fortement progresser : + 60 % selon l'Agence Internationale de l'Énergie. Elle représenterait alors un quart de la demande d'énergie, contre 20 % aujourd'hui. « *Le futur est électrique* », assure l'Agence.

La consommation électrique devrait progresser légèrement dans les pays matures, mais bondir dans les pays émergents, Chine et Inde en tête, avec le développement de la

voiture électrique (l'AIE table sur 300 millions en circulation dans le monde en 2040), mais surtout le boom de la climatisation, qui est souvent un des premiers signes extérieurs d'amélioration des niveaux de vie.



**Figure I.2.** Moyens de production mondiale d'électricité en 2018 [I-1].

Nous constatons donc, de cette figure I.2, qu'en 2018 plus de 80% de l'électricité est produite à partir des énergies fossiles [I-1]. Celle-ci est considérée comme une énergie «noble» car la possibilité de la transporter à longue distance et la multiplicité de ses utilisations la rendent indispensable à nos sociétés modernes dans tous les secteurs de leurs activités.

## I.2. Les énergies fossiles

L'énergie fossile est issue de la fossilisation des êtres vivants, elle s'est faite en plusieurs millions d'années. Les énergies fossiles sont le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont les trois principales sources d'énergie utilisées dans le monde. Ensemble, elles représentent 80% des énergies consommées. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont des matières présentes dans le sous-sol de la terre. Leur particularité, c'est qu'elles brûlent très bien : ce sont d'excellents carburants. On les appelle "hydrocarbures". Ils ont aussi l'avantage de pouvoir être facilement stockés et transportés, ce qui en fait la source d'énergie la plus pratique à utiliser.

### - *épuisement*

Malheureusement, ce sont des énergies non renouvelables à l'échelle du temps humain dont la surconsommation actuelle vide les réserves mondiales, c'est pourquoi qu'un jour, il n'en existera plus ce type d'énergie, et il faudra attendre des millions d'années pour qu'elles se renouvellent.

**- Le réchauffement climatique**

En plus de la raréfaction des énergies fossiles, leurs différentes utilisations est à l'origine de la pollution de l'environnement qui altère la santé et le bien-être de l'humain. Aussi, le réchauffement climatique est le phénomène de l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère, mais aussi de l'océan, à l'échelle de plusieurs années. La grande partie des scientifiques disent que le réchauffement climatique a été causé par l'homme.

**II. Anticiper l'épuisement des réserves fossiles et faire face à plus de besoin en électricité**

L'électricité est la forme d'énergie la plus utilisée dans quasiment tous les secteurs de l'économie mondiale. Au fil des années, elle a aussi permis à l'homme d'améliorer ses conditions de vie si bien qu'elle est devenue indispensable, voire vitale. De plus, les besoins des humains ont augmenté à une vitesse exponentielle chaque année et la production d'électricité à grande échelle est ainsi devenue indispensable. Mais la production d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) représente encore aujourd'hui plus de 80% de la production totale d'énergie primaire dans le monde. Or, les réserves énergétiques de la planète ne sont pas inépuisables (figure I.3). L'efficacité énergétique est le premier levier de réduction de la consommation des ressources naturelles principalement par l'augmentation du rendement des installations et la limitation des pertes lors de la production, du transport et de la distribution, grâce à des technologies plus performantes. Un autre levier important pour préserver les ressources est l'utilisation des énergies renouvelables comme moyen de production d'énergie électrique : hydraulique, éolien, solaire, photovoltaïque, géothermie, biomasse, énergies marines.

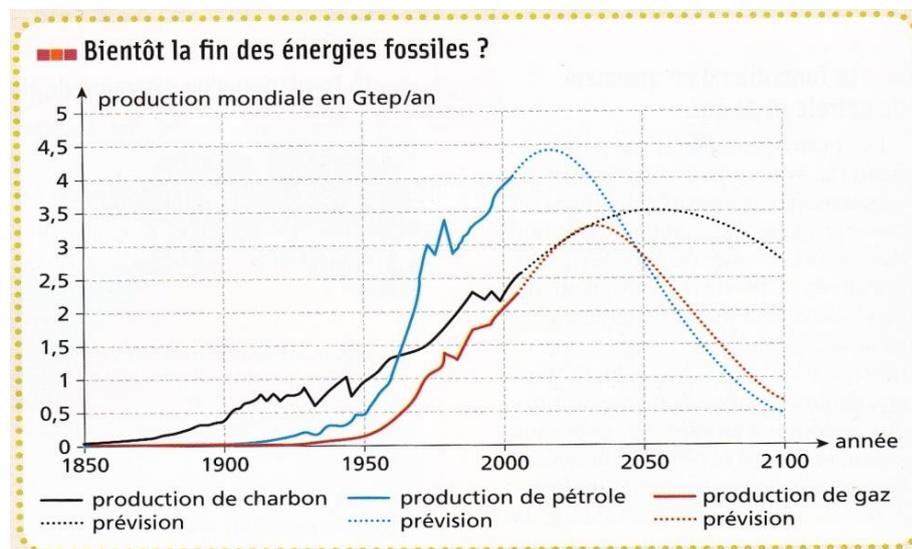


Figure I.3. Evolution de la consommation des énergies fossiles [I-1].

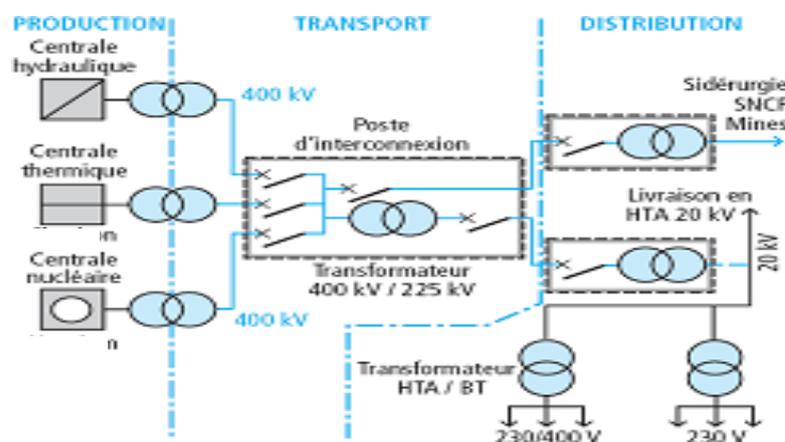
### III. Energies renouvelables comme source de production dans le réseau électrique

#### III.1. Organisation classique du réseau électrique avec sources centralisées

Le réseau électrique (figure I.4) a pour fonction d'acheminer l'énergie des centres de production vers les points de consommation ou points de livraison. Il est composé de lignes aériennes ou souterraines formant une toile maillée reliant différents points du territoire permettant de mutualiser les moyens de production qui alimentent les clients finaux. Ce réseau est constitué de nœuds électriques appelés «postes» dont la fonction est triple [I-2] :

- l'aiguillage des lignes de même tension entre elles ;
- l'évacuation de l'énergie des sources de production vers le réseau ;
- la liaison entre les réseaux de tensions différentes.

L'architecture des postes électriques obéit à certaines règles précises en fonction de leur importance, du nombre d'ouvrages qu'elles relient, du niveau de tension et du niveau de sûreté recherché.



**Figure I.4.** Organisation générale d'un réseau électrique à sources centralisées.

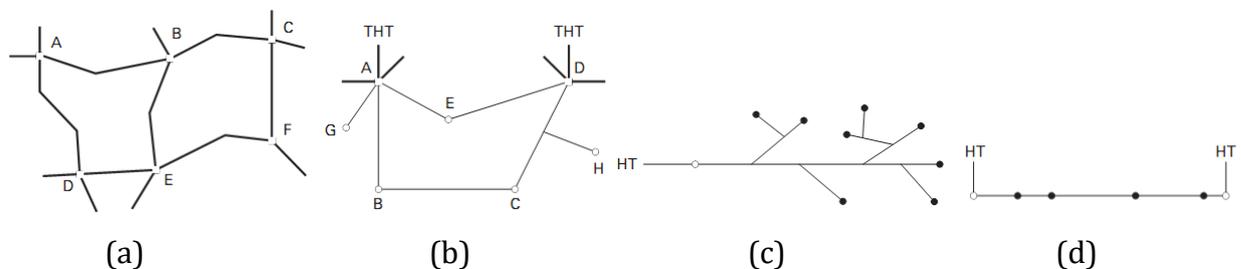
#### III.1.1. Structure des réseaux

L'architecture du réseau distingue trois grandes catégories [I-2] :

- les réseaux de grand transport d'énergie et d'interconnexion sont constitués d'ouvrages capables de forts transits et maillés. Ils se situent aux niveaux de tension les plus élevés (150 - 765 kV, maximum 400 kV en Europe) permettant le transport de grandes puissances sur de grandes longueurs, tout en minimisant les pertes. Les liaisons forment des boucles dont la grande majorité a des côtés communs, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet (figure I.5.a) ;

– les réseaux de répartition se situent à un niveau de tension inférieur (HT 70 - 150 kV) et ont pour objet d'amener l'énergie vers les sites consommateurs à une échelle régionale. Ils ont fréquemment une structure bouclée (figure I.5.b) et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée, le réseau est dit bouclé, soit en boucle ouverte, le réseau est alors dit débouclé.

– ces réseaux de répartition à caractère régional fournissent l'énergie aux réseaux de distribution qui sont des réseaux à moyenne tension (MT de 1 à 70 kV, BT < 1 kV) assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs soit directement, soit après transformation en basse tension (BT). Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux à structure radiale (figure I.5.d), des réseaux à structure arborescente (figure I.5.c).



**Figure I.5.** Topologie des réseaux : (a) structure maillée, (b) structure bouclée, (c) structure arborescente, (d) structure radiale.

□ poste d'interconnexion ;

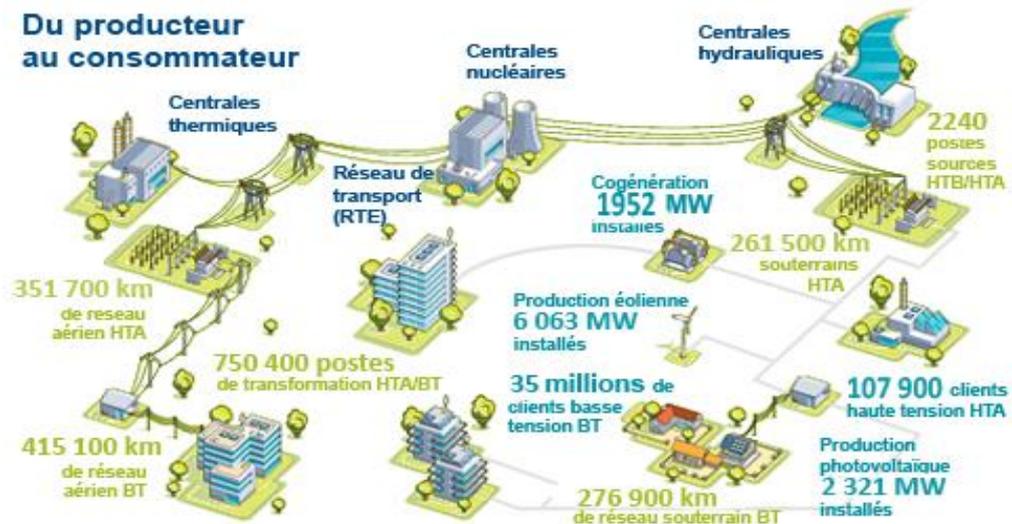
○ poste de répartition ;

● poste de distribution.

### III.2. Réseau électrique avec production décentralisée (système électrique hybride)

Bien que la dénomination ne fasse pas référence à l'énergie primaire du générateur, la production décentralisée est fréquemment associée ou parfois confondue avec certains types de production électrique, notamment :

- l'énergie éolienne ;
- l'énergie de la biomasse ;
- l'énergie solaire ;
- la micro cogénération ;
- le petit hydraulique.



**Figure I.6.** Architecture simplifiée du réseau électrique avec sources décentralisées (système électrique hybride).

Elle se distingue de la production dite centralisée réalisée au moyen de grosses centrales thermiques (nucléaires ou conventionnelles) ou hydraulique, connectées à un réseau de transport et de distribution de grande ampleur, faisant le plus souvent intervenir différents acteurs au long de la chaîne de valeur.

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y'a les systèmes d'énergie hybrides. Le terme système d'énergie hybride fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, l'énergie photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour produire l'électricité dans les régions isolées.

L'efficacité de la production décentralisée est directement dépendante de l'évolution des réseaux de transport d'énergie intelligents de type Smart Grid, capables de gérer la variété et la variabilité des sources (figure I.6).

### Avantages

- Possibilité d'alimenter en électricité des sites de consommation très éloignés du réseau existant, et dont les consommations ne justifient pas des installations de production de forte puissance.
- Valorisation de sources d'énergie primaire (solaire, éolien) ou dérivée (chaleur produite à d'autres fins).

- Autonomie partielle du système local en cas d'incident majeur sur le réseau.

### **Inconvénients**

- Participation faible ou nulle au réglage de la fréquence et de la tension du réseau électrique.
- Faible capacité à participer à la reconstitution du réseau, risque d'îlotage non maîtrisé.
- Pour certaines énergies comme l'éolien ou le solaire, forte intermittence, faible prévisibilité, commandabilité faible ou nulle.

#### **III.2.1. Systèmes d'énergie hybride avec ferme éolienne**

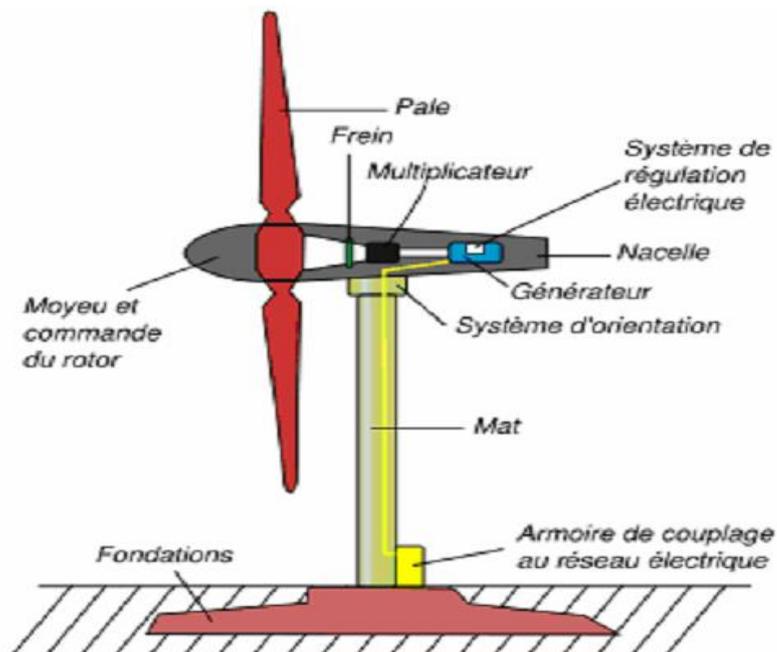
Une éolienne a un fonctionnement plutôt basique [I-3]. C'est une grande structure composée d'un mat de plusieurs dizaines de mètre, d'une nacelle, de fondation et en général de 3 pales montées sur un rotor et bien sûr d'un générateur électrique (figure I.7).

Partout où elles sont implantées, elles ne passent pas inaperçues dans les paysages. La taille d'une éolienne varie en effet de moins d'un mètre pour une éolienne individuelle à 150 m pour les plus puissantes (200 m en étude). Mais c'est là une de leurs caractéristiques essentielles, puisque la puissance d'une éolienne est proportionnelle à sa hauteur.

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. En figure I.8, nous avons l'éolienne à axe horizontal qui est la plus utilisée.



**Figure I.7.** Éolienne contemporaine dans un paysage rural.



**Figure I.8.** Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur (éolienne à axe horizontal).

Une éolienne "classique" est généralement constituée de (figure I.8) :

- **Les pales**, le moyeu et le rotor captent l'énergie cinétique du vent pour la transformer alors en énergie mécanique de rotation ;
- **Le frein** rend possible le fonctionnement de l'éolienne malgré des vents de plus de 90 km/h qui pourraient l'abîmer ou réduire la vitesse de rotation du premier rotor ;
- **Le multiplicateur** permet d'augmenter la vitesse de rotation d'un second rotor jusqu'à 30 tours/minute avec un système d'engrenages au-delà de 1000 tours/minute pour la génératrice électrique ;
- **La génératrice** transforme l'énergie mécanique de rotation du second rotor en énergie électrique ;
- **Le système de régulation électrique** ralentit le rotor du générateur en cas de survitesse ;
- **Le système d'orientation** place la nacelle et donc les pales face au vent ;
- **Le mât** place l'éolienne à une certaine distance du sol, selon la configuration du terrain et les vents du lieu ;
- **Armoire de couplage au réseau électrique** s'occupe de rendre compatible la tension produite avec celle du réseau en la transformant et la réinjecte dans celui-ci ;
- **La fondation** : une fondation solide assurant la résistance d'ensemble par grands vents.

### III.2.1.1. ferme éolienne (parc éolien)

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.



**Figure I.9.** Ferme éolienne.

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien (ferme éolienne) d'environ 5 à 100 machines (figure I.9), mais il existe aussi des machines isolées. L'acheminement du courant électrique produit est réalisé à travers le réseau. Ce courant électrique doit avoir une fréquence de 50 Hz. Une éolienne raccordée au réseau se doit donc de fournir cette fréquence, quelle que soit la vitesse du vent. Cette fréquence constante peut passer par une vitesse de rotation constante des pales. Cette dernière est alors obtenue par régulation notamment avec l'orientation des pales. Mais il est également possible de faire fonctionner une éolienne à vitesse de rotation variable en utilisant un convertisseur de fréquence tel qu'un cycloconvertisseur [I-4].

Aujourd'hui, la commercialisation d'éoliennes à axe horizontal est segmentée en fonction de la puissance unitaire des machines :

- de 50 Watts à 2 kW : il s'agit de micro-éoliennes équipant les bâtiments individuels,
- de 2 kW à 40 kW : ce sont les petites éoliennes installées sur les bâtiments agricoles, tertiaires ou industriels, les bâtiments isolés, par exemple les refuges en altitude,

- de 40 kW à 999 kW : éoliennes de puissance moyenne pouvant être connectées sur les réseaux de distribution publique d'électricité, les réseaux insulaires qui présentent souvent une faible puissance de court-circuit,
- de 1 MW à plusieurs MW de puissance unitaire : grandes éoliennes. Généralement regroupées pour former des installations de production d'électricité, communément appelées « fermes éoliennes », elles sont destinées à être raccordées sur les réseaux de distribution publique moyenne tension (HTA,  $1\text{KV} < U \leq 50\text{KV}$ ) ou sur le réseau de transport (HTB,  $U > 50\text{KV}$ ), dans le cas des parcs éoliens les plus puissants. De nos jours, les grandes éoliennes représentent, de très loin, la plus large part du marché.

## IV. Phénomène de Foudre et ses conséquences

### IV.1. Introduction

Comme nous l'avons signalé en introduction de ce chapitre, la foudre, comme décharge électrique à très forte énergie, s'impose comme un important facteur qui nous commande de prendre les mesures nécessaires pour immuniser un parc éolien contre son impact direct.

Au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, Benjamin Franklin [I-5] fut certainement le premier scientifique qui observe ce phénomène électrique issu d'un nuage orageux chargé d'électricité (figure I.10). Il put ainsi démontrer la nature électrique de la foudre et invente le premier paratonnerre à tige.

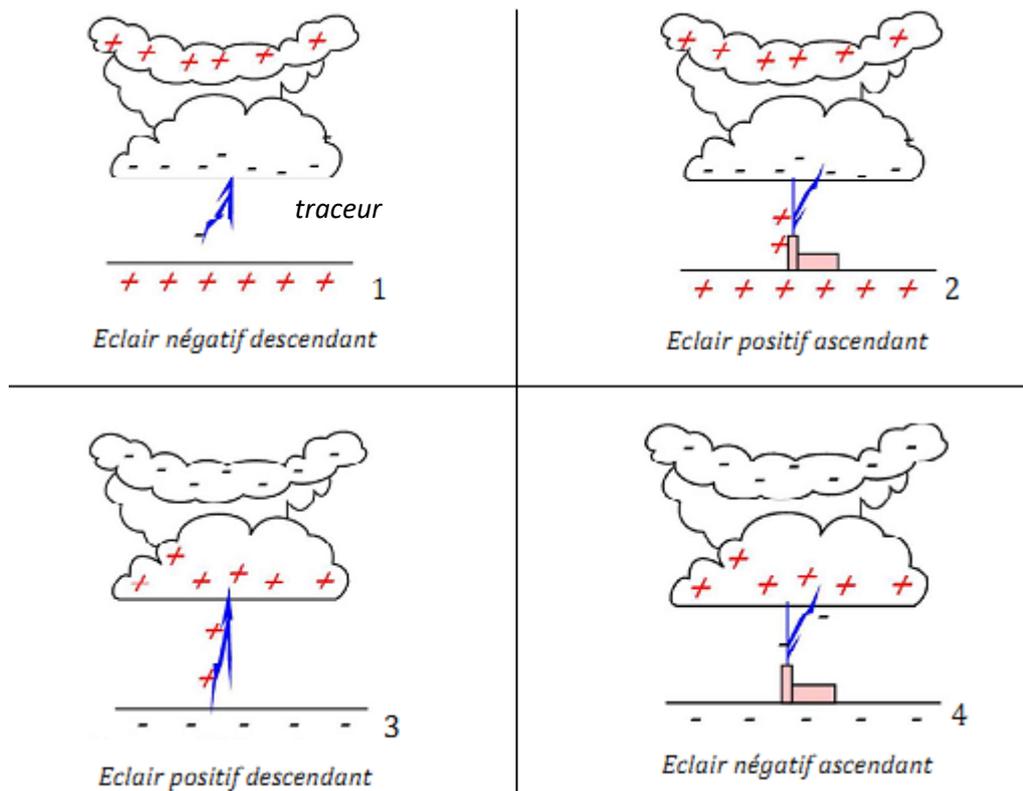
Il y a à peine un siècle, on ne connaissait rien du développement des éclairs ; aujourd'hui grâce aux enregistreurs digitaux et numériques, aux oscillographes à haute persistance, aux caméras tournantes et autres convertisseurs d'images (électroniques), le phénomène est mieux cerné.



**Figure I.10.** Eclair orageux au-dessus d'un pylône électrique.

## IV.2. Phénoménologie et caractéristiques électriques

Il existe beaucoup d'activité électrique comme les décharges entre les nuages ; la majorité se déroule donc en intra et inter nuages. Cependant, il existe également des décharges entre les nuages et le sol, telle que la foudre par exemple. Ce phénomène (figure I.11) a longtemps fait l'objet d'études car il représente un danger pour la population, les animaux, les forêts, les installations électriques et les installations de télécommunications.



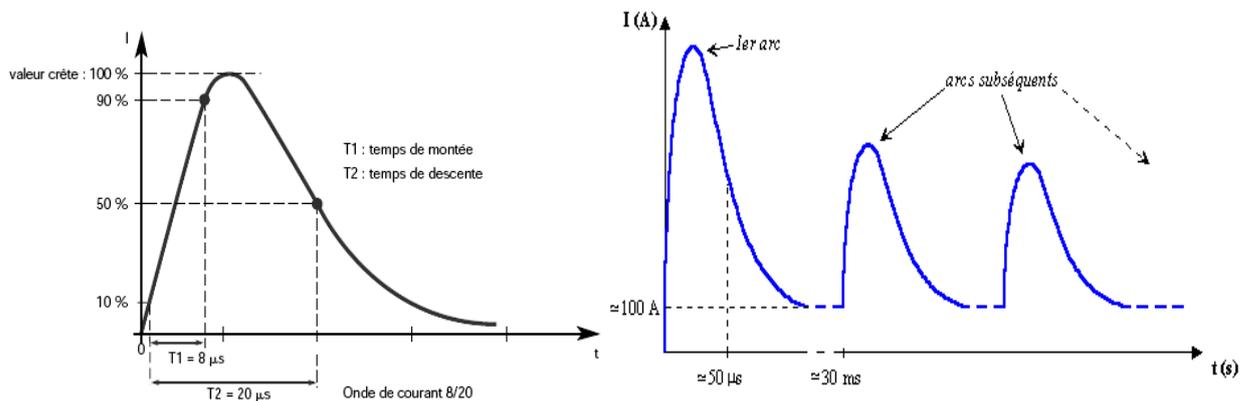
**Figure I.11.** Types de décharges orageuses nuage-sol.

- 1- Décharge descendante dont le leader (traceur) est négatif (90% des cas).
- 2- Décharge descendante dont le leader est positif (10% des cas).
- 3- Décharge ascendante (présence d'une structure proéminente) dont le leader est négatif, (rare).
- 4- Décharge ascendante (présence d'une structure proéminente) dont le leader est positif, (rare).

La foudre est un phénomène naturel qui produit des décharges électrostatiques (arc en retour) disruptives [I-5], c'est à dire une décharge électrique associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. Le mot "disruptive" est employé afin d'exprimer une rupture brutale.

- **Caractéristiques électriques**

Les arcs en retour sont responsables de la majorité des dégâts causés par la foudre. Le courant de l'arc en retour est de nature impulsionnelle type onde de choc, et sa forme se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée) et un temps de décroissance (figure I.12).



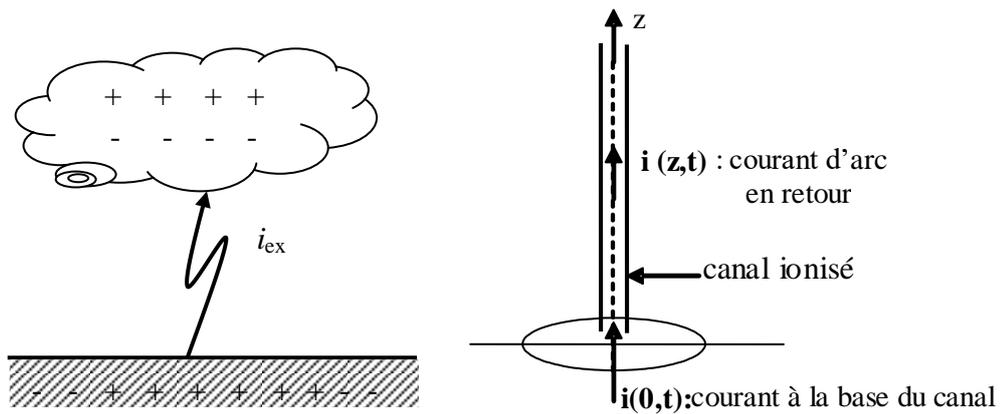
**Figure I.12.** Onde de choc et évolution du courant de l'onde de foudre.

Généralement, il n'y a pas un seul arc en retour, mais plusieurs, en moyenne quatre éclairs, parfois jusqu'à une quinzaine. Ces arcs en retour (1<sup>ier</sup> arc + arcs subséquents) se succèdent pendant 500 ms à 1 s ; le premier arc est souvent le plus fort car il correspond à la décharge initiale des charges accumulées (figure I.12).

**IV.2.1. Modèle électrique du canal de foudre**

Des études très approfondies ont montré que les coups de foudre peuvent être modélisés par un générateur de courant à la base du canal dont l'amplitude peut varier de quelques kA à quelques centaines de kA [I-6]. Le canal ionisé est ensuite considéré comme une antenne verticale sur laquelle va circuler un courant dit "courant d'arc en retour". La propagation de ce courant le long du canal est à l'origine d'un rayonnement électromagnétique. Dans ce qui va suivre nous donnons un bref aperçu sur la modélisation analytique du courant à la base du canal.

Le courant à base du canal  $i(0,t)$  doit être spécifié afin de déterminer le courant en fonction de la hauteur et du temps le long du canal de retour  $i(z,t)$  (figure I.13).



**Figure I.13.** Décharge nuage – terre et réciproquement (représentation du canal ionisé).

Dans la littérature deux expressions analytiques sont le plus souvent utilisées pour représenter le courant à la base du canal. En premier la fonction bi – exponentielle :

$$i(0,t) = I_0 (\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)) \quad (I.1)$$

Puis, plus récemment F. Heideler [I-7] a proposé une nouvelle expression analytique :

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (I.2)$$

Où :

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) \quad (I.3)$$

Avec :

$I_0$  : l'amplitude du courant à la base du canal ;

$\tau_1$  : la constante de temps de front ;

$\tau_2$  : la constante de décroissance ;

$\eta$  : facteur de correction de l'amplitude ;

$n = 2 \div 10$ .

Pour l'arc en retour, plusieurs modèles de distribution spatiotemporelle du courant d'arc en retour ont été développés durant ces dernières années [I-8].

### IV.3. Point d'impact et effets de la foudre

La foudre peut tomber directement sur le sol, les structures métalliques proéminentes ou les lignes. Dans tous ces cas les conséquences peuvent être néfastes du fait de la propagation par conduction ou par rayonnement. Le point d'impact du coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie inférieure de la trajectoire (aux environs de 300 m d'altitude).

Les effets, se produisent au point d'impact de la foudre et sont dus à l'écoulement du courant de foudre de très forte intensité dans les éléments plus ou moins conducteurs.

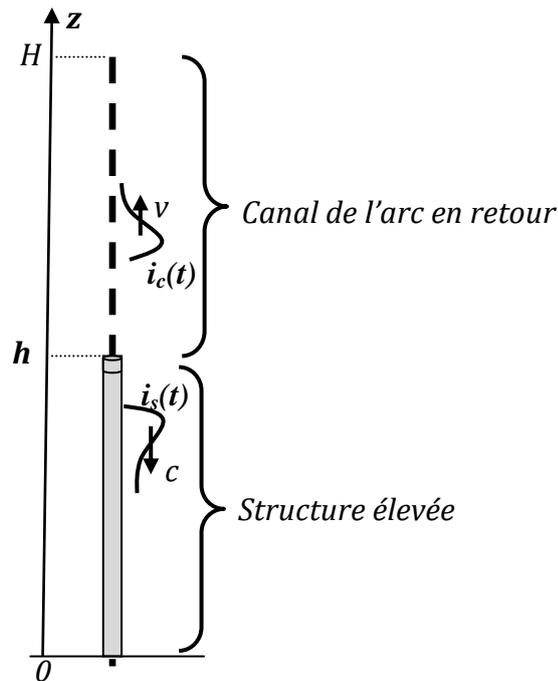
Plus particulièrement dans le domaine du génie électrique, la foudre peut momentanément provoquer des destructions des équipements électriques par impact direct, des phénomènes de montée en potentiel des prises de terre, et des parasitages ou dysfonctionnements induits par des phénomènes d'induction électromagnétique, effets dont on cherche à se prémunir dans les installations sensibles (réseaux électriques, réseaux de télécommunication, installations militaires, centrales nucléaires, etc.).

#### IV.3.1. Présence d'un objet élevé foudroyé

L'interaction de la foudre avec des structures élevées (figure I.14), a été l'objet de plusieurs travaux [I-9]. La structure élevée peut modifier non seulement le courant de l'arc en retour de la foudre, mais elle pourrait également influencer sur les champs électromagnétiques associés [I-9]. Pour cette raison les modèles de l'arc en retour [I-9], ont été étendus pour tenir compte de la présence d'une structure élevée verticale.

En présence de l'objet élevé, on suppose qu'une impulsion de courant  $i_0(t)$  liée au processus de l'arc en retour est injectée au point d'attachement de foudre produisant deux impulsions de courant, une dans l'objet élevé  $i_s(t)$  et l'autre dans le canal de foudre  $i_c(t)$ .

L'onde ascendante se propage le long du canal à la vitesse de l'arc en retour  $v$  comme spécifié par les modèles de l'arc en retour [I-9], par contre l'onde descendante se propage à la vitesse de la lumière  $c$  le long de l'objet élevé (figure I.14).



**Figure I.14.** Propagation des impulsions de courant le long du canal et le long de la structure élevée.

La distribution du courant le long du canal de foudre et de l'objet sont déduites en utilisant des modèles élaborés à partir de la théorie des lignes de transmissions [I-9].

## V. Transitoires électromagnétiques de foudre

### V.1. Interaction onde de foudre - réseaux électriques

De par son étendue, la nature métallique de sa structure et l'importante hauteur des pylônes, le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique est susceptible de capter (figure I.15) des perturbations électromagnétiques transitoires d'origines naturelles (foudre) [I-10].



**Figure I.15.** Coup de foudre à proximité d'un réseau de transport d'énergie.

En règle générale, sur le réseau électrique, un coup de foudre engendre des transitoires électromagnétiques de manière directe ou indirecte [I-11], [I-13] :

1/ de manière directe (surtension conduite) lorsque la foudre tombe sur une ligne conductrice (conducteur de phase ou câble de garde) ou pylône. Dans ce cas, l'onde électrique se propage le long du conducteur, c'est donc une très forte énergie qui est injectée dans la ligne électrique qui provoque une surtension et presque toujours un court-circuit. Aussi, la résistivité des sols fait que les prises de terres sont résistantes et qu'elles ne peuvent empêcher, lors du passage du courant de foudre, une montée brutale en potentiel de l'installation.

2/ de manière indirecte (surtension induite) lorsque la foudre tombe au voisinage d'une ligne conductrice ou d'une installation électrique. L'impact de foudre est accompagné d'un rayonnement électromagnétique ; si ce dernier atteint un conducteur (une ligne électrique par exemple), le flux électromagnétique est générateur de tensions induites élevées.

## V.2. Mode de propagation et conséquences des perturbations transitoires de foudre

En plus des conséquentes dégradations des équipements de puissances du réseau (ligne et transformateur) et des dégâts sur les pylônes lors d'un coup au but de la décharge orageuse, si la longueur du circuit est assez grande devant la plus petite longueur d'onde significative de la perturbation transitoire, sa propagation même avec atténuation sera à l'origine de divers dysfonctionnements voir la destruction si les précautions nécessaires n'ont pas été prises.

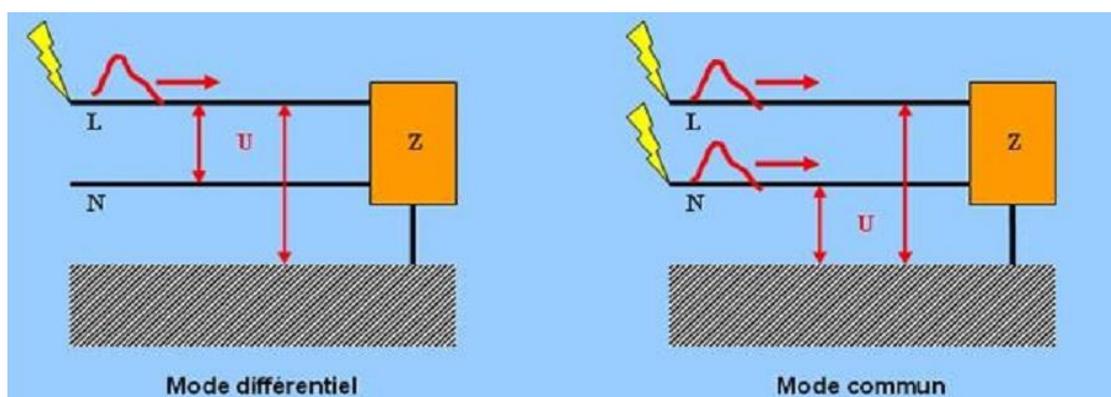


Figure I.16. Propagation d'une onde de surtension en mode commun et différentiel.

Généralement la propagation des surtensions dans le réseau électrique est de deux types [I-10] (figure I.16) :

- En mode commun, si elles affectent toutes les parties conductrices de l'installation : ces parties présentent alors un potentiel très élevé (surtension) par rapport à la terre. Les

éléments dont les masses sont reliées à la terre risquent un claquage diélectrique de leurs composants isolants.

- En mode différentiel, si elles affectent seulement quelques parties conductrices de l'installation : dans ce cas, celles-ci présentent un potentiel élevé (surtension) par rapport aux autres éléments conducteurs non affectés.

La propagation d'une perturbation en mode commun est considérée par la plupart des ingénieurs en CEM (Compatibilité Electromagnétique) comme principal souci.

Les principaux effets, directs et indirects, consécutifs à la propagation du courant de foudre sont signalés dans ce qui suit. Même si ce courant arrive par la haute tension, il peut atteindre tous les circuits électriques (perturbations conduites et rayonnées). Ces effets, qui concernent donc tous les niveaux de tension, sont :

- thermiques (fusion d'éléments, incendies, explosions).
- mécaniques, dus aux efforts électrodynamiques des conducteurs parallèles proches.
- de choc diélectrique, suite aux montées en potentiel lors de la propagation d'onde à travers les impédances présentées par les conducteurs.
- de perte d'isolement par contournement de l'isolateur d'une phase entraînant un «courant de suite» à la terre à fréquence industrielle.
- d'élévation de potentiel de terre : il est usuel d'atteindre des potentiels de plusieurs centaines de kV au puits de terre de l'équipement HT concerné. La loi de variation, fonction de la distance à la prise de terre, est approximativement hyperbolique, d'où des potentiels, et leurs gradients associés, très grands à proximité des puits de terre, même à plusieurs dizaines de mètres.
- électromagnétiques à haute fréquence (spectre très large) : rayonnement parasite, induction et couplage de circuits.

Tous ces phénomènes sont source de :

- dégradation de matériel, de façon brutale comme les claquages diélectriques par surtension, ou par vieillissement prématuré à cause de contraintes non destructrices immédiatement mais répétées,
- dysfonctionnement des installations particulièrement au travers des circuits à courants faibles, exemple : perturbations parasites des équipements de contrôle-commande et de communication,
- réduction de la continuité de service par des interruptions longues (cas de destruction de matériel) ou courtes (dysfonctionnement des automatismes de réseaux),

- danger pour l'homme (personnel technique) notamment par l'apparition de la tension de pas pouvant entraîner une électrisation voire électrocution.

## **VI. Principes de la protection du réseau électrique contre la foudre**

La foudre est un phénomène que l'on ne peut empêcher de se produire, engendrant ainsi une décharge électrique et un champ électromagnétique perturbateur. Toutefois, on peut en limiter les effets en respectant les trois principes de base suivants [I-14] :

- Canaliser le courant de foudre vers la terre par le trajet le plus direct ;
- Réduire les surfaces de boucle de masse ;
- Limiter l'onde de surtension par des parafoudres.

Elle implique la mise en œuvre de deux systèmes distincts :

- La protection des lignes par câble de garde contre les effets directs ;
- La protection contre les effets indirects : limitation des surtensions par le biais de parafoudres.

Ces deux protections peuvent être complémentaires mais pour une réelle efficacité, ces équipements doivent être associés à une prise de terre unique. Dans ce contexte le réseau de terre est l'élément fondamental d'une bonne protection ; nous donnons un aperçu dans ce qui suit.

### **VI.1. Rôle des systèmes de mise la terre (MALT)**

On appelle mise à la terre (parfois simplement appelé "terre"), un élément conducteur nu une électrode (piquet enfoncé verticalement en profondeur, câble enterré, feuillard) faite d'un métal qui ne craint pas la corrosion : le cuivre, l'acier ou l'aluminium - directement enfoui dans le sol et permettant d'écouler les courants de défaut vers la terre. Que ce soit en haute ou basse tension, une bonne mise à la terre (MALT) doit être capable d'assurer l'écoulement du courant de défaut ou de courant de foudre sans se détruire par échauffement. Le courant à écouler dans le sol peut être de différente nature :

- Courant à fréquence industrielle (par exemple suite à un court-circuit phase/pylône) ;
- Courant harmonique ;
- Courant transitoire d'origines diverses (foudre, manœuvre ... etc.).

Une bonne mise à la terre doit assurer la sécurité des personnes à proximité des Installations (personnels techniques), protection des équipements (qualité de service)

et des installations électriques (pylônes électriques, éoliennes) ou bâtiments très exposés comportant des équipements sensibles.

### VI.1.1. Réseau de terre

Le réseau de terre, interconnecte des mises à la terre, est tel un drainage qui évacue à la terre les courants parasites. Il crée une zone équipotentielle afin que la conduction d'un fort courant (foudre, défaut) ne donne pas lieu à l'apparition de potentiels transitoires dangereux [I-15]. Il joue aussi le rôle de référence de potentiel pour les écrans et blindages.

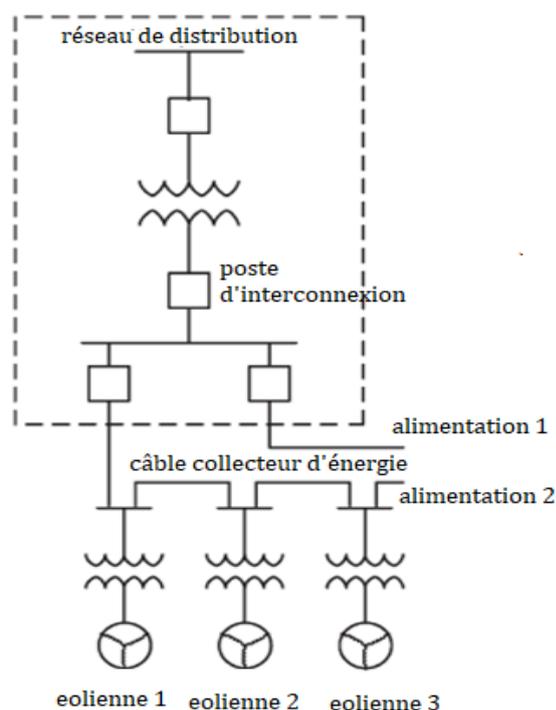
## VI.2. Circuit de terre d'un parc éolien

### VI.2.1. Fonction électrique d'un parc éolien

Un parc éolien typique comprend les trois domaines électriques généraux suivants [I-16] :

- 1) les éoliennes ;
- 2) le système de câbles collecteurs ;
- 3) le poste d'interconnexion aux services publics.

En ce qui concerne la mise à la terre, chacune de ces zones doit être considérée à la fois individuellement et ensemble comme des systèmes complets. La figure I.17 illustre un schéma unifilaire de système électrique simplifié pour une conception de parc éolien typique.



**Figure I.17.** Schéma unifilaire simplifié du parc éolien.

En règle générale, les éoliennes génèrent de l'énergie électrique à basse tension, qui est ensuite augmentée jusqu'à la tension du système de collecteur via un transformateur élévateur. Le système collecteur fournit la puissance électrique conductrice des éoliennes au poste d'interconnexion des services publics.

Le poste d'interconnexion des services publics permet d'injecter l'énergie produite par le parc éolien dans le réseau de transport à haute tension.

Dans certains parcs éoliens de plus petite puissance, la puissance électrique de sortie est directement connectée aux lignes de distribution d'énergie locales, et donc, la nécessité d'une sous-station d'interconnexion n'est pas requise.

En raison de la hauteur et des emplacements physiques typiques des éoliennes, la protection contre la foudre est très importante. Le système de protection contre la foudre est conçu pour détourner un coup de foudre des équipements mécaniques et électriques situés dans la nacelle et à l'intérieur de la tour. Chaque pale de turbine a une ou des bornes de foudre installées à l'intérieur de la pale, qui sont ensuite connectées par des conducteurs internes à l'arbre principal de la turbine. La nacelle dispose également de terminaux de foudre. Tous les équipements électriques des nacelles sont liés à la structure de la tour. Cela vaut également pour les équipements électriques situés sur la plate-forme d'équipement inférieure.

En règle générale, la conception du circuit de terre d'un parc éolien repose sur la structure de la tour elle-même pour la mise à la terre et la continuité de la liaison entre la nacelle et la base de la tour, de la connexion des mise à la terre individuelle par câble enterré, de la mise à la terre du câble collecteur ainsi que de la mise la terre du poste de raccordement. Nous donnons dans ce qui va suivre un aperçu sur les différentes mises à la terre qui interviennent dans un parc éolien.

### **VI.2.2. Différentes mises à la terre d'un parc éolien**

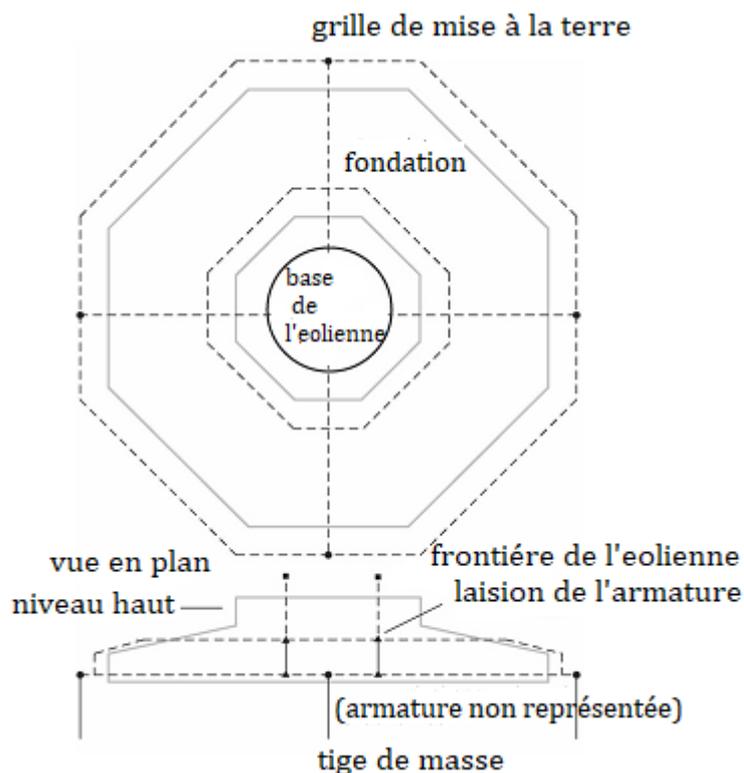
#### **VI.2.2.1. Grille de mise à la terre d'une éolienne**

La figure I.18 illustre une conception typique de fondation en béton d'une éolienne et de sa grille de mise à la terre [I-16]. La grille de mise à la terre typique se compose de plusieurs anneaux de mise à la terre autour de la base de la fondation de l'éolienne ainsi que des piquets de mise à la terre (électrodes de mise à la terre) autour du périmètre de la fondation.

Le réseau de mise à la terre d'une éolienne sert de connexion à la terre pour la protection contre la foudre de l'éolienne et de système de mise à la terre électrique de l'éolienne.

Les conducteurs d'électrode de mise à la terre sont dimensionnés pour garantir qu'ils sont adéquats pour le courant de défaut à la terre du système disponible et pour la durée du courant de défaut. Le système d'acier d'armature de fondation en béton d'une éolienne (barres d'armature) est collé à la grille du sol.

Une résistance maximale du réseau de mise à la terre d'une éolienne est spécifiée par les exigences du fabricant et est généralement de 1 à 10  $\Omega$ . Après l'installation, les tests de la grille au sol sont effectués conformément aux recommandations [I-16]. Une grille de sol d'une éolienne bien conçue typique testera généralement une résistance de grille inférieure à 10  $\Omega$ .



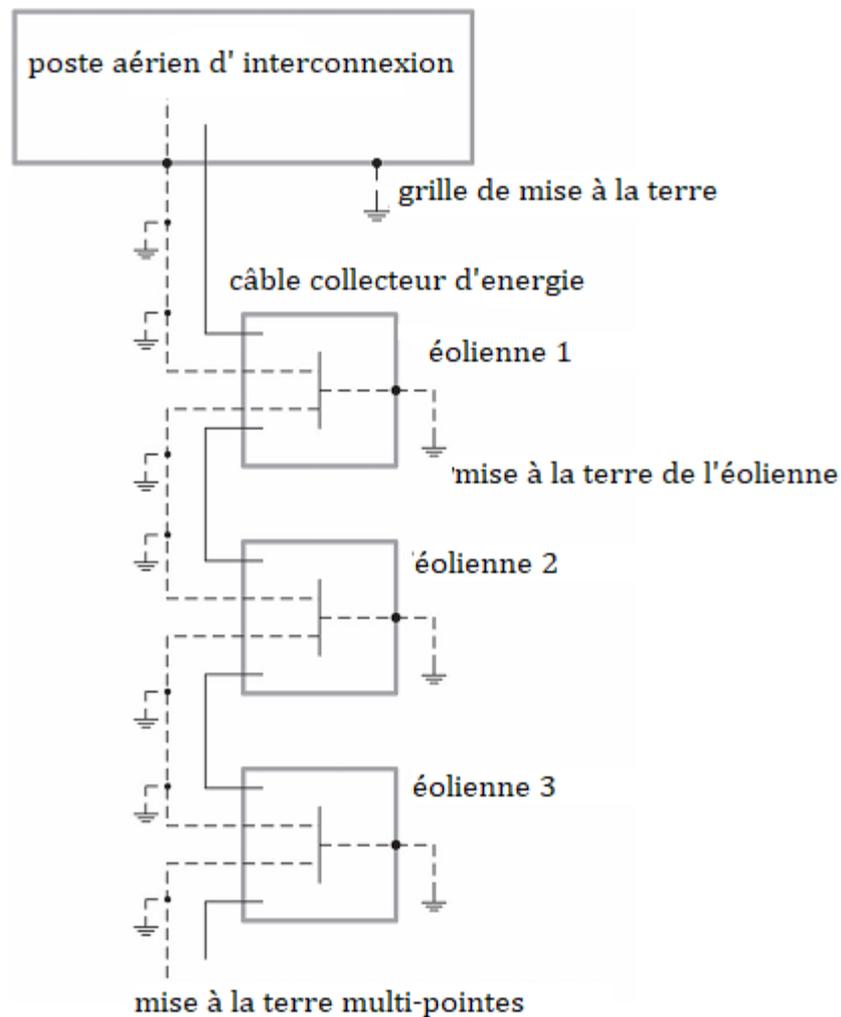
**Figure I.18.** Fondation en béton typique et grille au sol d'une éolienne.

#### VI.2.2.2. Mise à la terre du blindage du câble collecteur

Les blindages métalliques des câbles collecteurs, à moins d'une mise à la terre efficace, peuvent atteindre des tensions dangereuses par rapport à la terre [I-16].

En raison des longues longueurs de conducteur, les conceptions de systèmes de collecteurs de parcs éoliens utilisent généralement une mise à la terre du blindage

multipoint du conducteur. La mise à la terre du blindage multipoint fournit une mise à la terre du blindage périodique sur toute la longueur du conducteur et aux deux extrémités du conducteur. Pour les longues longueurs de conducteur, une conception de mise à la terre du blindage à un seul point, qui ne se met à la terre qu'à une seule extrémité du conducteur, entraînera une accumulation de tension dangereuse le long du conducteur et doit donc être évitée.



**Figure I.19.** Schéma général de mise à la terre et de liaison du système de collecteurs [I-16].

La figure I.19 illustre un schéma général de la mise à la terre et de la liaison du système collecteur. Le blindage neutre / métallique concentrique multipoint mis à la terre du conducteur collecteur (et un conducteur de terre nu supplémentaire, le cas échéant) relie les systèmes de réseau de mise à la terre de l'éolienne au réseau de mise à la terre du poste.

### VI.2.2.3. Mise à la terre du poste d'interconnexion

Le poste d'interconnexion fournit le moyen de transférer l'énergie électrique du parc éolien au réseau de transport public. Les exigences de mise à la terre et de liaison du poste prévoient ce qui suit :

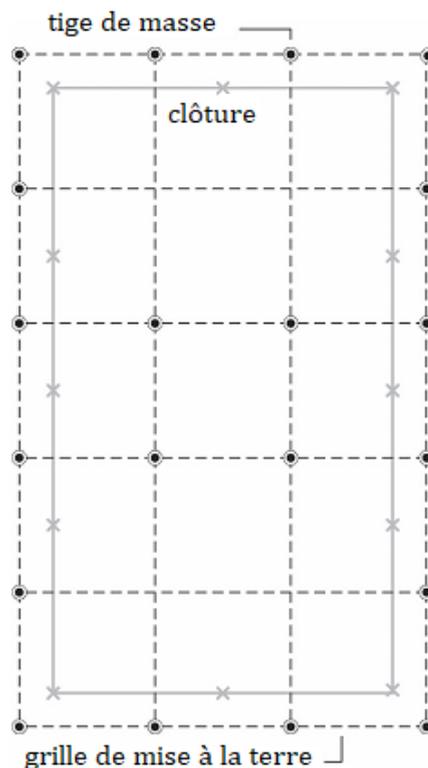
- potentiels sûrs pour les pas et les contacts pour le personnel du poste ;
- la liaison de l'équipement du poste au réseau de terre ;
- connexion du système de protection contre la foudre du poste au réseau de mise à la terre.

La zone du réseau de mise à la terre est le plus important facteur géométrique pour déterminer la résistance de la grille de mise à la terre (figure I.20); plus la zone mise à la terre est grande, plus la résistance de la grille est faible, et donc, plus la montée du potentiel de terre (Ground Power Rise) est faible [I-16].

Le GPR, augmentation du potentiel de la terre, est défini comme le potentiel électrique maximal qu'un réseau de mise à la terre d'un poste peut atteindre par rapport à un point de mise à la terre éloigné. Un bon système de mise à la terre offre une faible résistance à la terre éloignée pour minimiser le GPR. Pour la plupart des postes à grande transmission, la résistance de terre est généralement d'environ  $1 \Omega$  ou moins [I-16]. Dans les postes de distribution plus petites, la plage généralement acceptable est de  $1 \Omega$  à  $5 \Omega$ , selon les conditions locales [I-16].

#### **Remarque :**

Un bon circuit du réseau de terre d'un parc éolien est essentiel à la protection appropriée de l'équipement et du personnel ; cependant, il est également essentiel en raison de la liaison à la mise à la terre du blindage du conducteur du collecteur. Une mauvaise grille de mise à la terre de l'éolienne peut provoquer des courants de foudre et de défaut de terre importants à travers les conducteurs neutres concentriques du câble collecteur. Ceci, à son tour, peut provoquer la rupture de l'isolation de la gaine et un flashover du neutre au sol local [I-17].



**Figure I.20.** Schéma de configuration typique du réseau au sol de la sous-station [I-16].

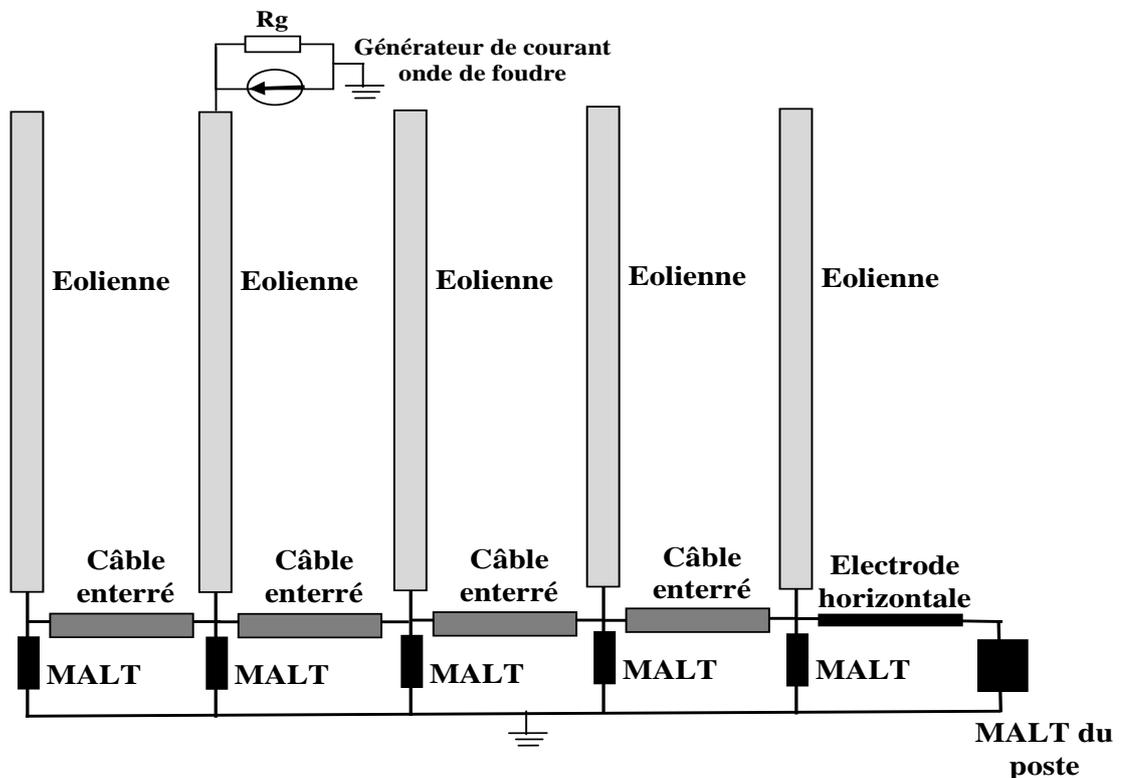
## VII. Notre Problématique : Protection d'un parc éolien contre la foudre

Le nombre d'éoliennes installées dans le monde a remarquablement augmenté ces dernières dix années si bien que l'énergie éolienne a désormais pris une part importante dans la production d'énergie. Il est donc impératif de s'assurer de leur fiabilité. De nombreuses études et observations récentes ont déjà mis en évidence la vulnérabilité des éoliennes et notamment de celles situées dans des régions montagneuses vis à vis de la foudre. Il est donc crucial de joindre aux éoliennes un système de protection qui soit adéquat et efficace d'autant plus que la hauteur des éoliennes modernes est en constante augmentation les exposant ainsi à de plus grands risques de foudroiement. La Commission Electrotechnique Internationale se base plus particulièrement sur les coups de foudre descendants (impact indirect) affectant une éolienne pour le design du système de protection. Cependant, la portion des coups de foudre ascendants (impact direct) est loin d'être négligeable notamment dans les régions montagneuses et doit impérativement être prise en considération.

En effet, la foudre est particulièrement en mesure de frapper directement un parc éolien en raison de leur emplacement exposé, de son étendu, de la hauteur et de la forme des éoliennes qui provoque un effet de pointe. Comme les coups de foudre causent souvent

des dégâts matériels et économiques considérables, il est important de protéger les turbines. L'objectif principal est d'éviter que la foudre n'endommage les pales du rotor, les roulements et les systèmes électriques. La disponibilité permanente est la priorité absolue.

Pour se protéger contre les courants de défauts (court-circuit et impact de foudre), le parc éolien est doté d'un circuit de terre. La conception des systèmes électriques des parcs éoliens présente des considérations de mise à la terre unique qui ne sont pas toujours associées à d'autres types de systèmes d'alimentation électrique (figure I.21). Les trois principaux domaines de conception de la mise à la terre comprennent les éoliennes, le système de câbles collecteurs et le poste d'interconnexion des services publics. Dans le but de diminuer la résistance de terre à fréquence industrielle les prises de terre individuelles des éoliennes sont reliées entre elles par un câble souterrain isolé.



**Figure I.21.** Modèle de parc éolien à simuler.

Dans notre travail de Projet de Fin d'Etudes, nous traitons un problème de transitoire électromagnétique de foudre, particulièrement nous nous intéressons à l'analyse du comportement transitoire du réseau de terre d'un parc éolien, tel que présenté en figure I.21, lors d'un impact direct de foudre. Notre travail est consacré au dimensionnement du circuit terre, aux distributions des courants de foudre et les augmentations potentielles à l'intérieur d'un parc éolien. Ce travail étant très coûteux voir irréalisable par la mesure nous l'étudions au moyen d'une modélisation numérique réaliste.

## Références Bibliographiques

- [I-1] Quelles énergies pour l'humanité aujourd'hui et demain ? <https://www.museum.toulouse.fr/-/quelles-energies-pour-l-humanite-aujourd'hui-et-demain>.
- [I-2] Louis DEVATINE, "Postes à haute et très haute tension rôle et structure", Techniques de l'Ingénieur - D4570, 2009.
- [I-3] Technologies pour la production d'électricité renouvelable, [https://www.rte-france.com/sites/default/files/dossier\\_technique\\_enr\\_sep\\_2018.pdf](https://www.rte-france.com/sites/default/files/dossier_technique_enr_sep_2018.pdf).
- [I-4] D. Marin, "Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires," Ecole Centrale de Lille, Lille, 2009.
- [I-5] Claude Gary, "LA Foudre, Des mythologies antiques à la recherche moderne", édition Masson 1995.
- [I-6] Bruce, C.E.R., and R.H. Golde, "The lightning discharge", The Journal of the Institution of Electrical Engineers, 88 (6) 487-520, 1941.
- [I-7] F. Heidler, "Traveling Current Source Model for LEMP Calculation", in 6th Symposium and Technical Exhibition Electromagnetic Compatibility, pp. 157-62, Zurich, Switzerland, 1985.
- [I-8] F. Rachidi, and C.A. Nucci, "On the Master, Uman, Lin, Standler and the Modified Transmission Line Lightning Return Stroke Current Models", Journal of Geophysical Research, 95 (D12) 20389-94, 1990.
- [I-9] L. Boufenneche, "Analyse électromagnétique d'un pylône THT ou HT excité par une onde de foudre", thèse de Doctorat 2015.
- [I-10] J. Mahseredjian, A. Xémard, B. Khodabakhchian, "Régimes transitoires dans les réseaux électriques," Technique de l'ingénieur Réseaux électriques linéaires, vol. TIB258DUO, no. D82, Nov. 2007.
- [I-11] B. Nekhoul and al., "A Simplified Approach to the Study of Electromagnetic Transients Generated by Lightning Stroke in Power Network", IEEE Symposium EMC Europe 2014- Göteborg Suède 2014.
- [I-12] L. Boufenneche, B. Nekhoul, K. Kerroum, "Analysis of the response to a lightning strike of a towers cascade equipped with its grounding systems", Electrical Engineering 96 (3), pp. 211-225, 2014.
- [I-13] M. Paolone, Modeling of Lightning-Induced Voltages on Distribution Networks for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in a Transient Program, PhD. thesis de l'université de Bologne, Italie 2001.

- [I-14] X. Legrand, Modélisation des systèmes de mise à la terre des lignes électriques soumis à des transitoires de foudre, Thèse de doctorat de l'école centrale de Lyon, 2007.
- [I-15] Recommended Grounding Guidelines, National Lightning Safety Institute – May 2020.
- [I-16] Robert Hoerauf, " Considerations in Wind Farm Grounding Designs ", IEEE Trans. On Industry Applications. VOL. 50, NO. 2, MARCH/APRIL 2014.
- [I-17] E. H. Camm and al., "Wind Power Plant Grounding, Overvoltage Protection, and Insulation Coordination: IEEE PES wind plant collector system design working group," in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., 2009, pp. 1–8

## ***Chapitre II :***

---

# ***Modèles Mathématiques pour l'Analyse des Transitoires Electromagnétiques de Foudre***

## ***Introduction***

L'analyse des transitoires électromagnétiques est un sujet important dans l'étude des réseaux électriques. Les phénomènes transitoires doivent être analysés dans les étapes de conception des réseaux pour assurer leur optimisation et garantir leur robustesse. Optimisation implique opération proche des limites techniques et réduction des coûts. Robustesse sous-entend continuité de service, fiabilité, sécurité et qualité. Par ailleurs, la compréhension des phénomènes transitoires est essentielle dans les analyses menées quand surviennent des défaillances d'équipement ou des fonctionnements anormaux.

Pour comprendre ces phénomènes deux voies sont possibles, la mesure et/ou la simulation. Vu la particularité des réseaux électriques, qui s'étalent sur tout un territoire avec des équipements très volumineux, la mesure en laboratoire à l'échelle réduit est inadéquate. La mesure in situ est concevable mais nécessite énormément d'investissement avec l'obligation de consacrer un réseau à part uniquement pour cet objectif, ce qui est très coûteux.

Pour aider à la compréhension des transitoires électromagnétiques, les ingénieurs de recherches se sont orientés vers la modélisation. Ce deuxième chapitre nous le consacrons à l'aspect modélisation de notre problématique, décrite dans le chapitre I.

Dans ce deuxième chapitre, après une brève introduction que nous consacrons aux transitoires électromagnétiques et aux surtensions dans le réseau électrique, nous abordons l'aspect simulation en laboratoire et numérique de ce phénomène physique. Après une revue des différentes modélisations et méthodes numériques possibles pour étudier notre problématique, nous optons pour le formalisme topologique que nous détaillons dans ce chapitre.

## I. Transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique

Un certain nombre de phénomènes électriques correspondant à des variations brutales des grandeurs électriques d'un système ou d'un réseau peuvent être regroupés sous l'appellation «transitoires électromagnétique» [II-1]. On peut y trouver les phénomènes de résonance, de ferrorésonance, de surtensions à front plus ou moins rapide telles que la tension transitoire de rétablissement aux bornes d'un disjoncteur ou celle suivant un impact de foudre, ou encore l'impact du courant d'enclenchement des transformateurs.

Ces phénomènes peuvent être non linéaires comme la ferrorésonance, phénomène électromagnétique pouvant apparaître dans certaines conditions sur les réseaux électriques comportant des transformateurs saturables (transformateurs de potentiel notamment) et des capacités (capacité parasite sur les câbles, bancs de compensation de réactif...).

### I.1. Catégories des phénomènes transitoires

Les transitoires électromagnétiques peuvent causer des surtensions. On peut regrouper les surtensions dans les catégories suivantes [II-1] :

- temporaires (longue durée) ;
- à front lent (manœuvre) ;
- à front rapide (foudre) ;
- à front très rapide.

Dans chacune de ces catégories, on trouve différentes causes à l'origine des surtensions. Pour les surtensions à front lent, on peut distinguer l'enclenchement d'une ligne de transport à vide, l'élimination d'un défaut ou le débranchement d'une charge inductive. Pour les surtensions à front rapide, il faut distinguer les coups de foudre frappant directement un conducteur de phase d'une ligne et les coups de foudre frappant un câble de garde ou un pylône et provoquant l'amorçage en retour d'une chaîne d'isolateurs. Les surtensions temporaires peuvent, par exemple, être issues d'un défaut phase-terre ou d'une perte de charge.

Le contenu fréquentiel des transitoires de réseau peut varier du courant continu 0 Hz à 50 MHz. Les fréquences au-dessus de la fréquence fondamentale impliquent en général des phénomènes transitoires électromagnétiques, tandis que les fréquences

inférieures à la fréquence nominale (industrielle) peuvent aussi inclure des modes électromécaniques.

### I.2. Notions de surtensions

Les surtensions sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Elles peuvent apparaître [II-2] :

- entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel,
- entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun.

Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets.

Dans les réseaux de transport THT, les coups de foudre sont amortis en quelques microsecondes et les surtensions de manœuvre en quelques millisecondes. Par contre, les surtensions temporaires ont des durées relativement importantes avec différentes amplitudes et atténuations.

Les surtensions peuvent être classées selon la durée (ou la gamme de fréquence) ou en fonction de la nature du phénomène comme indiqué sur la figure II.1.

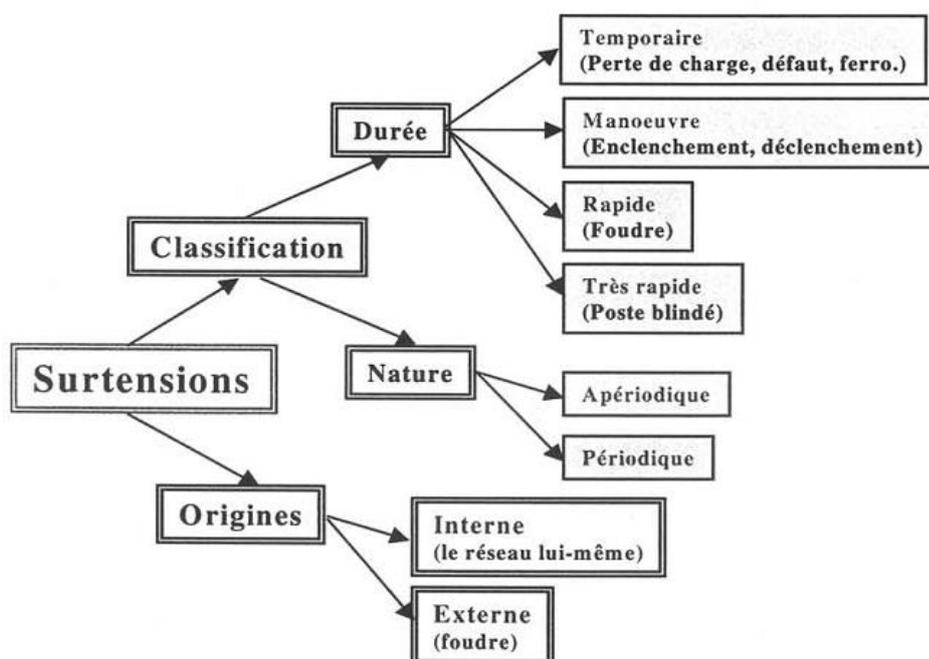


Figure II.1. Classification et origines des surtensions.

Ces phénomènes peuvent être la cause de dommages dans les réseaux et les systèmes électriques par surtension (claquage diélectrique). En fait, les risques se situent

essentiellement au niveau des dysfonctionnements, de la destruction de matériel et, en conséquence, de la non continuité de service. Ces effets peuvent apparaître sur les installations des distributeurs d'énergie ou sur les installations des utilisateurs. Les perturbations peuvent conduire à :

- des interruptions courtes (réenclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes),
- des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel).

Il est difficile pour de concevoir un matériel qui peut supporter tous les types de surtensions. Les chercheurs et les ingénieurs doivent trouver un compromis entre les niveaux de protection et le problème économique. La coordination de l'isolement électrique des ouvrages a pour objet de donner à chaque ouvrage les moyens de supporter sans dommages les niveaux de tensions ou de surtension auxquels ils peuvent être soumis pendant leur fonctionnement. Elle comporte deux aspects :

- un aspect passif visant à donner une bonne tenue du matériel aux contraintes électriques en tension ;
- un aspect actif visant à diminuer le niveau des surtensions par l'utilisation des dispositifs de protection comme les parafoudres, les éclateurs, les réactances shunt, les compensateurs statiques ...

### **I.3. Caractérisation des transitoires électromagnétiques**

Caractériser par la mesure les transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique directement in situ n'est pas une tâche aisée et très coûteuse. En effet, les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques sont causés par les manœuvres, les défauts et les autres perturbations comme la foudre. Ils impliquent une gamme de fréquence de zéro à quelques MHz d'une part et nécessite des réseaux exclusivement consacrés la mesure.

La solution la plus utilisée est la simulation. La précision des résultats de simulation obtenus par les analyseurs transitoires de réseaux (*Transient Network Analysis (TNA)*) ou par les calculs informatiques dépend de la représentation des composants du réseau ainsi que des données d'entrée disponibles. Des représentations valables sur toute la gamme de fréquence de 0 Hz (courant continu) à 50 MHz ou plus sont pratiquement impossibles pour tous les composants d'un réseau. C'est pourquoi il faut examiner en détail les

caractéristiques physiques d'un élément spécifique d'un réseau qui ont un effet décisif sur la partie du phénomène transitoire présentant un intérêt.

La simulation par TNA s'est avérée insuffisante sachant les phénomènes non linéaires qui interviennent lors d'un transitoire électromagnétique ainsi que la dépendance fréquentielle des paramètres électriques des composants (lignes, câbles,...) du réseau [II-1]. Par contre le calcul informatique (modélisation numérique) est devenu un outil incontournable pour l'étude et l'analyse des transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique.

## **II. Modélisation des surtensions transitoires dans le réseau électrique**

### **II.1. Qu'est-ce qu'un modèle ?**

Le principe d'un modèle est de remplacer un système complexe en un objet ou opérateur simple reproduisant les aspects ou comportements principaux de l'original (ex : modèle réduit, maquette, modèle mathématique ou numérique, modèle de pensée ou raisonnement,...).

### **II.2. Pourquoi faut-il modéliser ?**

Dans la nature, les systèmes et phénomènes physiques les plus intéressants sont aussi les plus complexes à étudier. Ils sont souvent régis par un grand nombre de paramètres non-linéaires interagissant entre eux (électrique, électromagnétique, mécanique, thermique,...).

### **II.3. Quels sont les différents modèles ?**

L'une des solutions est de recourir à une série d'expériences pour analyser les paramètres et grandeurs du système. Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (équipements électriques THT, matériaux rares, instrumentations très chères...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, Très Haute Tension,...). Enfin il est peut être difficile de mesurer tous les paramètres : échelles du problème trop petites ou trop grandes (réseaux électrique).

On peut aussi construire un modèle mathématique permettant la représentation du phénomène physique. Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) linéaires dont on ne connaît pas de solutions analytiques en

général. Il faut alors résoudre le problème numériquement en transformant les équations continues de la physique en un problème discret sur un certain domaine de calcul (le maillage). Dans certains cas il s'agit de la seule alternative (nucléaire, astrophysique, spatial...). Dans d'autres cas, les simulations numériques sont menées en parallèle avec des expérimentations.

Le choix du modèle mathématique (modélisation) est un compromis entre le problème posé (quelles grandeurs veut-on calculer et avec quelle précision) et les moyens disponibles pour y répondre. En fait, les équations du modèle retenu sont soumises à un certain nombre d'hypothèses basées sur les sciences de l'ingénieur et il faut connaître leur domaine de validité pour pouvoir vérifier que la solution obtenue est satisfaisante. Si le modèle mathématique n'admet pas de solution analytique, il est alors nécessaire de chercher une solution approchée numérique de ce modèle.

#### **II.4. De la modélisation à la simulation numérique**

Les différentes étapes pour modéliser un système complexe :

- Recherche d'un modèle mathématique représentant la physique. Mise en équation.
- Elaboration d'un maillage. Discrétisation des équations de la physique.
- Résolution des équations discrètes (souvent systèmes linéaires à résoudre).
- Transcription informatique et programmation des relations discrètes.
- Simulation numérique et exploitation des résultats.

L'ingénieur peut être amené à intervenir sur l'une ou plusieurs de ces différentes étapes.

#### **II.5. Principes de modélisation dans les réseaux électriques**

L'approche de modélisation des régimes transitoires dans les réseaux électriques est fondée sur l'utilisation des éléments constitutifs de base des circuits électriques. L'analyse des transitoires dans les réseaux électriques est un processus mathématiquement complexe et nécessite l'utilisation de logiciels spécialisés.

##### **II.5.1 Méthodes classique pour l'analyse des transitoires**

Les principales méthodes de calcul des régimes transitoires dans un réseau électrique, les plus rencontrées dans la littérature, sont regroupées par trois grandes familles [II-3] :

- Les méthodes basées sur la théorie des ondes mobiles (initialement cette méthode est développée par Bergeron) ;
- Les méthodes utilisant les transformations de Fourier ou de Laplace (transformation dans le domaine fréquentiel utilisant les théorèmes de convolution) ;
- Les méthodes aux différences finies (résolution des équations des lignes de transmissions par la méthode numérique dite FDTD (*Finite Difference Time Domain*)).

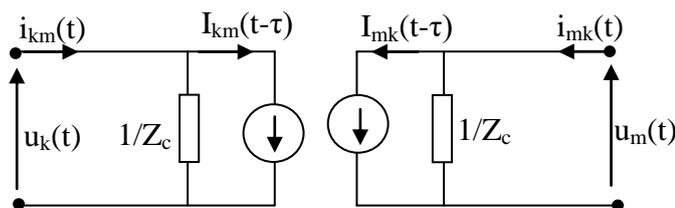
**- méthode des ondes mobiles**

La méthode de Bergeron est largement utilisée dans les calculs de régime transitoire électromagnétique, notamment cette méthode a été implantée dans le logiciel de EMTP (*ElectroMagnetic Transients Program*) par H.W. Dommel [II-4]. Cette méthode, associée à la représentation de chaque ligne par un schéma équivalent sous forme nodale (figure II.2) et l'intégration des équations différentielles par la méthode des trapèzes, est très puissante, bien adaptée au calcul à l'ordinateur et exprime bien l'aspect physique des phénomènes. La méthode de trapèzes a été utilisée pour convertir les équations différentielles des composantes (relation courant-tension sur les circuits localisés) du réseau en équations algébriques comportant les tensions, les courants et les valeurs à l'état antérieur. La forme matricielle générale du système d'équation qui décrit le comportement transitoire du réseau est la suivante [II-4] :

$$[Y][V]=[i(t)] - [I(t-\tau)] \tag{II.1}$$

où :

- [Y] : Matrice admittance nodale ;
- [V] : Vecteur de tensions nodales (inconnu) ;
- [i(t)] : Vecteur de courants sources injectées ;
- [I(t-τ)] : Vecteur de courant des sources fictives.

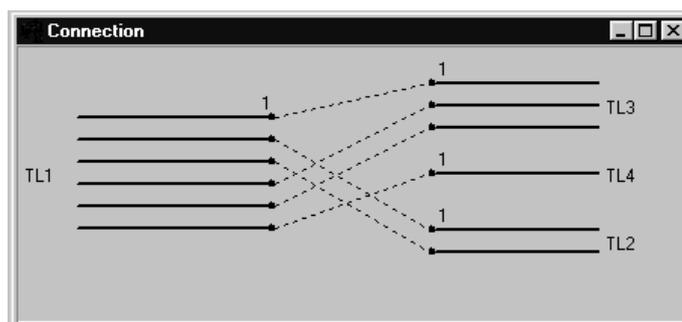


**Figure II.2.** Schéma équivalent d'une ligne (d'impédance caractéristique  $Z_c$  et de constante de temps  $\tau$ ) par les ondes mobiles.

**- méthode aux différences finies****a) résolution des équations des lignes de transmissions**

Les codes de simulations élaborés en utilisant la méthode numérique dite "Finite Difference Time Domain", sont généralement destinés à être utilisés pour prédire la diaphonie entre les conducteurs dans les lignes de transmissions multiconducteurs ainsi que les courants et tensions induits dans les terminaisons dues aux champs incidents.

Parmi ces codes nous avons celui dénommé Branched Multi-conductor Transmission Lines (BMTL) [II-5] ; il s'agit d'un programme FDTD pour le calcul des réponses sur les lignes de transmissions multiconducteurs interconnectées. L'excitation des lignes peut être soit un champ électromagnétique incident, soit des sources de tension placées aux extrémités des lignes. Il est même possible de calculer les réponses lorsque les deux types d'excitations existent simultanément. Le programme BMTL peut gérer plusieurs lignes de transmissions connectées les unes aux autres (figure II.3).



**Figure II.3.** Exemple de quatre lignes interconnectées.

Une ligne de transmission est décrite pour le programme en définissant plusieurs de ses propriétés. Parmi les propriétés à définir figurent la longueur de la ligne, le nombre de conducteurs, les matrices d'inductance et de capacité, les impédances de terminaison et les paramètres de discrétisation (spatial et temporel). Étant donné que les seules propriétés décrivant les caractéristiques des lignes sont les matrices d'inductance et de capacité, les lignes sont supposées sans pertes (pas de résistance et pas de conductance).

Le code BMTL est basé sur une première étape qui consiste à déduire des équations de récurrence après discrétisation des équations des lignes de transmissions par FDTD.

***Remarque :*** Les équations des lignes de transmissions ainsi que leur discrétisation par FDTD sont détaillées dans les paragraphes IV et V de ce chapitre).

Afin de traiter également le cas des lignes non uniformes où des lignes interconnectées (figure II.3), où nous avons la présence d'une jonction, des équations supplémentaires, établies à partir des lois de Kirchhoff au niveau de la jonction même (nœud d'interconnexion), sont introduites [II-5].

### ***b) résolution des équations de propagation***

Dans le même ordre d'idée, toujours en utilisant les équations des lignes de transmission, il est aussi possible d'analyser la propagation des signaux électriques dans un réseau radial ou maillé de conducteurs filiformes en résolvant par FDTD l'équation de propagation en tension (courant) suivante [II-6]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} - RGU - (RC + LG) \frac{\partial U}{\partial t} - LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad \eta = x, y \text{ ou } z \quad (\text{II.2})$$

Où :

R, L, C et G : paramètres linéiques de la ligne de transmission qui sont définis en annexe.

## **II.5.2. Méthodes numériques pour l'analyse des transitoires**

Pour étudier des structures complexes de phénomènes physiques, on dispose, à l'heure actuelle, de méthodes d'approximation permettant de résoudre la plupart des problèmes pour lesquels il n'existe pas de solution analytique formelle. Toutefois, avec l'aide de l'ordinateur et de moyens mathématiques adéquats, on peut réduire les erreurs introduites par les approximations et obtenir des valeurs numériques précises. Dès lors, la discrétisation du problème correspond au choix d'un modèle numérique permettant de traiter les équations mathématiques. Il est important de savoir distinguer et hiérarchiser les différents niveaux d'hypothèses utilisés pour modéliser un phénomène physique. En effet, la solution exacte d'un modèle mathématique qui ne correspond pas à la réalité physique est inutile.

Depuis maintenant presque une décennie pour analyser les transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique, des méthodes numériques sont utilisées pour traiter certains types de problèmes :

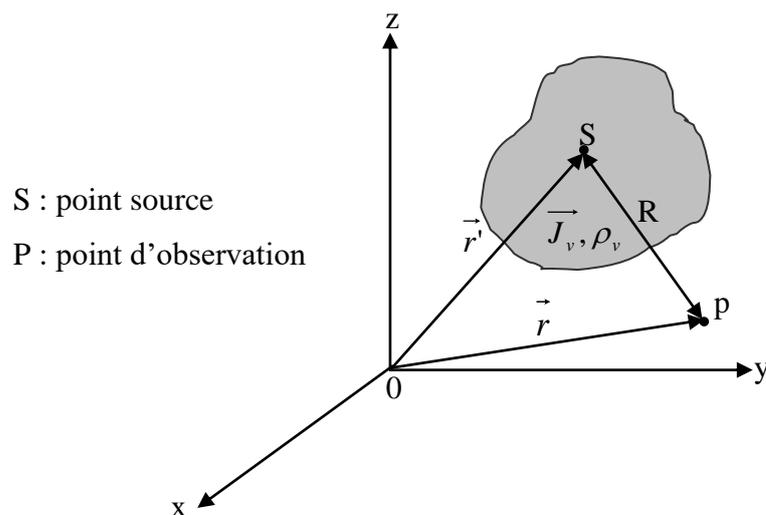
- Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) [II-7] ;
- Transmission Line Matrix (TLM) [II-7] ;
- Méthode des Moments (MoM) [II-7] ;

- Formalisme Topologique (Théorie des Lignes de Transmissions) [II-8].

Les méthodes numériques telle que les PEEC, la TLM et la MoM sont généralement de mise en œuvre très lourde et inadaptées lorsque les dimensions du dispositif électrique sont importantes et à frontières ouvertes [II-9]. Notons aussi que parmi ces méthodes, la résolution d'une équation intégrale (dédite à partir des équations de Maxwell) par la méthode des moments est la plus rigoureuse [II-9]. Nous proposons un très bref aperçu sur cette dernière dans ce qui suit.

### II.5.2.1 bref aperçu sur la modélisation par la théorie des antennes

Soit une structure métallique de densité volumique de courant  $\vec{J}_v$  et de densité volumique de charge  $\rho_v$  constituant une source d'un champ électromagnétique (figure II. 4) qui rayonne dans le milieu environnant  $(\sigma, \mu, \epsilon)$ , homogène, isotrope, conducteur et infini.



**Figure II.4.** Source de rayonnement électromagnétique dans un milieu infini.

A partir des équations de Maxwell, de la loi de la conservation de la charge et de la condition de jauge (unicité du potentiel vecteur) pour un milieu conducteur, on peut établir la relation suivante qui donne le champ électrique rayonné en un point du milieu infini, par la source volumique [II-10] :

$$\vec{E}' = \frac{1}{j\omega\epsilon_c} \iiint_v [\vec{grad} \text{div} + k^2] \vec{J}_v(\vec{r}') G(R) dv' \quad (\text{II.3})$$

avec :

$G(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$  : fonction de Green pour un milieu infini.

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \tag{II.4}$$

$$k = \omega\sqrt{\mu_0 \varepsilon_c} = j\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\varepsilon)} \tag{II.5}$$

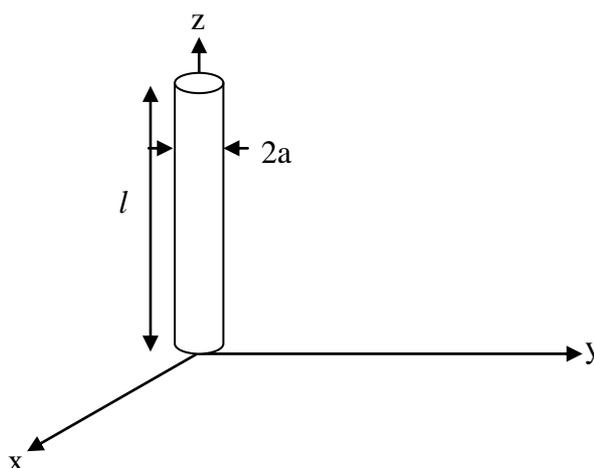
$\varepsilon_c$  : permittivité complexe qui fait intervenir la conductivité du milieu.

$k$  : constante intrinsèque de propagation du milieu.

**- Approximation des antennes minces**

Pour un fil rectiligne (figure II.5), conducteur de longueur  $l$  et de rayon de la section transversal  $a$  tel que :

$$\begin{cases} a \ll l \\ a \ll \lambda \end{cases} \quad (\lambda \text{ étant la longueur d'onde du signal})$$



**Figure II.5.** Conducteur filiforme dans un milieu infini et dissipatif.

Dans le cas où la densité de courant est restreinte à la surface du cylindre circulaire, l'équation intégrale (II.3) se réduit à une intégrale de surface. De plus si les conditions de la théorie des fils minces sont réunis ( $a \ll \lambda$  et  $a \ll l$ ), alors l'équation intégral-différentielle qui donne la composante tangentielle du champ rayonné en un point  $z$  de la surface du fil rectiligne se réduit alors à [II-10]:

$$E^r = \frac{1}{j\omega\varepsilon_c} \int_0^l I(z') \left[ \frac{\partial^2}{\partial z \partial z'} + k^2 \right] G(R) dz' \tag{II.6}$$

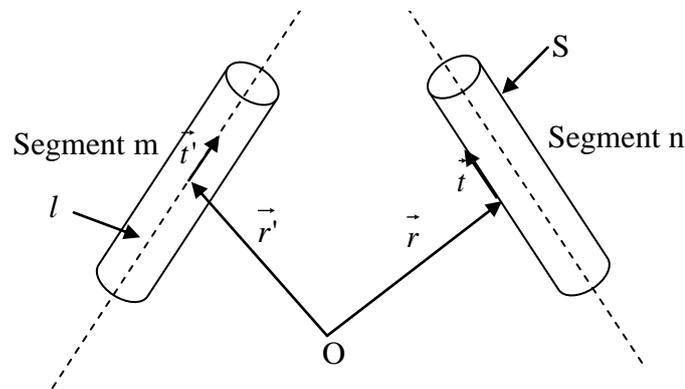
Le courant  $I(z')$  a pour origine le champ électrique qualifié de champ appliqué  $E^i$  qui existe sur toute la surface du fil dans le cas d'un champ incident (réception) ou d'une manière localisée dans le cas d'un générateur (émission).

**Remarque :**

Pour un milieu inhomogène (ex : interface sol-air), la prise en compte de l'interface entre deux demi-milieus (air et sol) est réalisée par correction de la fonction de Green  $G(R)$ .

**Interaction électromagnétique**

Soit deux segments m et n (émetteur et récepteur), appartenant au même conducteur ou à deux conducteurs différents (avec pertes) comme il est montré en figure II.6.



**Figure II.6.** Configuration géométrique pour l'interaction électromagnétique.

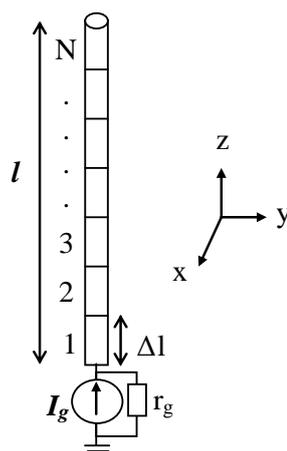
L'interaction électromagnétique entre les segments m et n est décrite par l'équation suivante sur la surface du segment récepteur :

$$E^r(r) + E^i(r) = I \cdot Z_s \tag{II.7}$$

Où :

$Z_s$  : impédance de surface [II-10].

L'équation intégrale ainsi obtenue (II.7) ne présente pas de solution analytique. Des méthodes matricielles mieux connues sous le nom de "méthode des moments" [II-11] sont utilisées. L'intégration numériquement nécessite la subdivision du conducteur de longueur  $l$  en  $N$  éléments de longueur  $\Delta l$  (figure II.7).



**Figure II.7.** Subdivision d'un conducteur filiforme.

L'intégration de l'équation (II.7) en champ électrique est réalisée par la méthode projective de Galerkin [II-11]. Dans le cas d'un conducteur alimenté (figure II.7) par un générateur de courant localisé  $I_g$ , cette intégration conduit au système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_{22} & \dots & z_{2i} & \dots & z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & z_{i2} & \dots & \dots & \dots & z_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & z_{N2} & \dots & \dots & \dots & z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_g \\ -z_{21}I_g \\ \dots \\ -z_{i1}I_g \\ \dots \\ z_{N1}I_g \end{bmatrix} = [Zmn][I] \quad (II.8)$$

Où : [Zmn]: matrice impédance généralisée [II-10].

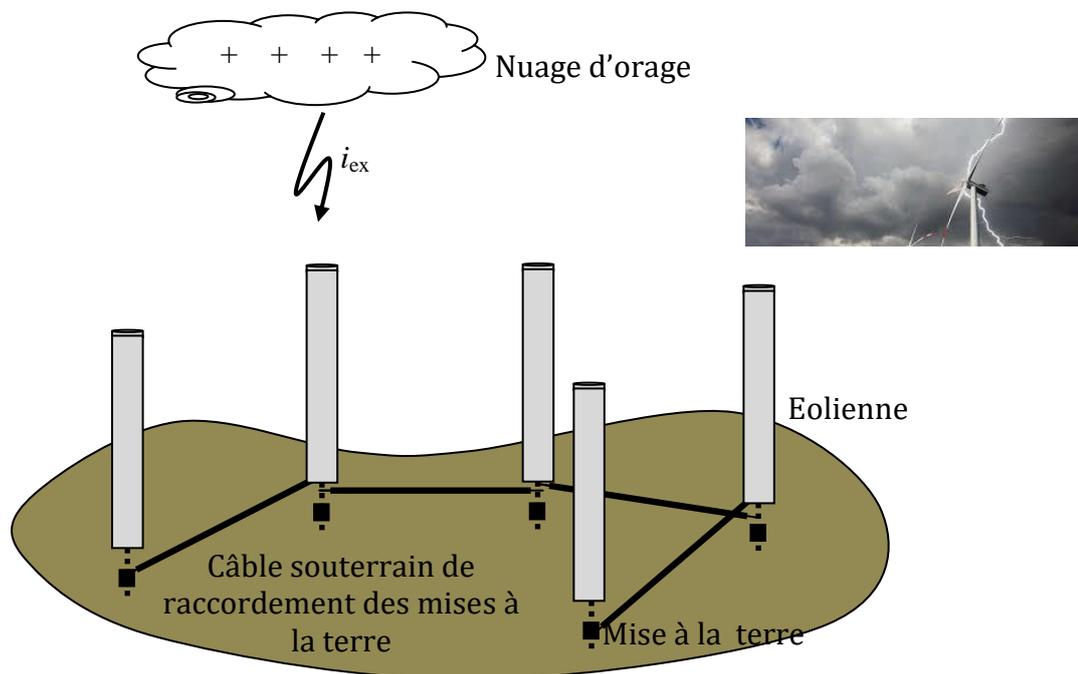
### III. Modélisation du foudroiement d'un parc éolien

Notre choix, de l'approche mathématique pour traiter par modélisation la problématique objet de ce mémoire de master qui traite un transitoires électromagnétique résultant d'un impact direct de foudre sur un parc éolien (figure II.8), sera porté essentiellement sur une méthode qui :

- garantirait une résolution directement dans le domaine temporel,
- ne nécessiterait pas d'énormes capacités mémoires du calculateur utilisé (i.e. une discrétisation monodimensionnelle),
- ...etc.

De plus, il y a un autre facteur qui s'ajoute à ce choix qui est le temps de calcul (CPU time). Le temps de calcul et de simulation consommé devra être minimal. L'idéal serait

d'utiliser la méthode numérique la moins coûteuse en temps de calcul et fiable en matière de résultats.



**Figure II.8.** Modèle de parc éolien à étudier.

### III.1. Choix du modèle mathématique

Cette première présentation de notre dispositif électrique en figure II.8, montre que les méthodes numériques (PEEC, TLM et MoM) sont inappropriées [II-9], dimensions importantes et frontières ouvertes, pour sa modélisation.

Aussi, l'utilisation de l'équation matricielle nodale nécessite la discrétisation du dispositif électrique en cellules en  $\pi$ , ce qui va conduire à une matrice admittance nodale [Y] de très grande taille et très creuse qui risque d'affecter la qualité des résultats.

L'utilisation d'un programme type BMTL [II-5] est directement rejetée car il ne permet pas de tenir compte des pertes par effet Joule (effet de la résistance lorsque le sol est de conductivité finie), aussi il ne permet pas d'introduire les mises la terre comme ligne de transmission et elles sont vus comme de simples résistances placées sur les terminaisons.

Dans un précédent travail réalisé par L. Boufenneche [II-12] qui traite l'impact direct et indirect de la foudre sur une cascade de pylônes munie de ses lignes THT et ses câbles de gardes, l'auteur compare les résultats obtenus par la méthode des moments (résolution d'une équation intégrale) à ceux réalisés avec le formalisme topologique directement en

temporel ; l'auteur relève la parfaite concordance, en allure et en amplitude, entre les deux modélisations avec un avantage pour le formalisme topologique qui est réalisé avec des temps de calcul très faible comparativement à ceux obtenus par la méthode des moments. Dans son travail l'auteur utilise la théorie des lignes de transmissions pour représenter le pylône, la ligne et le câble de garde. Ce travail est réalisé en tenant compte des pertes électriques.

En analysant notre dispositif en figure II.8, et en s'inspirant du travail de L. Boufenneche [II-12], nous optons pour l'utilisation du formalisme topologique en temporel, basé sur les lignes de transmissions, qui nous semble le mieux approprié.

En effet, notre dispositif comprend une éolienne, dont le tronc (mât) est une tour en treillis ou le plus souvent une tour autoportante, tubulaire et conique ; aucun hauban n'est alors nécessaire. C'est la solution retenue pour les grandes éoliennes. Nous avons aussi un câble isolé et une mise à la terre réalisée avec des conducteurs nus filiformes.

Dans la littérature le câble isolé ainsi que la mise à la terre sont souvent décrits par la théorie des lignes de transmissions ; l'éolienne est d'aspect filiforme au regard du diamètre principale de son tronc (mât) qui est très faible par rapport à sa hauteur, sa représentation par la théorie des lignes de transmissions est alors envisageable.

Dans ce qui va suivre, après un bref aperçu sur la théorie des lignes de transmission, nous détaillons la présentation du formalisme topologique.

## **IV. Théorie des lignes de transmissions**

### **IV.1. Introduction**

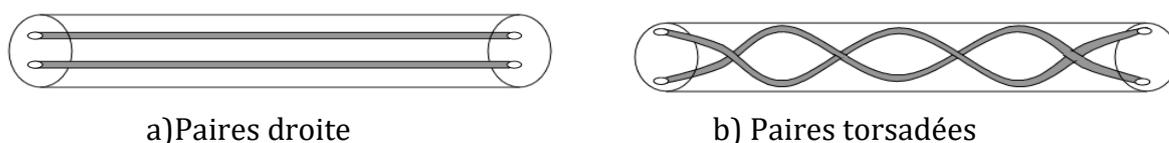
Les lignes de transmission permettent le transfert des informations. Les distances à parcourir, la bande passante des signaux et la technologie utilisée dépendent du type d'information. La théorie des lignes de transmission permet l'étude des phénomènes de propagation le long d'une structure filaire [II-13]. Cette méthode est basée sur la résolution de deux équations différentielles liant la tension et le courant en une position sur le conducteur.

Ce principe permet donc de déterminer, de façon approchée, les tensions et courants induits sur les conducteurs filaires ne comportant ni coude ni discontinuité géométrique. Elle s'applique particulièrement aux structures filaires simples, en garantissant des temps de calculs relativement faibles.

L'utilisation de cette approche est liée à la connaissance des paramètres linéiques dont l'évaluation peut se faire par rapport à un référentiel constitué par le sol lorsqu'il s'agit d'une structure filaire aérienne ou souterraine.

#### IV.2. Hypothèses générales pour la théorie des lignes de transmissions

Une ligne de transmission est un ensemble de deux ou plusieurs conducteurs acheminant de concert un signal électrique, d'une source (ou émetteur) vers une charge (ou récepteur) [II-13]. Exemples de lignes bifilaires (figure II.9) :

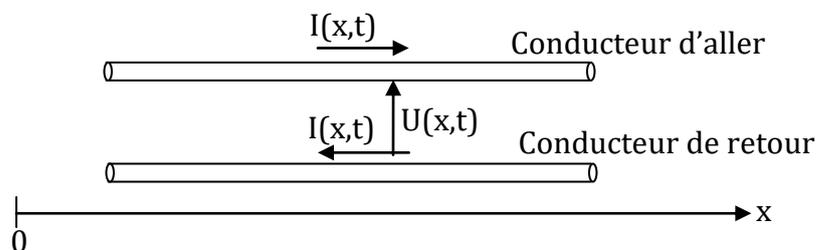


**Figure II.9.** Les lignes bi-filaires.

a) deux conducteurs filaires parallèles et maintenus à distance constante l'un de l'autre par un isolant.

b) deux conducteurs filaires isolés torsadés.

La ligne bifilaire est la plus simple (figure II.10) ; elle est constituée de 2 fils conducteurs cylindriques identiques parallèles entre eux (figure II.10) [II-13].



**Figure II.10.** Schéma simplifié d'une ligne bifilaire.

La théorie des lignes de transmissions est construite sur les propriétés du champ électromagnétique ; en utilisant les équations de Maxwell-Fraday et Maxwell-Ampère et sous certaines approximations et hypothèses, il est alors possible de traduire ces équations liant les champs électrique et magnétique en équations faisant apparaître directement le courant et la tension. Les hypothèses de base de l'approximation des lignes de transmissions sont [II-13] :

- La géométrie de la ligne est raisonnablement uniforme ;
- Le mode de propagation quasi transverse électromagnétique (quasi-TEM) est prépondérant le long de la ligne ;

- Les dimensions transversales de la ligne sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde significative minimum  $\lambda_{\min}$  ( $h \ll \lambda_{\min}$ ); c'est-à-dire que toutes les dimensions transversales (hauteurs, espacements entre conducteurs, diamètre des conducteurs) sont faibles devant la plus petite longueur d'onde ;

- Conservation du courant (courant sur le conducteur de retour est égal et opposé au courant sur le conducteur d'aller au même point d'abscisse x).

Sous ces conditions, la théorie des lignes de transmission donne des résultats valables jusqu'à des fréquences de l'ordre de quelques dizaines de Mégahertz et offre l'avantage d'une mise en œuvre aisée aussi bien en fréquentiel qu'en temporel [II-13].

### IV.3. Équations de base des lignes de transmission

L'équation différentielle d'une ligne de transmission uniforme dont les paramètres ne varient pas en fonction de la fréquence, est obtenue en analysant une section infinitésimale de ligne  $\Delta x$  (figure II.11). La ligne est connectée au nœud de gauche k et au nœud de droite m. Si  $\Delta x \rightarrow 0$  alors on obtient les équations différentielles partielles d'une ligne de transmission [II-13] :

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial x} + RI(x,t) + L \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} = 0 \quad \text{(II.9)}$$

$$\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} + GU(x,t) + C \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = 0 \quad \text{(II.10)}$$

La transformée de Laplace de ces équations permet d'écrire :

$$\frac{d\bar{U}(x,\omega)}{dx} = -\bar{Z}\bar{I}(x,\omega) \quad \text{(II.11)}$$

$$\frac{d\bar{I}(x,\omega)}{dx} = -\bar{Y}\bar{U}(x,\omega)$$

Et de déduire l'équation de propagation en tension suivante:

$$\frac{d^2\bar{U}(x,\omega)}{dx^2} = \bar{Z}\bar{Y}\bar{U}(x,\omega) = \gamma^2\bar{U}(x,\omega) \quad \text{(II.12)}$$

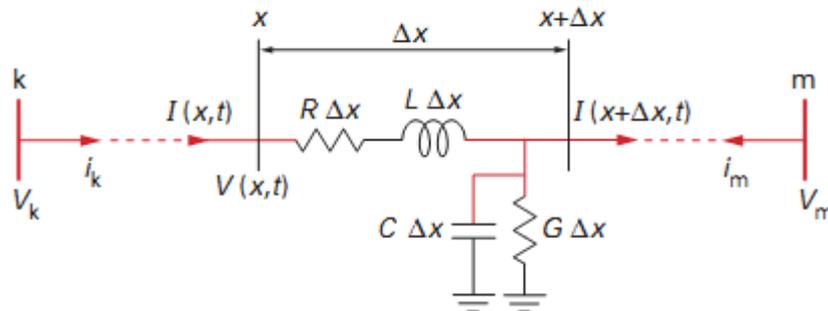
Avec :

$$\bar{Z} = R + jL\omega$$

$$\bar{Y} = G + jC\omega$$

$$\gamma^2 = \bar{Z}.\bar{Y}$$

- R est la résistance linéique de la ligne ;
- L est l'inductance linéique de la ligne ;
- G est la conductance linéique transverse de la ligne ;
- C est la capacité linéique transverse de la ligne.



**Figure II.11.** Modélisation d'une section  $\Delta x$  d'une ligne à constantes distribués.

Toutes les équations présentées ci-avant correspondent au cas d'une ligne à un seul conducteur d'aller et un conducteur de retour. Dans le cas d'une ligne multifilaires, il faut reprendre les équations avec des vecteurs et des matrices :

$$\frac{d^2[\bar{U}(x, \omega)]}{dx^2} = [\bar{Z}][\bar{Y}][\bar{U}(x, \omega)] \quad \text{(II.13)}$$

$$\frac{d^2[\bar{I}(x, \omega)]}{dx^2} = [\bar{Y}][\bar{Z}][\bar{I}(x, \omega)] \quad \Delta \quad \text{(II.14)}$$

En utilisant la théorie des valeurs propres, il est possible de transformer ces équations couplées des quantités en phase aux quantités modales de manière telle que les équations deviennent découplées. Cela signifie que les produits  $[\bar{Z}][\bar{Y}]$  et  $[\bar{Y}][\bar{Z}]$  sont des matrices diagonales. Les équations modales sont résolues comme les équations d'une ligne monophasée. La transformation inverse est utilisée pour passer des quantités modales aux équations en phase du réseau connecté à la ligne multifilaires [II-14].

La représentation des lignes aériennes et des câbles nécessite l'utilisation de modèles détaillés prenant en compte en particulier [II-13] :

- les couplages capacitifs et inductifs entre les parties conductrices ;
- les pertes dans le sol ;
- la variation des paramètres linéiques en fonction de la fréquence.

Mais, la modélisation des composants (paramètres linéiques) du réseau pour la gamme complète des fréquences n'est pas pratiquement réalisable et il est donc

nécessaire de choisir des modèles adaptés à la nature et à la gamme de fréquences du phénomène étudié.

Les modèles de type FD pour les lignes et de type FDP pour les câbles sont les plus appropriés. Il demeure acceptable d'utiliser les modèles de type CP en l'absence de données supplémentaires requis pour la construction des modèles de type FD et de type FDP.

- Le modèle CP est le modèle à paramètres distribués et constants. C'est le modèle de premier niveau qui permet de représenter les délais de propagation pour les lignes et les câbles.

- Le modèle FD permet de représenter la dépendance fréquentielle des paramètres, mais utilise une matrice de transformation constante calculée à une fréquence.

- Le modèle FDP est le modèle le plus précis car il permet de tenir compte complètement de la variation fréquentielle des paramètres, il est donc plus utile pour les câbles.

## **V. Formalisme topologique pour l'analyse des transitoires électromagnétiques dans le réseau électrique**

### **V.1. Introduction**

Il est connu qu'il est possible de traiter les réseaux électriques en utilisant la théorie des graphes. L'étude du graphe d'un réseau permet d'en déterminer les caractéristiques topologiques à partir de paramètres tels que le nombre de nœuds (N), de liens (L) et le nombre de ses composantes connexes. La représentation d'un réseau électrique par un graphe est ensuite traduite mathématiquement par un système matriciel. La matrice est la manière la plus simple et la plus utile pour représenter le graphe d'un réseau. Les matrices se prêtent facilement aux manipulations mathématiques. Dans l'analyse du réseau électrique, les matrices s'avèrent être la manière normale d'exprimer le problème. N'importe quel réseau peut être décrit par l'ensemble des matrices basées sur la topologie du réseau.

Le formalisme topologique est élaboré après représentation du système électrique étudié par un graphe dont les liens sont des lignes de transmissions et les nœuds sont leurs jonctions et leurs extrémités.

Ce formalisme nous permet de déduire un système matriciel  $[A][X]=[B]$ . Le formalisme ainsi présentée traduit l'intégration d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles (équations des lignes) par la méthode numérique dite FDTD (*Finite Difference Time Domain*) sur les liens du graphe en tenant compte des relations électriques sur l'ensemble des nœuds.

## V.2. Formalisme topologique

Le formalisme topologique électromagnétique permet d'étudier la propagation d'une onde électrique dans un réseau maillé ou radial [II-8]; il consiste à résoudre un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui traduisent la propagation des ondes sur les différentes lignes en tenant compte des relations électriques (Loi de Kirchhoff) sur l'ensemble des nœuds du réseau. Mathématiquement il se traduit simplement comme suit :

$$[A][X]=[B] \quad (\text{II.15})$$

$[A]$  : matrice topologique, qui regroupe l'ensemble des relations électriques courant-tensions entre les extrémités de chaque ligne.

$[X]$  : vecteur inconnu (courants et tensions sur l'ensemble des nœuds du réseau) ;

$[B]$  : vecteur excitation.

La première étape consiste en la construction de la matrice  $[A]$  qui est composée de deux sous matrices [II-8] :

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_1] \\ [A_2] \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$[A_1]$  : sous-matrice de propagation, traduit la solution générale des équations différentielles aux dérivées partielles sur l'ensemble des lignes.

$[A_2]$  : sous-matrice des relations électriques, déduite des lois de Kirchhoff (KCL et KVL) appliquées sur l'ensemble des nœuds du réseau.

En deuxième étape, nous construisons le vecteur  $[B]$  contenant un générateur de tension ou de courant localisé.

$[X]$  : vecteur inconnu (courants et tensions induits sur l'ensemble des nœuds du réseau).

### V.2.1. Formalisme topologique en fréquentiel

L'utilisation de la théorie des lignes de transmission en fréquentiel (le système (II.11) et l'équation (II.12)), permet de déterminer les tensions et les courants sur chacune des lignes du réseau, dès lors que celles-ci sont uniformes, c'est-à-dire dès lors que leurs caractéristiques électriques et géométriques ne varient pas en fonction de la longueur. Pour une ligne bi-filaire (figure II.12), si le courant et la tension sont posés à l'entrée de la ligne ( $x=0$ ), alors on peut déterminer ces grandeurs en tout point d'abscisse  $x$  de la ligne par la relation [II-13] :

$$\begin{bmatrix} U(x, \omega) \\ I(x, \omega) \end{bmatrix} = [T(x)] \begin{bmatrix} U(0, \omega) \\ I(0, \omega) \end{bmatrix} \quad \text{(II.17)}$$

Où :  $[T(x)]$  : est la matrice de transition (ou matrice Chaîn).

Avec :

$$[T(x)] = \begin{bmatrix} \text{Cosh}(\gamma x) & -\bar{Z}_c \text{Sinh}(\gamma x) \\ -\bar{Y}_c \text{Sinh}(\gamma x) & \text{Cosh}(\gamma x) \end{bmatrix} \quad \text{(II.18)}$$

$$\gamma = \sqrt{\bar{Z}\bar{Y}}$$

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad \text{et} \quad \bar{Y}_c = \bar{Z}_c^{-1}.$$

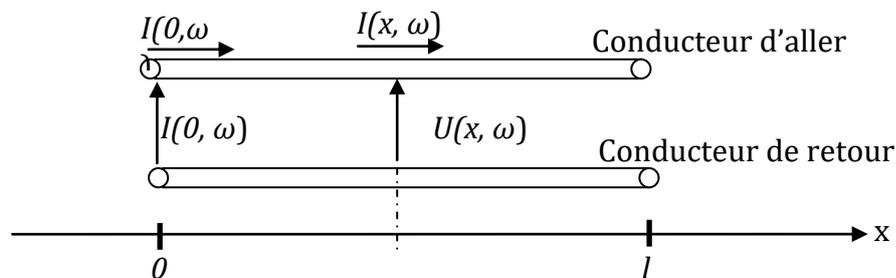


Figure II.12. Ligne bi-filaire de longueur  $l$ .

En théorie des lignes en fréquentiel, un résultat bien connu pour une ligne bifilaire de longueur  $l$  est celui qui consiste à représenter cette dernière par un quadripôle électrique (figure II.13) [II-13].

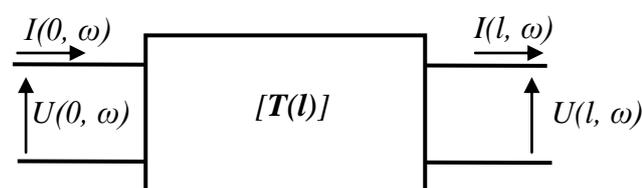


Figure II.13. Représentation d'une ligne par un quadripôle.

Cette représentation permet donc de déduire une écriture des grandeurs électriques en sortie en fonction de l'entrée en utilisant la matrice de transition  $[T(l)]$  :

$$\begin{bmatrix} U(l, \omega) \\ I(l, \omega) \end{bmatrix} = [T(l)] \begin{bmatrix} U(0, \omega) \\ I(0, \omega) \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

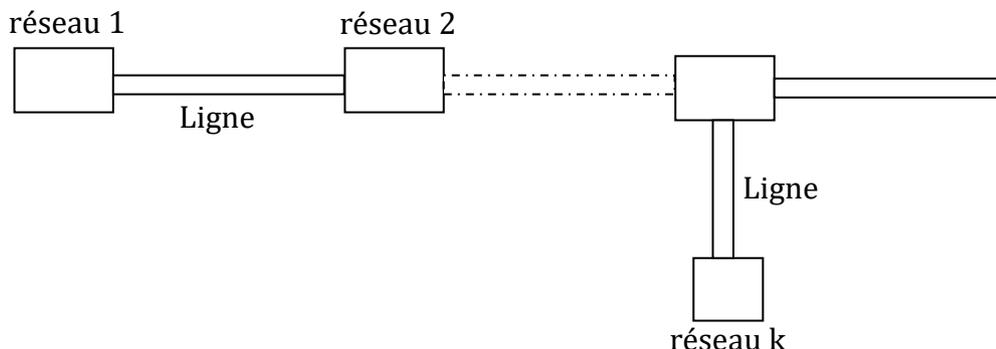
Que l'on peut mettre sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - [T(l)] \begin{bmatrix} U(l, \omega) \\ I(l, \omega) \\ U(0, \omega) \\ I(0, \omega) \end{bmatrix} = [0] \quad (II.20)$$

Ce système (II.19) est composé de 2 équations mais avec 4 inconnues.

**- sous matrice  $[A_1]$**

Le formalisme de la topologie électromagnétique [II-8] conduit à décomposer les lignes non uniformes en éléments uniformes interconnectés par l'intermédiaire de réseaux linéaires et excités par des générateurs localisés (figure II.14).



**Figure II.14.** Décomposition topologique d'un réseau de lignes.

Pour un réseau de n lignes et k réseaux, nous obtenons donc avec (II.20) un système de 2n équations avec 4n inconnues.

En définissant le vecteur inconnu (II.21) où chaque ligne d'indice i et de longueur  $l_i$  apporte sa contribution comme suit :

$$[X] = \begin{bmatrix} U_1(l_1, \omega) \\ I_1(l_1, \omega) \\ U_1(0, \omega) \\ I_1(0, \omega) \\ \\ U_i(l_i, \omega) \\ I_i(l_i, \omega) \\ U_i(0, \omega) \\ I_i(0, \omega) \\ \\ U_n(l_n, \omega) \\ I_n(l_n, \omega) \\ U_n(0, \omega) \\ I_n(0, \omega) \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Alors cette précédente étape nous permet, en utilisant le système (II.20), de construire la sous matrice  $[A_1]$  pour les  $n$  lignes, où chaque ligne d'indice  $i$  aura pour contribution :

$$\left[ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - [T_i(l_i)] \right] \quad (II.22)$$

**- sous matrice  $[A_2]$**

Le système matriciel ainsi obtenu, n'étant pas carré, il est complété par un second système qui traduit les relations électriques au niveau des  $k$  réseaux (nœuds). Cette étape nous permet de construire la sous matrice  $[A_2]$  en utilisant la relation générale (II.23) qui traduit les lois de Kirchhoff (KVL et KCL) [II-13] :

$$\sum_{j \in \alpha(i)} (Y_j^m U_j^m + Z_j^m I_j^m) = P^m \quad (II.23)$$

$\alpha(i)$  est l'ensemble des indices des lignes reliées au réseau (nœud)  $m$ .

Où :

$Z_j^m$  : sont des 0, 1, -1 et les impédances du réseau localisé  $m$  qui interviennent lors de l'application des lois de Kirchhoff (KVL et KCL) au nœud  $m$ .

$Y_j^m$  : sont des 0, 1, -1 et les admittances du réseau localisé  $m$  qui interviennent lors de l'application des lois de Kirchhoff (KVL et KCL) au nœud  $m$ .

$P^m$  : représente le vecteur générateur de courant ou de tension localisées et nous permet de construire le vecteur [B].

### V.2.2. Formalisme topologique en temporel

Le formalisme topologique en temporel est inspiré de celui en fréquentiel présenté ci-dessus, et nécessite la discrétisation des équations des lignes (II.9) et (II.10) par les différences finies [II-12].

#### V.2.2.1. Rappel des différences finies points centrés

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage [II-15]. Dans cette méthode nous avons la transformation de l'opérateur différentiel  $\frac{\partial}{\partial}$  en un opérateur aux différences  $\frac{\Delta}{\Delta}$  où chaque dérivée est remplacée par des différences finies ; c'est à dire que lors de la dérivation, la distance entre deux points ne tend pas vers zéro.

**Avantages** : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

**Inconvénients** : limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

#### **-Principe - ordre de précision**

La méthode des différences finies consiste à approximer les dérivées des équations de la physique au moyen des développements de Taylor et se déduit directement de la définition de la dérivée. Elle est due aux travaux de plusieurs mathématiciens du 18<sup>ème</sup> siècle (Euler, Taylor, Leibniz...) [II-15].

Soit  $u(x, y, z, t)$  une fonction de l'espace et du temps. Par définition de la dérivée, on a [II-15] :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} \quad (\text{II.24})$$

Si  $\Delta x$  est petit, un développement de Taylor de  $u(x + \Delta x, y, z, t)$  au voisinage de  $x$  donne :

$$u(x + \Delta x, y, z, t) = u(x, y, z, t) + \Delta x \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 u(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^3}{6} \frac{\partial^3 u(x, y, z, t)}{\partial x^3} + \dots \quad (\text{II.25})$$

En tronquant la série au premier ordre en  $\Delta x$ , on obtient :

$$\frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} = \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial x} + O(\Delta x) \quad (\text{II.26})$$

L'approximation de la dérivée  $\frac{\partial u(x)}{\partial x}$  est alors d'ordre 1 indiquant que l'erreur de troncature  $O(\Delta x)$  tend vers zéro comme la puissance première de  $\Delta x$ .

**Définition** : la puissance de  $\Delta x$  avec laquelle l'erreur de troncature tend vers zéro est appelée l'ordre de la méthode.

### V.2.2.2. Discrétisation des équations des lignes de transmissions par les différences finies

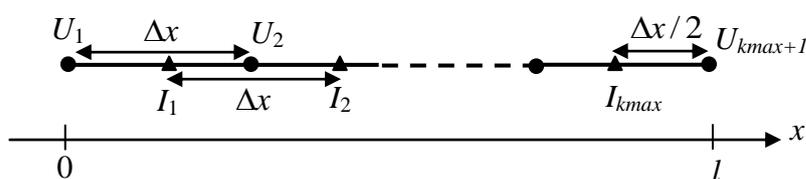
Soit les équations des lignes (II.9) et (II.10) à paramètres linéiques constants (modèle CP) :

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} + RI(x, t) + L \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} + GU(x, t) + C \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = 0$$

La méthode des différences finies permet de convertir les dérivées partielles de l'espace et du temps en des différences finies. Pour ce faire, il faut en premier subdiviser alternativement la ligne de longueur  $l$  en des nœuds de courant et de tension, pour déduire des équations de récurrences en tension et en courant en chaque nœud.

Deux nœuds consécutifs d'un même type sont séparés d'un intervalle  $\Delta x$ , et les deux extrémités de conducteur sont définies comme des nœuds de tension comme illustrée sur la figure (II.15) suivante [II-13] :



**Figure II.15.** Discrétisation spatiale d'une structure filaire.

Pour assurer le passage des grandeurs électriques de la forme continue à la forme discrète, nous définissons aussi un pas temporel  $\Delta t$ . En adoptant la discrétisation spatiale en figure II.15, nous obtenons alors les écritures discrètes suivantes au point d'abscisse  $x$  et à l'instant  $t$  :

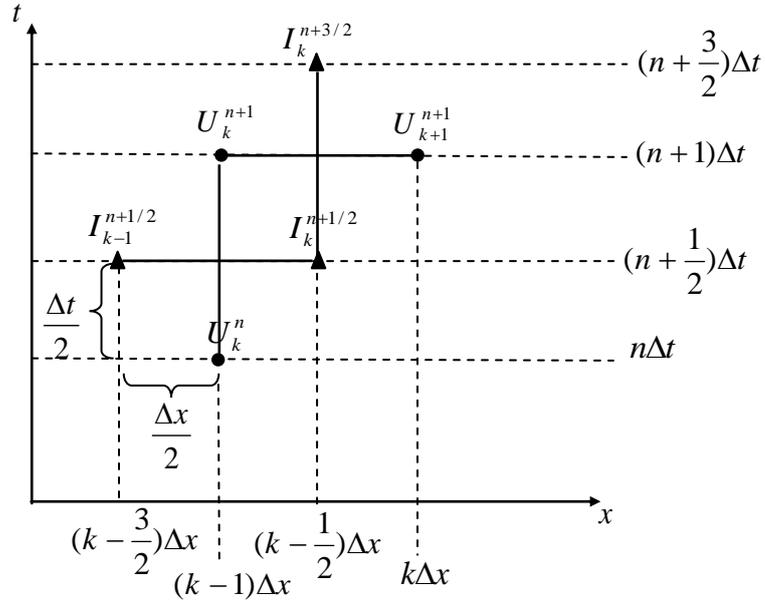
$$\begin{cases} U(x, t) = (U)_k^n = U((k-1)\Delta x, n\Delta t) \\ I(x, t) = (I)_k^n = I((k-1/2)\Delta x, (n-1/2)\Delta t) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$l = k_{\max} \Delta x$$

$$t_{\max} = n_{\max} \Delta t$$

Pour traduire les dérivées par les différences finies nous utilisons alors le schéma d'entrelacement spatio-temporel en figure II.16 suivante [II-13] :



**Figure II.16.** Entrelacement spatio-temporel.

Ce qui nous permet de déduire, en remplaçant les dérivées partielles par les différences finies dans les équations (II.9) et (II.10), les équations de récurrences en tension et courant suivantes :

- Pour  $k=2, \dots, k_{\max}$  :

$$(U)_k^{n+1} = \left[ C \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{G}{2} \Delta x \right]^{-1} \left\{ \left( C \frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{G}{2} \Delta x \right) (U)_k^n - \left( (I)_k^{n+1/2} - (I)_{k-1}^{n+1/2} \right) \right\} \quad (\text{II.28})$$

- Pour  $k=1, \dots, k_{\max}$  :

$$(I)_k^{n+3/2} = \left[ L \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{R}{2} \Delta x \right]^{-1} \left\{ \left( L \frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{R}{2} \Delta x \right) (I)_k^{n+1/2} - \left( (U)_{k+1}^{n+1} - (U)_k^{n+1} \right) \right\} \quad (\text{II.29})$$

Afin d'obtenir des résultats précis lors de l'utilisation d'équations de récurrences (II.28) et (II.29), la longueur de l'intervalle (longueur de la cellule)  $\Delta x$  ne doit pas être trop longue en termes de longueur d'onde calculée à la fréquence significative la plus élevée. En règle générale, la longueur ne doit pas être supérieure à un dixième de la longueur d'onde (où la longueur d'onde est liée à la vitesse de mode le plus bas de la ligne) [II-5] :

$$\Delta x \leq \frac{v_{\min}}{10f_{\max}} \quad (\text{II.30})$$

Le pas de temps utilisé pour la procédure de solution itérative doit également être choisi avec soin, sinon la solution pourrait être instable. Le critère de stabilité à utiliser est que le pas de temps doit être inférieur ou égal à la longueur de l'élément (cellule) divisée par la vitesse du mode le plus élevée sur la ligne, donc [II-5] :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_{\max}} \quad (\text{II.31})$$

Ceci est le critère de stabilité courant [II-5].

### V.2.2.3. Construction du système $[A][X]=[B]$ en temporel

En s'inspirant du formalisme topologique en fréquentiel  $[A][X]=[B]$ , il s'agit pour nous de retrouver une écriture similaire en temporel [II-12].

En se référant au schéma en figure II.15, nous notons que les courant et tensions ne co-existent pas au même nœud. Pour lever cet inconvénient nous allons créer deux nœuds fictifs selon la procédure suivante :

Soit l'équation de récurrence déduite précédemment (II.28) :

Pour  $k=2, \dots, k_{\max}$  :

$$(U)_k^{n+1} = \left[ C \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{G}{2} \Delta x \right]^{-1} \left\{ \left( C \frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{G}{2} \Delta x \right) (U)_k^n - \left( (I)_k^{n+1/2} - (I)_{k-1}^{n+1/2} \right) \right\}$$

Qui s'écrit aussi :

$$(U)_k^{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) (U)_k^n - \left( \frac{(I)_k^{n+1/2} - (I)_{k-1}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \right\} \quad (\text{II.32})$$

Pour  $k=1$ , nous avons la relation suivante en faisant  $\Delta x = \Delta x/2$ :

$$(U)_1^{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) (U)_1^n - \left( \frac{(I)_1^{n+1/2} - (I)_0^{n+1/2}}{\Delta x / 2} \right) \right\} \quad (\text{II.33})$$

En posant :

$$(U)_1^{n+1} = U(0)^{n+1} \text{ et } (I)_0^{n+1/2} = I(0)^{n+1/2}$$

Et en introduisant l'approximation suivante :

$$I(0)^{n+1/2} = \frac{I(0)^{n+1} + I(0)^n}{2} \quad (\text{II.34})$$

Nous aurons :

$$U(0)^{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) U(0)^n - \left( \frac{(I)_1^{n+1/2}}{\Delta x / 2} - \frac{I(0)^{n+1} + I(0)^n}{\Delta x} \right) \right\} \quad (\text{II.35})$$

Qui nous permet d'écrire la relation suivante sur la première extrémité (x=0) :

$$U(0)^{n+1} \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right] - \frac{I(0)^{n+1}}{\Delta x} = \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) U(0)^n - \left( 2 \frac{(I)_1^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{I(0)^n}{\Delta x} \right) \right\} \quad (\text{II.36})$$

Pour k=k<sub>max+1</sub> (x=l), nous aurons la relation suivante en faisant Δx= Δx/2 :

$$(U)_{k_{\max+1}}^{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) (U)_{k_{\max+1}}^n - \left( \frac{(I)_{k_{\max+1}}^{n+1/2} - (I)_{k_{\max}}^{n+1/2}}{\Delta x / 2} \right) \right\} \quad (\text{II.37})$$

En posant :

$$(U)_{k_{\max+1}}^{n+1} = U(l)^{n+1} \text{ et } (I)_{k_{\max+1}}^{n+1/2} = I(l)^{n+1/2}$$

Et en introduisant l'approximation suivante :

$$I(l)^{n+1/2} = \frac{I(l)^{n+1} + I(l)^n}{2} \quad (\text{II.38})$$

$$U(l)^{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) U(l)^n - \frac{I(l)^{n+1} + I(l)^n}{\Delta x} + \frac{2(I)^{n+1/2}}{\Delta x} \right\} \quad (\text{II.39})$$

Ce qui nous permet d'écrire la relation suivante sur la deuxième extrémité (x=l) :

$$U(l)^{n+1} \left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right] + \frac{I(l)^{n+1}}{\Delta x} = \left\{ \left( \frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right) U(l)^n - \frac{I(l)^n}{\Delta x} + \frac{2(I)_{k_{\max}}^{n+1/2}}{\Delta x} \right\} \quad (\text{II.40})$$

Les deux équations (II.36) et (II.40) aux extrémités, nous permettent d'écrire alors la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} & \frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} & -\frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(l)^{n+1} \\ I(l)^{n+1} \\ U(0)^{n+1} \\ I(0)^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2})U(l)^n - \frac{I(l)^n}{\Delta x} + \frac{2(I)_{k \max}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ (\frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2})U(0)^n - 2\frac{(I)_1^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{I(0)^n}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Cette dernière écriture matricielle (II.41) qui donne les relations courants-tensions aux deux extrémités de la ligne est une forme similaire "quadripôle" à celle obtenue en fréquentielle (II.20) ; l'équation (II.20) est sans second membre, et l'équation (II.41) à bien un second membre.

En imposant en temporel la même présentation pour le vecteur inconnu (II.21) où les courants et tensions sur l'ensemble des nœuds sont des grandeurs discrètes, alors le système (II.41) nous permet de construire la sous matrice  $[A_1]$  en temporel. La contribution de chaque ligne d'indice  $i$  sera comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{C_i}{\Delta t} + \frac{G_i}{2} & \frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_i}{\Delta t} + \frac{G_i}{2} & -\frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i(l_i)^{n+1} \\ I_i(l_i)^{n+1} \\ U_i(0)^{n+1} \\ I_i(0)^{n+1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

La procédure de construction de la sous matrice  $[A_2]$  suit le même cheminement adopté en fréquentiel, c'est-à-dire l'application des lois de Kirchhoff (KVL et KCL) sur l'ensemble des réseaux (nœuds) ; bien évidemment les courants et tensions sur l'ensemble des nœuds sont en représentations discrètes.

Le vecteur  $[B]$  est maintenant composé de deux sous vecteurs :

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Le sous vecteur  $[B_1]$  est composé du second membre du système (II.41) et bien évidemment où chaque ligne d'indice  $i$  apporte sa contribution comme suit :

$$\begin{bmatrix} (\frac{C_i}{\Delta t} - \frac{G_i}{2})U_i(l_i)^n - \frac{I_i(l_i)^n}{\Delta x} + \frac{2(I_i)_{k \max}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ (\frac{C_i}{\Delta t} - \frac{G_i}{2})U_i(0)^n - 2\frac{(I_i)_1^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{I_i(0)^n}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Notons que les termes (courant et tension) qui apparaissent dans ce sous vecteur sont déduites à partir des équations de récurrences (II.28) et (II.29).

Le sous vecteur  $[B_2]$  est construit partir du second membre de l'équation (II.23) en notant que celui-ci doit être construit à partir de générateurs de courant et/ou de tension en temporel.

## ***Conclusion***

Dans ce deuxième chapitre, nous avons introduit brièvement la notion de transitoires électromagnétiques, les surtensions qui ont résultent et la nécessité de leurs caractérisations pour protéger le réseau électrique.

La présentation a été axée sur les aspects modélisation. L'analyse des transitoires est complexe et nécessite l'utilisation d'outils numériques. Après une revue de quelques modélisations possibles, nous avons opté pour le formalisme topologique en temporel que nous avons bien détaillé dans ce chapitre.

## Références Bibliographiques

- [II-1]** J. Mahseredjian, A. Xémard, B. Khodabakhchian, "Régimes transitoires dans les réseaux électriques," *Technique de l'ingénieur Réseaux électriques linéaires*, vol. TIB258DUO, no. D82, Nov. 2007.
- [II-2]** Tuan Tran Quoc, "Modélisation et amélioration des performances des réseaux électriques". HDR Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble-2000.
- [II-3]** J.C. Sabonnadière, Ph. Auriol, "Surtensions de Manœuvre dans les Réseaux HT et THT - Principales Méthodes de Calcul des Régimes Transitoires dans les Réseaux THT", *R.G.E.*, Tome 82, No. 11, Novembre 1973, pp.718-727.
- [II-4]** H.W. Dommel, "Digital Cornputer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-phase Networks", *IEEETrans. on PowerApparatus and Systems*, Vol. 88, No. 2, April1969.
- [II-5]** Jan Carlsson, "A FDTD Program for Computing Responses on Branched Multi-conductor Transmission Lines". Swedish National Testing and Research Institute- SP Report 1998:16
- [II-6]** B. Harrat, "Thèse de doctorat en sciences techniques" – université de Jijel – 2008.
- [II-7]** Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena, CIGRE - Working Group C4.501, June 2013.
- [II-8]** S Kaouche, B Nekhoul, K Kerroum, K Drissi, F Paladian, "Induced lightning disturbances in a network of aerial shielded cables", *annalos of telecommunicatins* . 62 (7-8), 894-924, 2008.
- [II-9]** B. Nekhoul and al., "A Simplified Apporoach to the Study of Electromagnetic Transients Generated by Lightning Stroke in Power Network", *IEEE Symposium EMC Europe 2014- Goteborg Suède 2014*.
- [II-10]** L. Grcev, F. Dawalibi, "An Electromagnetic Model for Transient in Grounding Systems", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.5, N° 4, November 1990.
- [II-11]** R. F. Harrington, "Field Computation by Moment Method", *Macmillan*, New York, 1968.
- [II-12]** L Boufenneche, B Nekhoul, K Kerroum, "Analysis of the response to a lightning strike of a towers cascade equipped with its grounding systems", *Electrical Engineering* 96 (3), pp. 211-225, 2014.
- [II-13]** C. R. Paul, "Analysis of multiconductor transmission lines". New York: Wiley interscience, 1994.

- [II-14]** S. Kaouche, " Analyse d'un Défaut dans un Réseau de Lignes ou de Câbles", thèse de doctorat de l'université de Jijel – 2007.
- [II-15]** Eric Goncalvès -, résolution numérique, discrétisation des EDP et DEO, INPGrenoble – France - septembre 2005.

## ***Chapitre III :***

---

### ***Simulations à l'aide du Formalisme Topologique de l'Interaction Foudre-Ferme Eolienne : Validations et Applications***

## ***Introduction***

La protection du réseau électrique contre les défauts internes (courts circuits) et externes (impact de foudre) n'est pas une tâche aisée. Cette difficulté est encore plus importante dans le cas du phénomène de foudre qui est aléatoire d'une part et ne permet pas une analyse aisée par la mesure en laboratoire.

Pour protéger le réseau électrique contre la foudre, généralement il est nécessaire d'installer une protection primaire optimale (parasurtenseur) et garantir une bonne mise à la terre de l'ensemble des équipements métalliques du réseau électrique. Pour aider au bon dimensionnement de ces protections, sachant le coût très élevé de la mesure in situ, les ingénieurs de recherche utilisent de plus en plus la modélisation mathématique.

Tout particulièrement pour les circuits de terre, dont l'étude est présente depuis maintenant un demi-siècle, la modélisation de ces derniers comme dispositif électromagnétique a vu la proposition de plusieurs formalismes [III-1].

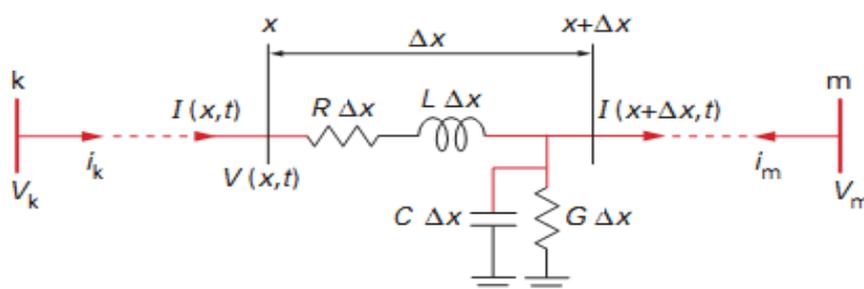
Dans le cas de notre étude que nous consacrons à l'impact direct d'une onde de foudre sur un parc éolien, tout particulièrement l'analyse du comportement du circuit de terre ; nous proposons d'utiliser une modélisation réaliste (modèle mathématique de mise en œuvre simple et temps de calcul acceptable) élaborée à partir des équations générales des lignes de transmissions et de la méthode numérique dite FDTD.

Dans ce dernier chapitre pour étayer notre travail théorique et notre proposition de modélisation, nous procédons en premier à quelques validations pour conforter notre modèle, puis nous réalisons quelques applications pour mettre en évidence les avantages fournis par ce dernier.

## I. Validations

### I.1. Validation de la condition aux extrémités pour une prise de terre

L'utilisation du formalisme topologique exige de tenir compte des relations électriques (lois de Kirchhoff) aux nœuds de jonctions et d'extrémités. Le problème de la prise de terre étant particulier car une électrode de terre est directement en contact avec le sol sur l'ensemble de ses points ; donc si l'électrode de terre est considérée comme une ligne de transmission en régime transitoire, le schéma équivalent à constantes réparties d'un élément  $\Delta x$  de l'électrode sera comme suit (Figure II.11, chapitre II):



En  $x + \Delta x$ , nous avons :

$$I(x + \Delta x, t) = G\Delta x V(x + \Delta x, t) + C\Delta x \frac{\partial V(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

Donc sur l'extrémité m, nous pouvons écrire :

$$I_m(t) = G\Delta x V_m(t) + C\Delta x \frac{\partial V_m(t)}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

Qui devient en utilisant les différences finies :

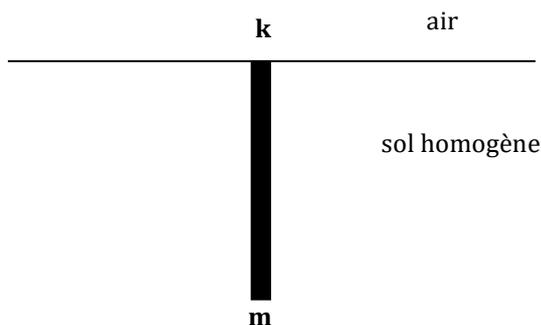
$$I_m(t) = G\Delta x V_m(t) + C\Delta x \frac{V_m(t) - V_m(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (\text{III.3})$$

D'où la relation électrique au nœud extrémité m:

$$I_m(t) - G\Delta x V_m(t) - C\Delta x \frac{V_m(t)}{\Delta t} = -C\Delta x \frac{V_m(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (\text{III.4})$$

Cette relation (III.4) est celle que nous utiliserons comme condition à l'extrémité libre de toute prise de terre filiforme.

Pour vérifier la validité de cette condition aux extrémités, nous considérons une prise de terre verticale enfouie dans un sol homogène (figure III.1) :



**Figure III.1.** Electrode de terre enfouie verticalement.

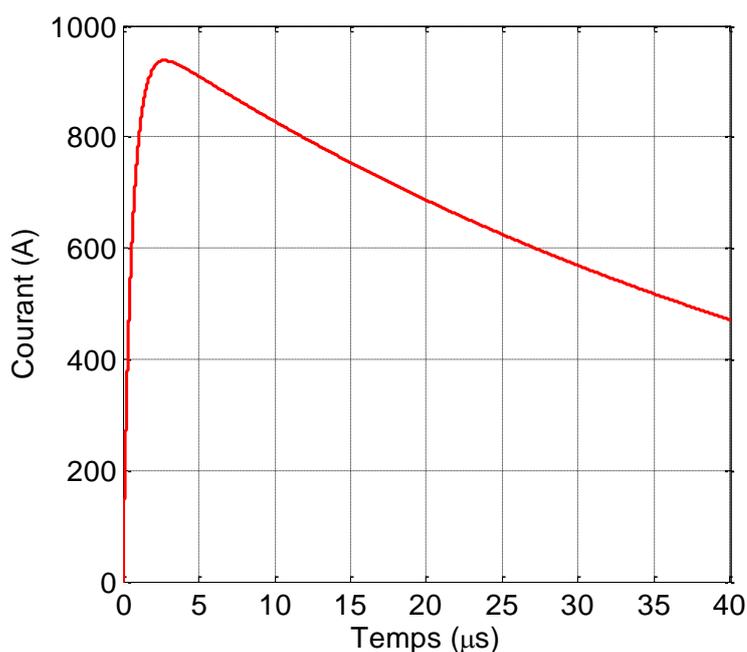
La prise de terre à une longueur  $l=15\text{m}$ , un rayon  $r=1\text{cm}$  et enfouie dans le sol de résistivité  $\rho_s = 100 \Omega.\text{m}$ .

Au point **k** nous avons un générateur de courant représenté analytiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$I(t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$$

Avec :  $I_0 = 1000 \text{ A}$ ,  $\alpha = 18800$ ,  $\beta = 1600000$ .

Nous confrontons nos résultats de calculs (formalisme topologique) à ceux que nous obtenons en utilisant la résolution d'une équation de propagation (II.2) rappelée dans le chapitre II. Notons que la résolution d'une équation de propagation permet de traiter aussi bien les lignes aériennes que les électrodes enterrées avec une excellente précision [III-1].



**Figure III.2.** Courant injecté dans la prise de terre verticale au point 'k'.

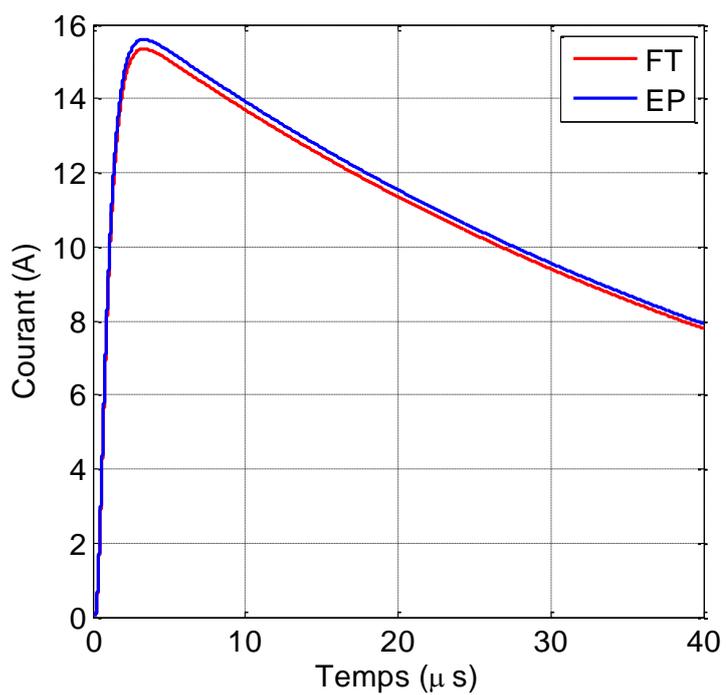


Figure III.3. Courant sur la deuxième extrémité 'm' de la prise de terre verticale.

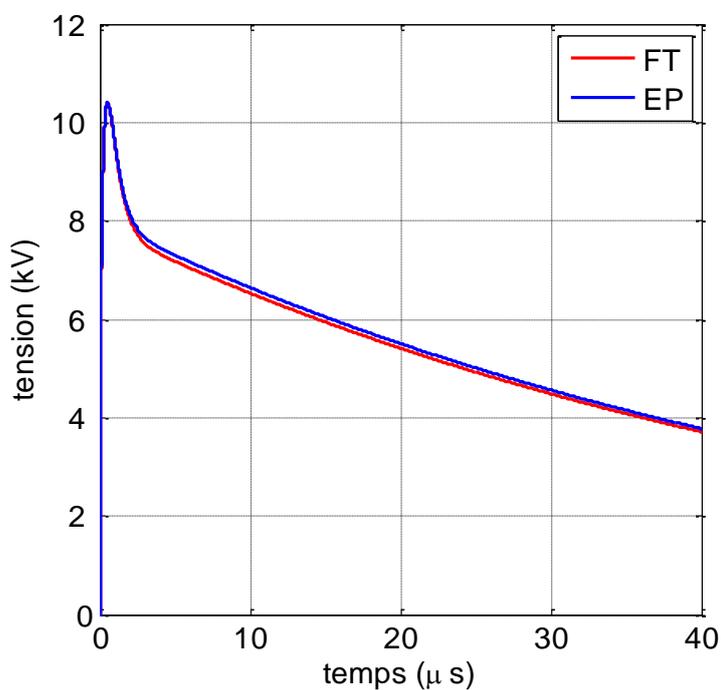
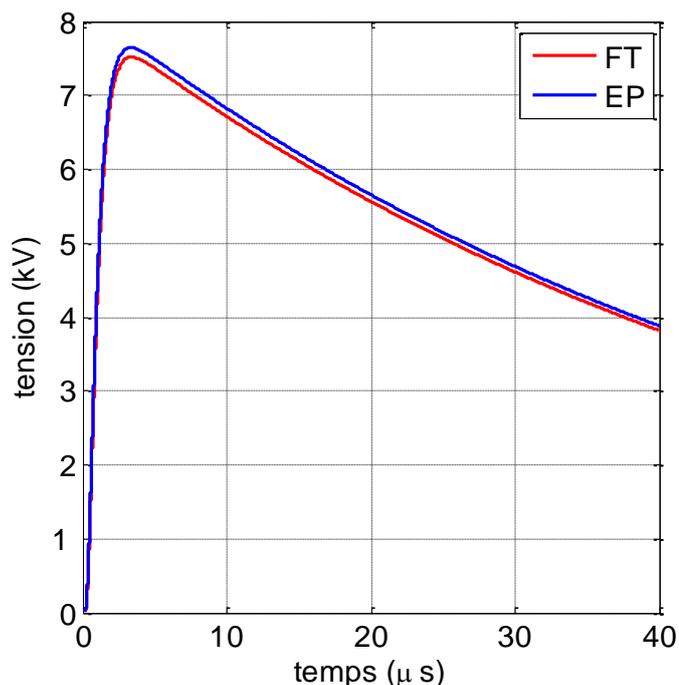


Figure III.4. Tension sur la première extrémité 'k' de prise de terre verticale.



**Figure III.5.** Tension sur la deuxième extrémité 'm' de prise de terre verticale.

**FT :** Formalisme Topologique

**EP :** Equation de Propagation (résolution par FDTD d'une équation de propagation).

Cet ensemble de résultats (figures III.2 à III.5), montre bien une parfaite concordance entre les calculs réalisés en utilisant le formalisme topologique ( $[A][X]=[B]$ ) et ceux obtenus par résolution d'une équation de propagation.

**Remarque :**

Tous nos résultats de calculs exposés par la suite sont indiqués par l'acronyme FT.

**I.2. Confrontation avec BMTL**

La version du logiciel BMTL, introduit dans le chapitre II, en notre possession permet de traiter uniquement les lignes sans pertes ( $R=0$  et  $G=0$ ). Aussi, il permet uniquement l'utilisation d'un générateur de tension.

Pour cette confrontation nous considérons l'application en figure III.6 ci-dessous ; il s'agit d'une éolienne reliée à sa base (point O) à un piquet de terre (électrode de terre verticale) et ce dernier est relié (point B) à un câble simplement isolé enterré horizontalement.

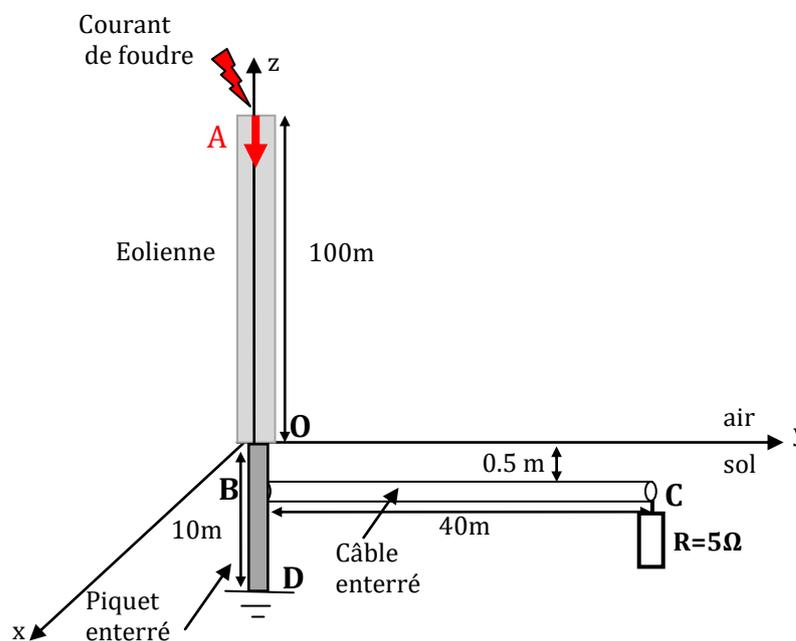
- une éolienne, tour cylindrique verticale de 100m de hauteur et de diamètre  $d=1m$ .
- une prise de terre verticale qui à une hauteur de 10m et un rayon  $a=0.01m$ ,

- un câble simplement isolé de longueur 40m, rayon de l'âme 0.01m, rayon de l'isolant 0.013 m, enfouie horizontalement à une profondeur 0.5m dans un sol de résistivité  $\rho = 100\Omega.m$ , et de permittivité relative  $\epsilon_r=10$ , et avec une charge à sa deuxième extrémité  $R=5\Omega$ .

Le générateur de tension, qui alimente la tour à son extrémité supérieure, est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$V(t) = V_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$$

Avec :  $V_0 = 1kV$ ,  $\alpha = 0.0188\mu s^{-1}$ ,  $\beta = 1.6\mu s^{-1}$ .

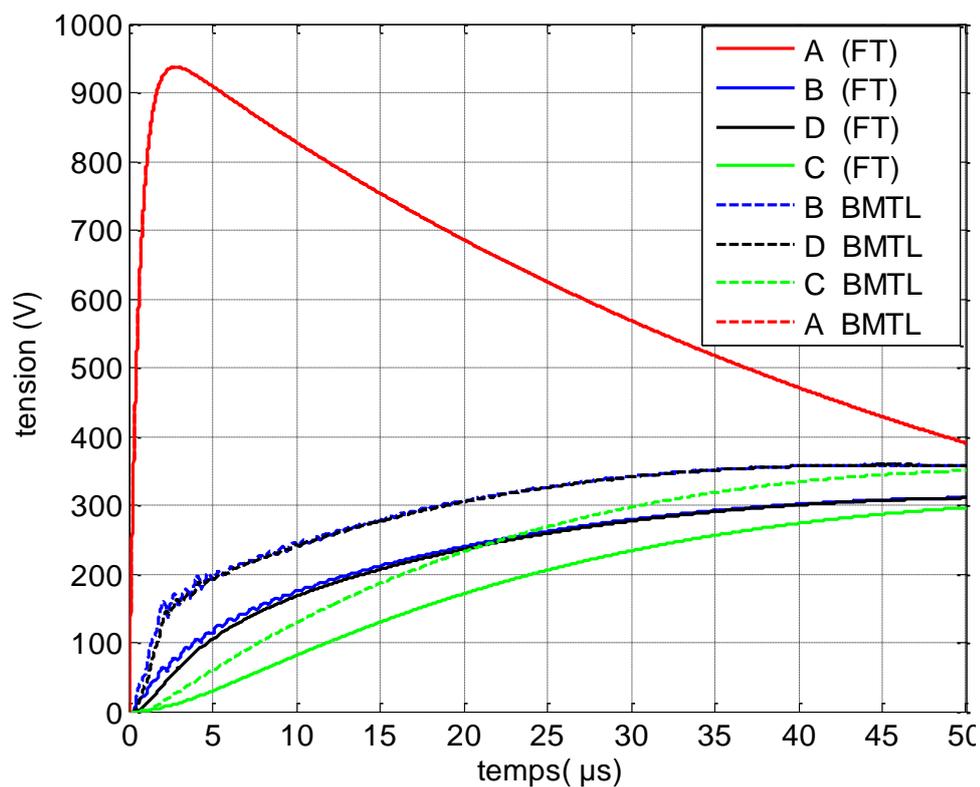


**Figure III.6.** Eolienne avec sa mise la terre et un câble enterré.

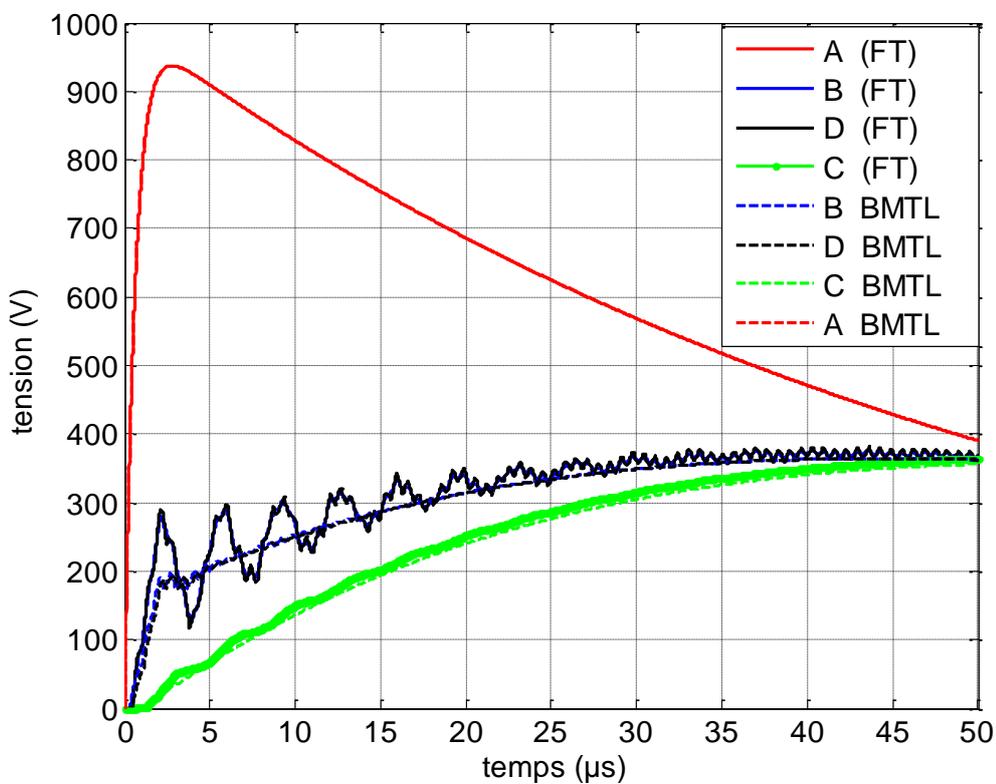
Pour cette application nous considérons deux cas :

- Electrode avec sa conductance non nulle ( $G \neq 0$ ), et éolienne et câble sans pertes joule ( $R=0$ ).
- Electrode avec sa conductance nulle, et éolienne et câble sans pertes joules ( $R=0$ ).

Les résultats en figure III.7, montrent la variation de la tension en différents points du dispositif (éolienne+piquet de terre+câble enterré) lorsque la conductance de l'électrode est différente de zéro pour le formalisme topologique et nulle avec le logiciel BMTL.



**Figure III.7.** Tension aux points (A, B, C, D) dans le cas où l'électrode a une conductance non nulle.



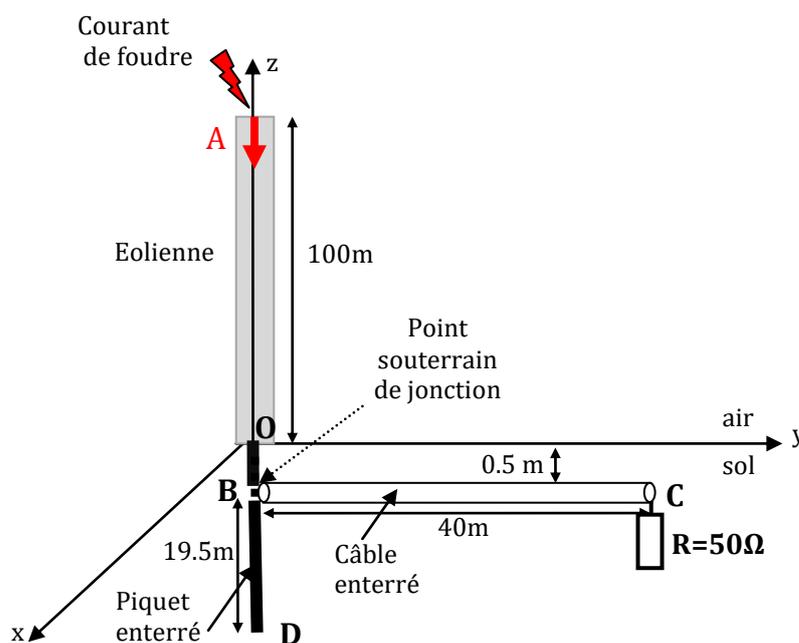
**Figure III.8.** Tension aux points (A, B, C, D) dans le cas où nous imposons la conductance comme nulle pour l'électrode.

Sous ces conditions, nous constatons bien une différence sur les tensions obtenues par les deux modélisations particulièrement au point C. En fixant la conductance de l'électrode verticale comme nulle pour les deux modélisations, nous constatons en figure III.8 que les résultats se confondent. Cette application vient conforter la validité de notre modélisation en fixant la condition aux extrémités, indiquée plus haut (III.4) sur l'extrémité libre de l'électrode enterrée.

**Remarque :**

Notre modélisation pour cette application ne tient pas compte correctement de l'enfouissement du câble ; en effet bien que les paramètres linéiques du câble sont calculés pour un câble enterré à une profondeur  $d$ , lors de nos calculs la jonction éolienne-prise de terre-câble souterrain est considérée à la base de l'éolienne. Afin de tenir compte de l'effet de la condition électrique (lois de Kirchhoff) au niveau de la jonction sus-citée (point B en figure III.9) telle qu'elle doit être réellement, nous proposons de traiter l'application comme suit :

- une éolienne, tour cylindrique verticale de 100m de hauteur et de diamètre  $d=1m$ .
- une prise de terre verticale qui à une hauteur de 19.5m et un rayon  $a=0.01m$ ,
- un câble simplement isolé de longueur 40m, rayon de l'âme 0.01m, rayon de l'isolant 0.013m, enfouie horizontalement à une profondeur 0.5m dans un sol de résistivité  $\rho = 100\Omega.m$ , et de permittivité relative  $\epsilon_r=10$ , et avec une charge à sa deuxième extrémité  $R=50\Omega$ .

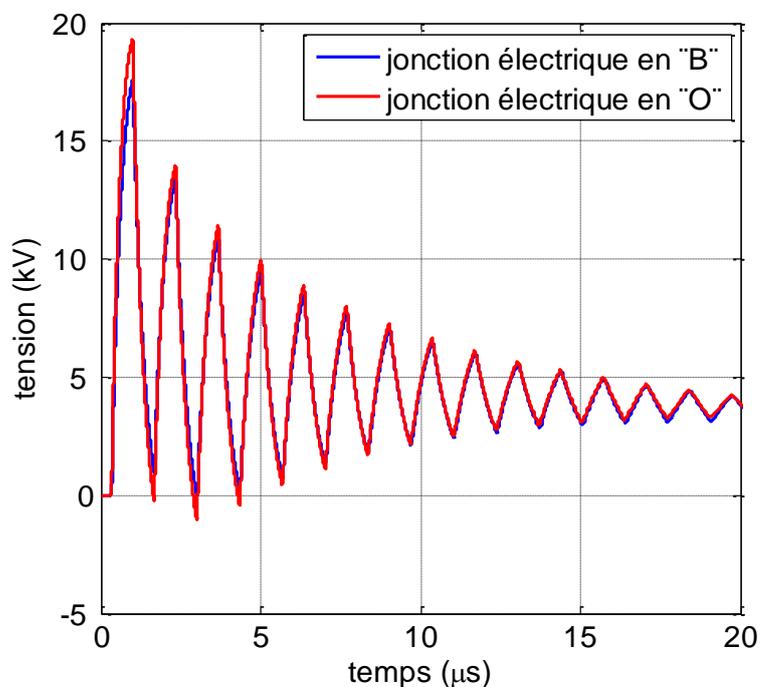


**Figure III.9.** Configuration avec mise en évidence de la jonction éolienne-prise de terre-câble enterré.

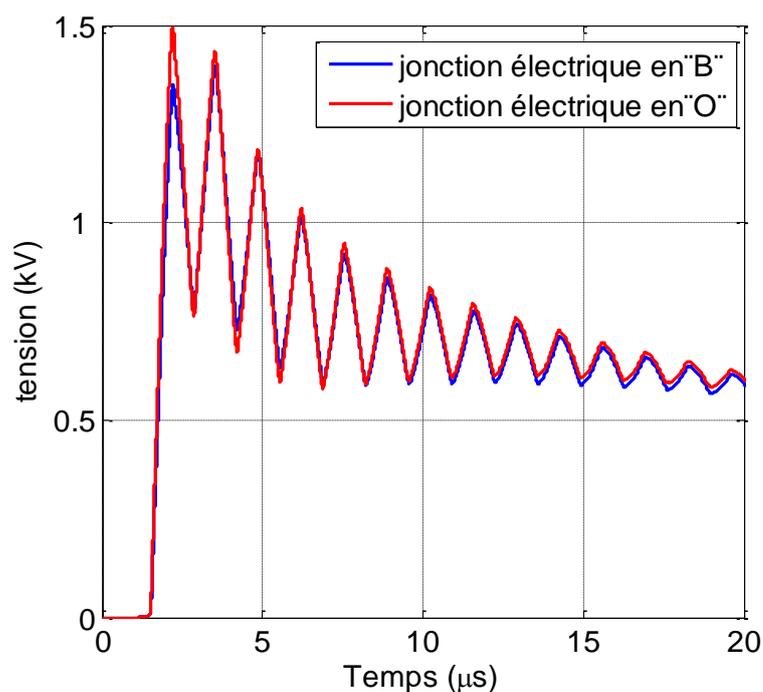
Le générateur de courant , qui alimente la tour à son extrémité supérieure, est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$I(t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$$

Avec :  $I_0 = 1 \text{ kV}$  ,  $\alpha = 0.0188 \mu\text{s}^{-1}$  ,  $\beta = 1.6 \mu\text{s}^{-1}$ .



**Figure III.10.** Variation de la tension à la base de l'éolienne " O " obtenus par deux modélisations différentes.



**Figure III.11.** Variation de la tension sur la deuxième extrémité du câble " C " obtenus par deux modélisations différentes.

Dans cette application, la prise de terre est représentée par deux tronçons de lignes distinctes, et la relation électrique est bien réalisée respectivement au point "O" puis "B" (figure III.9).

Les résultats en figures III.10 et III.11, montrent respectivement les tensions à la base de l'éolienne (point O) et sur la deuxième extrémité du câble enterré (point C) ; nous constatons que les deux modélisations (point de jonction électrique à la base de l'éolienne "O" et point de jonction électrique réel "B") conduisent pratiquement aux mêmes résultats. Que l'électrode de terre soit représentée par deux tronçons de lignes ou par une ligne unique avec déplacement du point de jonction électrique confondu avec la base de l'éolienne, les résultats en tensions obtenus sont presque identiques. Donc dans la suite de notre travail, nous considérons le point de jonction électrique comme situé à la base de l'éolienne "O", mais en calculant les paramètres linéiques des câbles enterrés en tenant compte de la profondeur d'enfouissement.

### **I.3. Confrontation avec Simulink sous Matlab**

#### **I.3.1. Simulink**

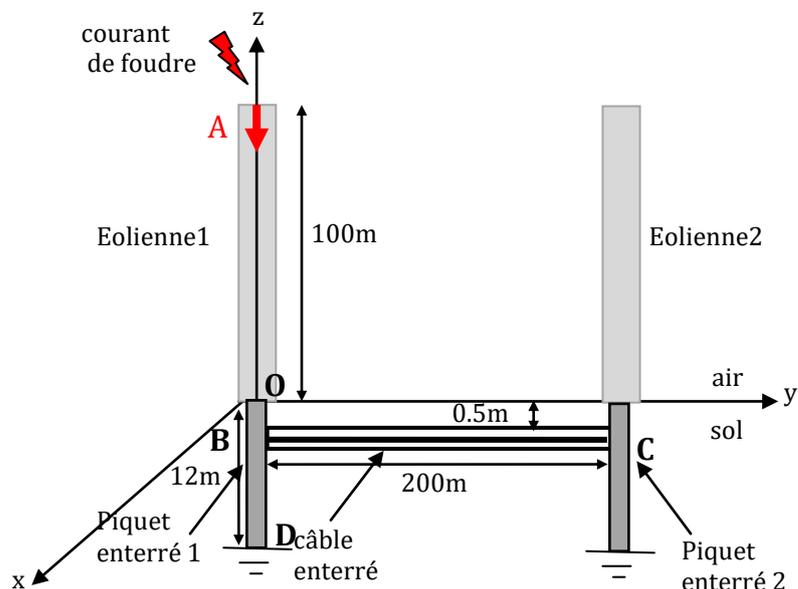
Simulink [III-2] est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes électriques et de traitement du signal. Simulink est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB.

L'environnement Simulink peut modéliser un système, simuler son comportement, décomposer le design avant son implémentation. Avec Simulink, il est possible de créer des diagrammes hiérarchiques de blocs pour la modélisation haut niveau d'un système, comme des Blocs Diagrammes de Fiabilité, de construire des simulations complètes, d'intégrer des composants comme un signal analogique, des communications numériques ou des logiques de contrôle.

Simulink peut modéliser des données simples ou multicanaux, des composants linéaires ou non. Simulink peut simuler des composants numériques, analogiques ou mixtes. Il peut modéliser des sources de signaux et les visualiser.

### I.3.2. Analyse de deux éoliennes connectées

L'application que nous proposons, pour confronter nos résultats à ceux réalisés à l'aide de Simulink [III-2], est celle présentée en figure III.12.



**Figure III.12.** Eoliennes interconnectées par un câble souterrain.

1- deux éoliennes (à mât cylindrique) constituées chacune d'une tour de 100m de hauteur et de diamètre  $d=1\text{m}$ .

2- deux prises de terre verticales de longueur 12m, de rayon  $a=1\text{cm}$ .

3- un câble de longueur 200m, de rayons :

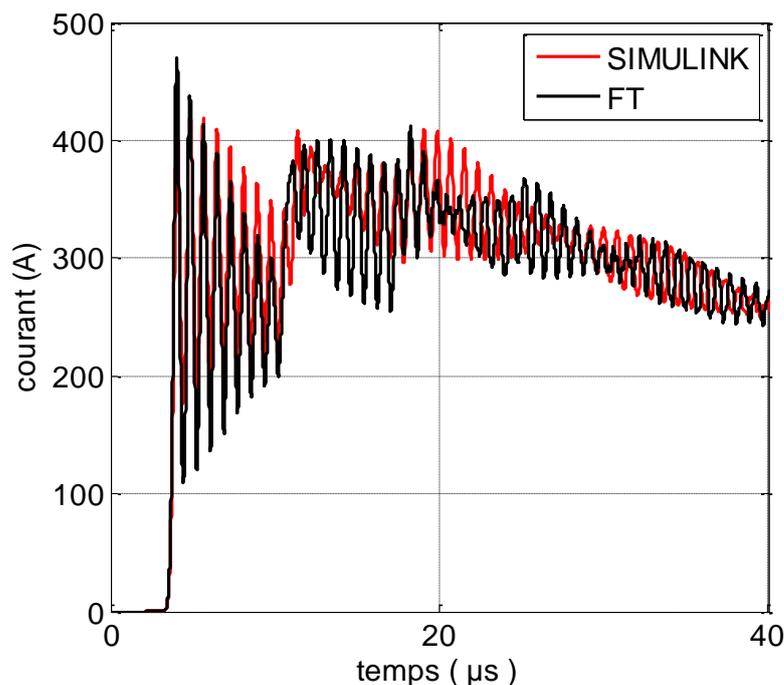
- Rayon de l'âme = 1cm ;
- Rayon de l'isolant = 1.34cm.

Le câble est enfouie horizontalement à une profondeur de 0.5m dans un sol de résistivité  $\rho=100 \Omega.\text{m}$ , et de permittivité relative  $\epsilon_r=10$ .

Le générateur de courant, qui alimente la première éolienne, est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$I(t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$$

Avec :  $I_0 = 1.0167 \text{ kA}$ ,  $\alpha = 0.0142 \mu\text{s}^{-1}$ ,  $\beta = 5.073 \mu\text{s}^{-1}$ .



**Figure III.13.** Courant au point (C).

Les résultats en figure III.13 montrent la variation du courant, au point (C) du dispositif électrique (figure III.12), obtenus par les deux simulations.

Notons que Simulink simule ce dispositif comme un ensemble de lignes. Chaque ligne est représentée par une succession de cellules en  $\pi$  dont le nombre est choisi de façon à masquer la propagation.

La comparaison des résultats (figure III.13) montre une bonne concordance en allure générale et en amplitude ; les deux simulations laissent apparaître de fortes oscillations liées principalement à l'utilisation de modèles à constantes localisées (les paramètres linéiques sont constants et calculés à la fréquence de 1MHz). Nous constatons que les extrémums des oscillations sont légèrement plus importants pour le formalisme topologique. Pour diminuer, voir carrément supprimer, les oscillations il est nécessaire d'utiliser un modèle de ligne à paramètres dépendants de la fréquence [III-3].

Notons qu'avec Simulink plusieurs méthode de résolution sont proposées et permet ainsi d'atténuer voir de compenser les oscillations.

Afin de diminuer les oscillations, nous n'avons pas utilisé directement un modèle des lignes à paramètres dépendants de la fréquence, mais nous avons calculés les paramètres linéiques à chaque instant (pas à pas dans le temps) à une fréquence déduite comme suit :

- Premier instant :  $f=f_{\max}$  ;

- Puis à l'instant  $t_i = n_i \Delta t$ ,  $f = f_{\max} - n_i \Delta f$ , sachant que  $\Delta f = f_{\max} / n_{\max}$  et  $n_{\max} = t_{\max} / \Delta t$ .

Cette approche nous a conduit au résultat en figure III.14 où nous constatons une nette réduction des amplitudes des oscillations et confirme donc notre remarque pour le modèle des lignes à paramètres dépendants de la fréquence.

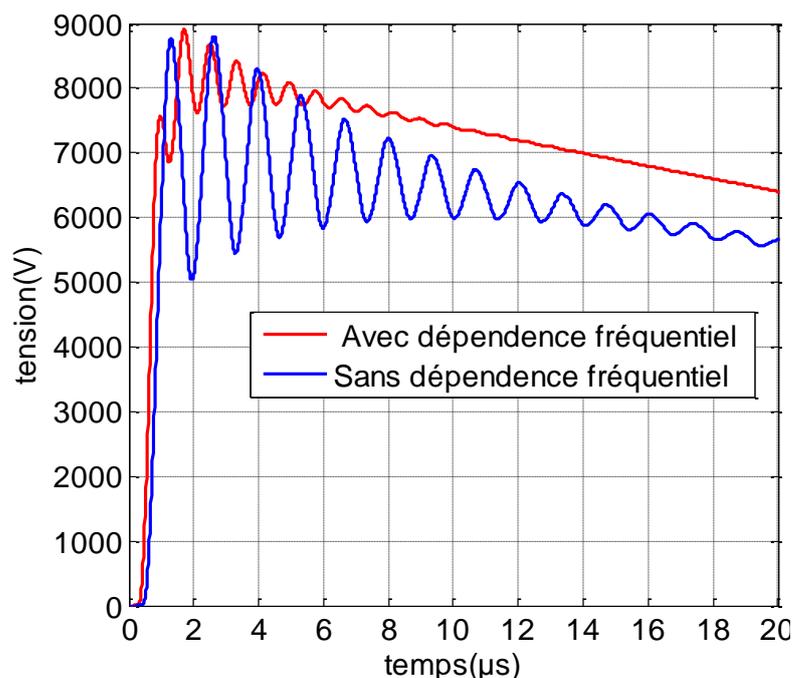
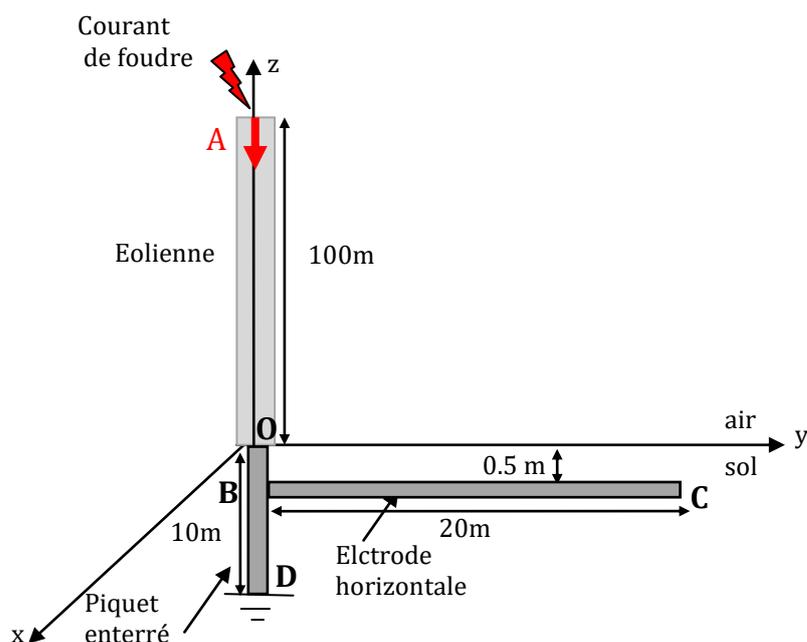


Figure III.14. La tension au point (D).

#### I.4. Confrontation avec NEC-4

Pour cette validation, nous confrontons nos résultats de calculs réalisés en utilisant le formalisme topologique en temporel à ceux que nous obtenons en utilisant le logiciel de recherche NEC-4 [III-4] (*Numerical Electromagnetic Code*). NEC-4 est un code développé sous sa première version NEC-1, pour le traitement du rayonnement et du couplage électromagnétique, au début des années 80. Son fondement théorique est celui des antennes qui consiste à résoudre par la méthode numérique dite des moments une équation intégrale dans les milieux continus déduite à partir des équations de Maxwell en champ électrique (EFIE) ou en champ magnétique (MFIE). Ce formalisme numérique dit "plein ondes", auquel nous avons consacré un très bref aperçu dans le chapitre II, est l'un le plus rigoureux, dans son expression théorique, pour l'analyse des dispositifs électromagnétiques ouverts et en présence d'un plan de masse.

Comme exemple d'application pour confronter les résultats, nous avons choisi l'application en figure III.15; il s'agit d'une éolienne raccordée à sa base (point O) à un piquet vertical et ce dernier est aussi raccordé (point B) à une électrode enterrée horizontalement. Le choix de cette application nous permet de mettre en évidence la condition aux extrémités en deux points différents (C et D) et va nous permettre aussi de confronter nos résultats à ceux obtenus en utilisant NEC-4 [III-4] qui s'adapte de manière optimale lorsque le dispositif électromagnétique inhomogène est filiforme et métallique.



**Figure III.15.** Eolienne raccordée à deux prises de terre.

Le dispositif en figure III.15, montre :

- une éolienne représentée par une tour (de forme cylindrique) de 100m de hauteur et de diamètre  $d=1\text{m}$ .
- un piquet de terre vertical de hauteur 10m, de rayon  $a=0.01\text{m}$ , enfouie dans un sol de résistivité  $\rho=100\ \Omega\cdot\text{m}$ , et de permittivité relative  $\epsilon_r=10$ .
- une électrode horizontale de longueur 20m, de rayon  $a=0.01\text{m}$ , enfouie horizontalement à une profondeur 0.5m et raccordée au piquet vertical au point (B).

Le générateur de courant, qui alimente l'éolienne à son extrémité supérieure, est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

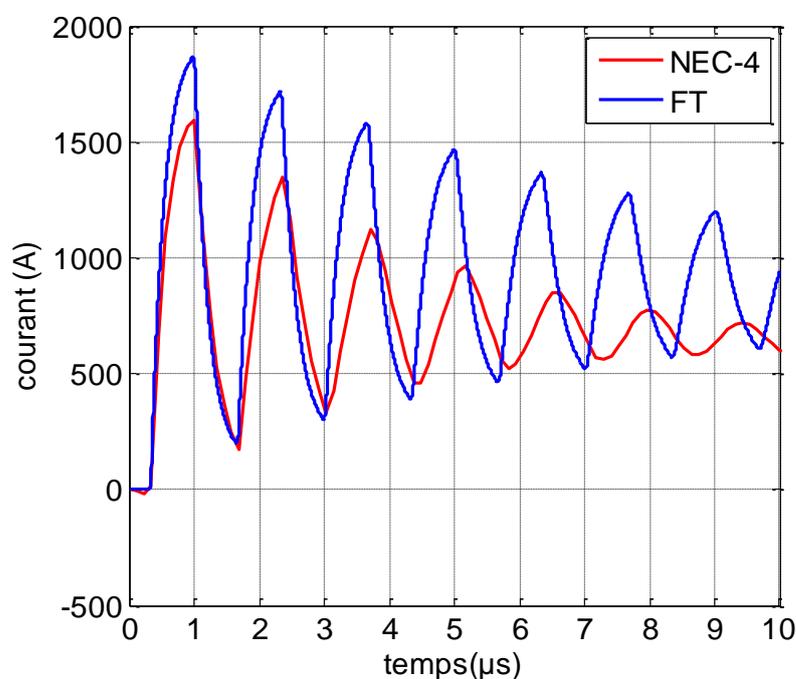
$$i(t) = i_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)),$$

Avec :  $I_0 = 1.0167\text{kA}$ ,  $\alpha = 0.0142\ \mu\text{s}^{-1}$ ,  $\beta = 5.073\ \mu\text{s}^{-1}$ .

Les figures III.16 à III.18 montrent respectivement les résultats que nous obtenons, par le formalisme topologique et la théorie des antennes (NEC-4), pour la variation du courant à la base de l'éolienne (point B), sur la deuxième extrémité (point D) de l'électrode verticale ainsi que sur la deuxième extrémité (point C) de l'électrode horizontale.

Cette confrontation des résultats nous permet de constater que l'allure générale est les amplitudes sont conservées et similaires ; la légère différence (amplitude et décalage temporel) entre les résultats obtenus par les deux formalismes est prévisible car le formalisme topologique est élaboré à partir de la théorie des lignes de transmissions dont les équations générales sont déduites moyennant des hypothèses simplificatrices alors que la théorie des antennes utilise directement les équations de Maxwell en toute rigueur.

La différence en amplitude est dû au fait que le formalisme topologique ne tient pas compte des interactions électromagnétiques entre les segments résultants de la discrétisation, ce qui ne pas le cas pour le NEC-4, et le décalage temporel et à l'utilisation des passages temps-fréquence et inversement (choix de  $f_{max}$ ) pour exprimer les résultats en temporel obtenus par le logiciel NEC-4 qui travaille en fréquentiel ; notons que le formalisme topologique présenté dans le chapitre II travaille directement en temporel.



**Figure III.16.** Courant à la base de l'éolienne (point B).

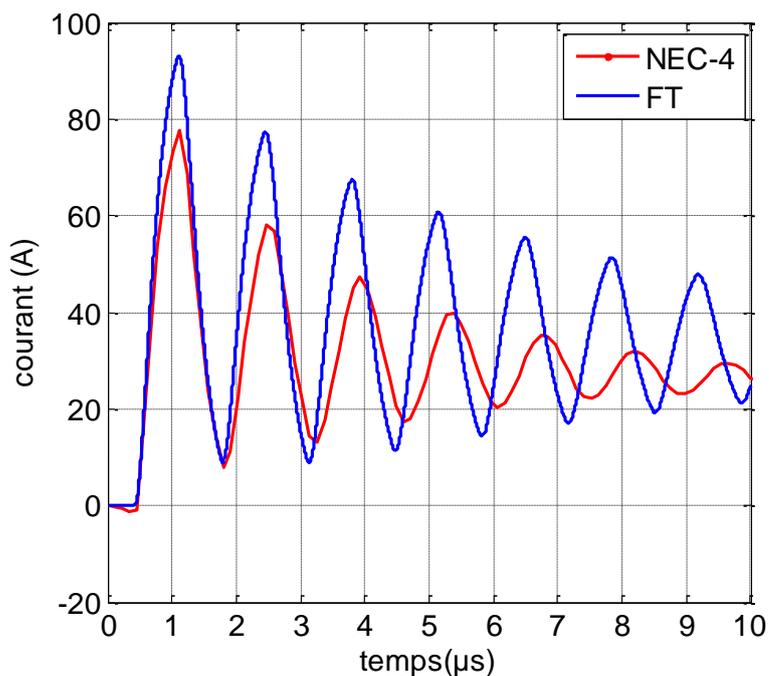


Figure III.17. Courant à l'extrémité inférieure de l'électrode verticale (point D).

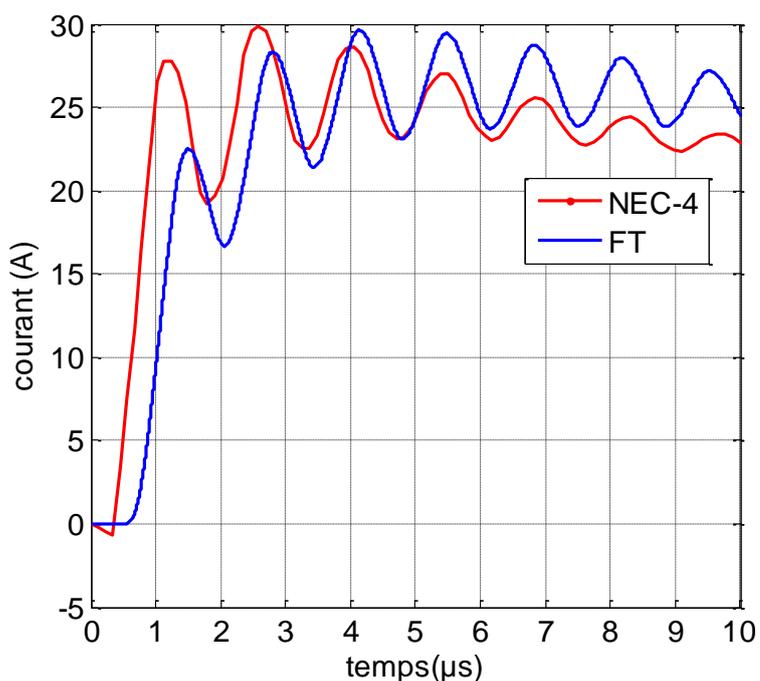


Figure III.18. Courant sur la deuxième extrémité de l'électrode horizontale (point C).

**Remarque :** l'ensemble des résultats que nous avons obtenus en utilisant le formalisme topologique, sont réalisés pour des paramètres linéiques constants calculés à une fréquence de 1MHz ; le choix de cette fréquence est justifié par la faible longueur des supports de propagation [III-5].

### I.5. Validation sur une ferme d'éolienne

Comme dernière validation, nous traitons l'application récemment traitée par A. Yamanaka et al. [III-3]. Cette application (figure III.19) consiste à simuler le cas de cinq éoliennes (identiques), équipée chacune d'une prise de terre et interconnectées par un câble souterrain simplement isolé ; il considère le cas du foudroiement (impact direct) de la première éolienne.

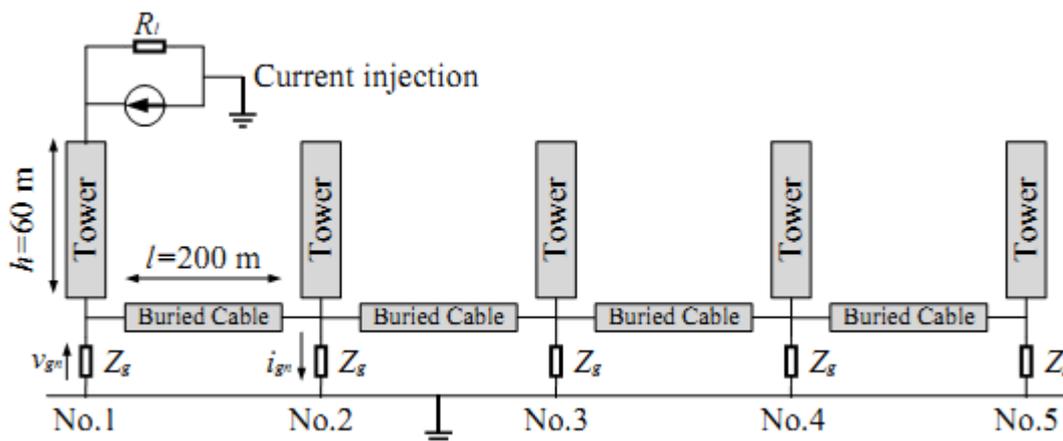


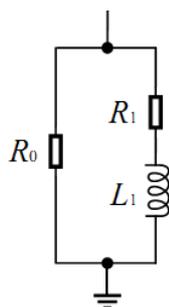
Figure III.19. Modèle de la ferme éolienne simulé.

Données de l'application :

- hauteur de l'éolienne,  $h=60\text{m}$  ; rayon de l'éolienne,  $R=1.5\text{m}$  ;
  - longueur du câble,  $l=200\text{m}$  ; profondeur d'enfouissement,  $d=0.5\text{m}$  ;
  - résistivité du sol,  $\rho=100\Omega\text{m}$  ; permittivité relative du sol  $\epsilon_r=10$ .
  - courant injecté : somme de deux fonctions de Heidler (expression I.2);
- 1/premier arc en retour :  $I_{\max}=1\text{A}$  ,  $\eta =0.93$  ,  $\tau_1=19\mu\text{s}$  ,  $\tau_2 =485\mu\text{s}$  ,  $n=2$  ;
- 2/deuxième arc en retour :  $I_{\max}=1\text{A}$  ,  $\eta =0.993$  ,  $\tau_1=0.454\mu\text{s}$  ,  $\tau_2 =143\mu\text{s}$  ,  $n=5$  ;

Dans cette application la modélisation adoptée par A. Yamanaka et al. [III-3] pour chaque composant du système électrique en figure III.19 est comme suit :

- La tour, représentant l'éolienne, est considérée comme un simple conducteur vertical et modélisée comme une ligne de transmission par le modèle de Semlyens [III-6] à paramètres répartis ;
- Le câble enterré est modélisé comme une ligne de transmission par le modèle de J. R. Marti [III-7] à paramètres répartis ;
- La prise de terre est représentée par un circuit électrique comme suit :



**Figure III.20.** Circuit électrique équivalent de la prise de terre [III-3].

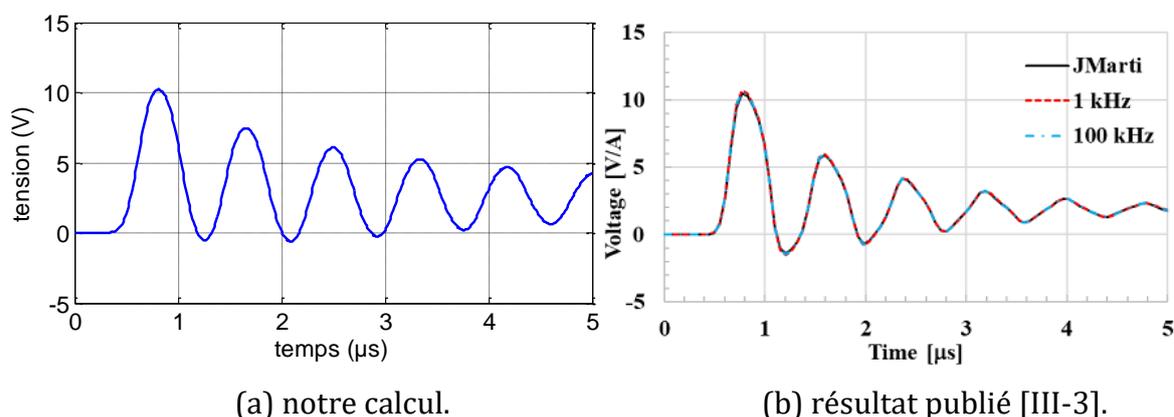
La résistance de mise à la terre de la tour est réglée pour être inférieure à  $10 \Omega$  ; Afin de réaliser la faible résistance de mise à la terre, le système de mise à la terre des tours d'éoliennes se compose d'une fondation de mise à la terre de la tour, d'un treillis de mise à la terre et de pieux de fondation. En utilisant le circuit en figure III.20, et pour avoir une résistance de terre inférieure à  $10 \Omega$ , A. Yamanaka et al. [III-3] utilisent les données sur le tableau III.1.

$R_0 (\Omega)$	$R_1 (\Omega)$	$L_1 (\mu H)$
10	2.5	4.5

**Tableau III.1.** Données de la prise de terre.

Notons enfin que A. Yamanaka et al. [III-3], simulent cette application en utilisant l'utilitaire ATP-EMTP [III-8].

Pour notre modélisation (développements implémentés sous Matlab) la tour est aussi modélisée comme une ligne verticale au-dessus d'un sol de résistivité finie, ses paramètres linéiques sont calculés à partir des expressions de E. J. Rojers [III-9] (annexe 1). Comme prise de terre nous utilisons un piquet vertical de 20m de hauteur et ses paramètres linéiques sont calculés en utilisant les expressions de E.D. Sunde [III-10] (annexe 1). Enfin pour le câble nous utilisons le modèle de A. Amétani [III-11] (annexe 1).



**Figure III.21.** Augmentation du potentiel de la tour frappée par la foudre.

La confrontation des résultats en figures III.21, montrent une parfaite concordance en allure et en amplitude ; les différences qui apparaissent sont :

- un très léger décalage temporel que nous justifions par la différence entre les deux modélisations (A. Yamanaka [III-3] utilise des modèles à paramètres dépendants de la fréquence, alors que notre modélisation utilise des modèles à constantes réparties).
- en amplitude, qui est liée à la modélisation simplifiée (circuit électrique équivalent) de la mise à la terre adoptées par A. Yamanaka et al. [III-3].

### **Temps de calcul :**

Notons que, pour cette application (ferme à 5 éoliennes) le temps de calcul a été de 108.65 secondes sur un PC DELL doté d'un processeur Intel ® Core™ i5 CPU 2.5 GHz, 4Go de RAM.

## **II. Applications**

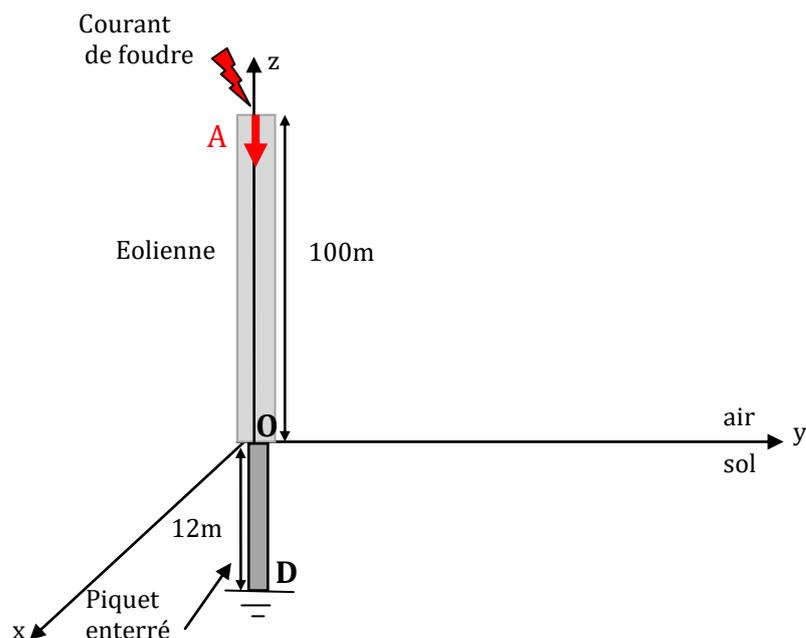
### **II.1. Effet du câble d'interconnexion sur la résistance de terre**

Dans la littérature portant sur la technologie des fermes éoliennes [III-12], il est indiqué que le fait d'interconnecter les prises de terre par un câble souterrain simplement isolé conduit à une réduction de la résistance de terre (résistance à fréquence industrielle) de l'installation et donc de la réduction du potentiel de la terre (GPR : Ground Power Rise). Pour vérifier, cette constatation nous réalisons deux simulations différentes :

- simple éolienne équipée de sa prise de terre verticale ;
- ferme à cinq (05) éoliennes dans les prises de terre sont interconnectées.

#### ***- éolienne unique équipée d'une électrode verticale (figure III.22)***

- 1- Une éolienne constituée d'une tour de 100m de hauteur et de diamètre  $d=1$  m,
- 2- La prise de terre verticale est de longueur 12m, de rayon  $a=1$ cm,
- 3- Le sol est de résistivité  $\rho=100$   $\Omega$ .m, et de permittivité relative  $\epsilon_r=10$ .



**Figure III.22.** Le modèle simple avec une éolienne et un piquet verticale.

**- ferme avec 5 éoliennes et à prise de terre interconnectées (figure III.23)**

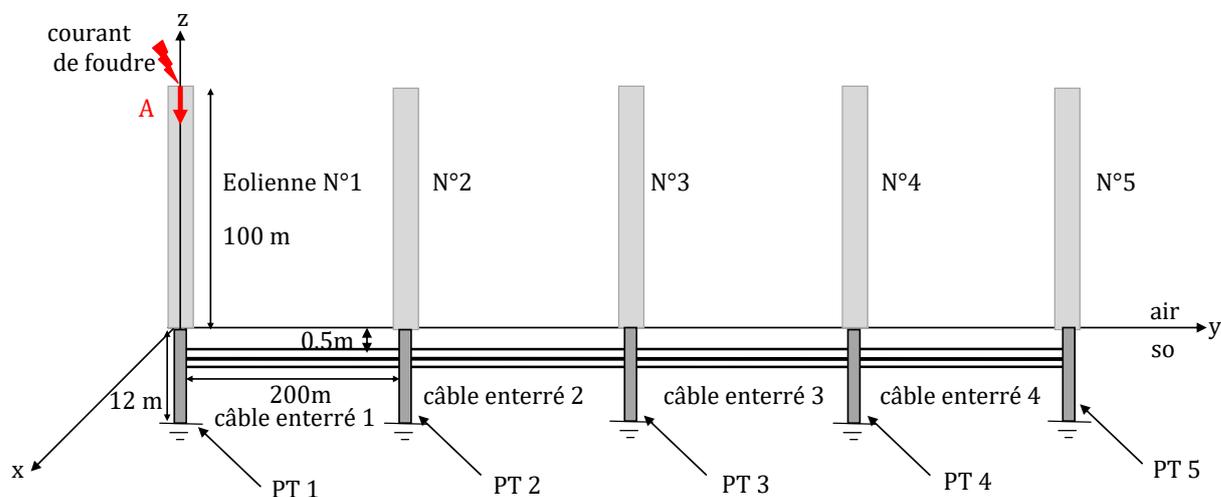
1- 5 éoliennes constituées de cinq tours de 100 m de hauteur et de diamètre  $d=1$  m,

2- 5 prises de terre verticale est de longueur 12m, de rayon  $a=1$ cm,

3- 4 câbles de longueur chacun 200m, de rayon :

- Rayon de l'âme =1cm,
- Rayon de la gaine =1.34cm.

Enfouies horizontalement à une profondeur 0.5m dans un sol de résistivité  $\rho=100 \Omega.m$ , et de permittivité relative  $\epsilon_r=10$ .



**Figure III.23.** Ferme avec 5 éoliennes interconnectées avec la tour 1 foudroyée.

Notons que ces deux applications sont traitées avec le même générateur onde de foudre représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$i(t) = i_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)),$$

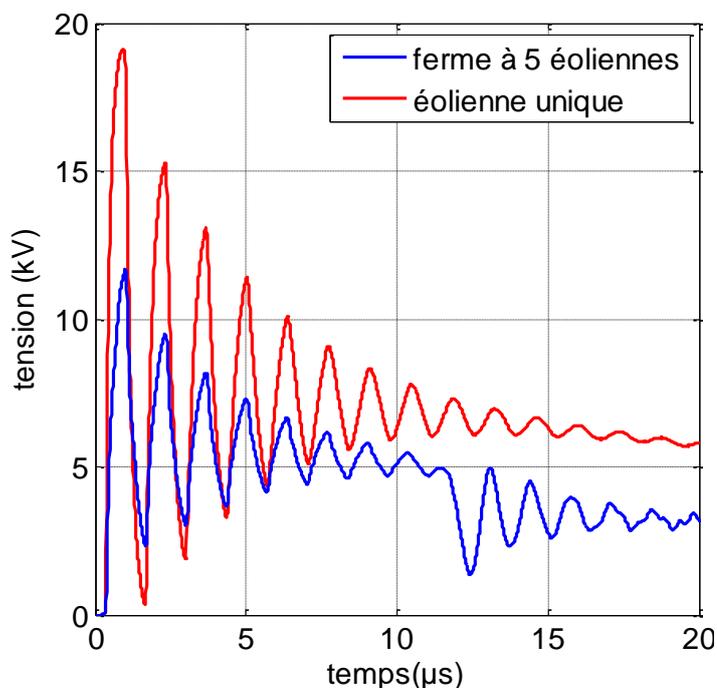
Avec :  $I_0 = 1 \text{ kA}$ ,  $\alpha = 0.0188 \mu\text{s}^{-1}$ ,  $\beta = 1.6 \mu\text{s}^{-1}$ .

Pour ces simulations, nous nous intéressons à l'augmentation du potentiel de la terre (GPR : Ground Power Rise) relevée à la base de l'éolienne 1 et à l'impédance transitoire de la prise de terre qui est définie comme suit :

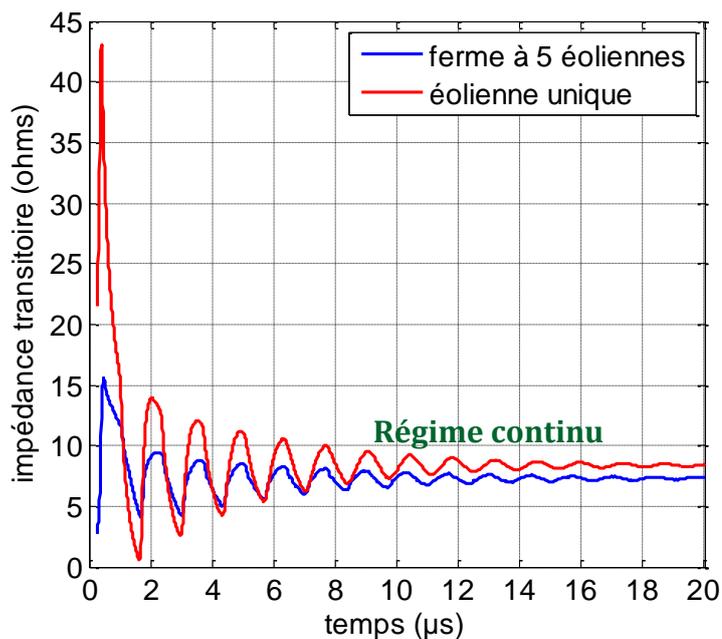
$$Z = v/i;$$

v: tension à l'entrée de l'électrode ;

i : courant à l'entrée de l'électrode.



**Figure III.24.** Tension (GPR) à la base de l'éolienne foudroyée.



**Figure III.25.** Impédance transitoire pour une résistivité de 100 Ω.m.

Les résultats en figure III.24, montrent bien que l'interconnexion des prises de terre par câbles enterrés conduit à une nette réduction du GPR.

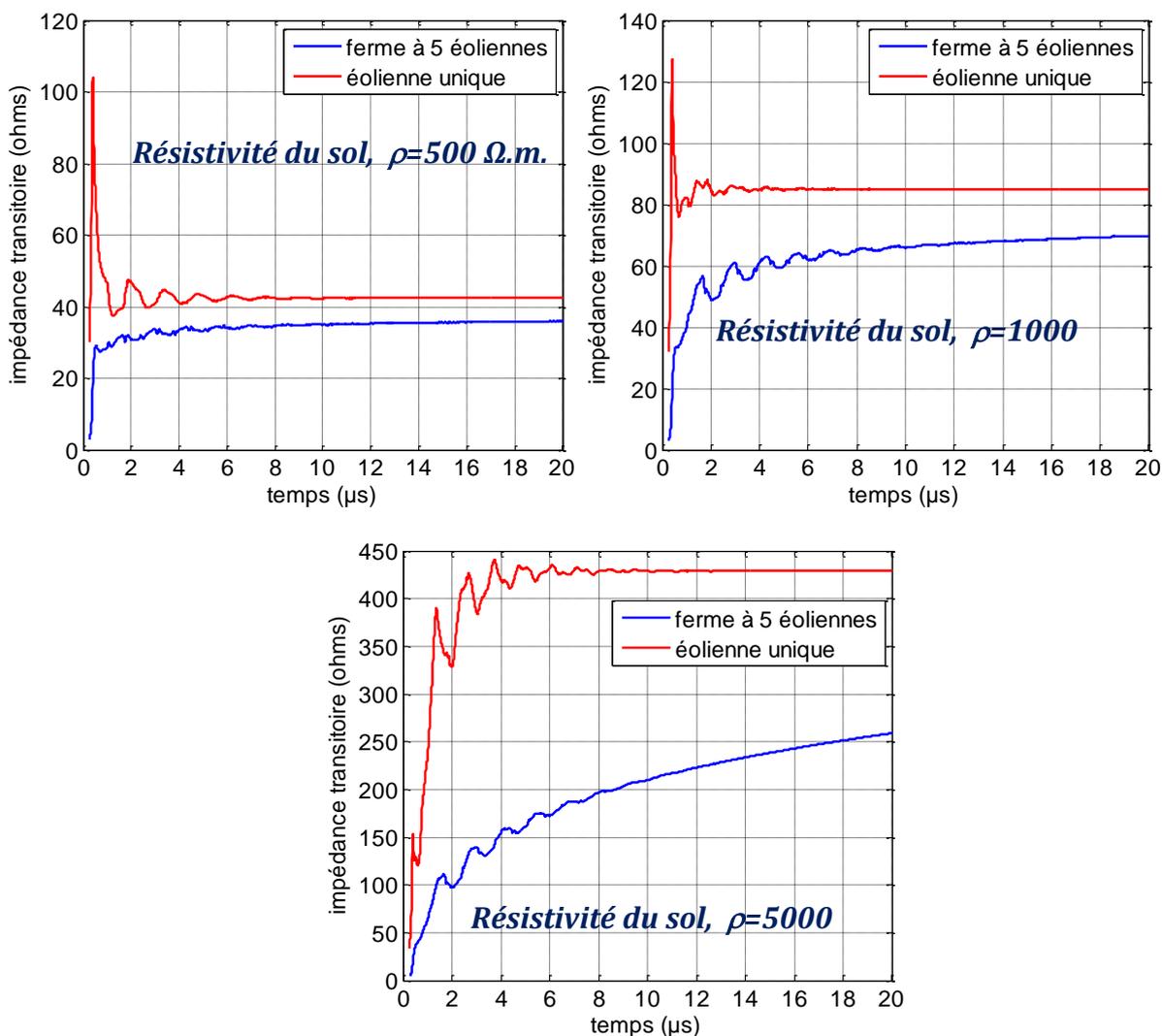
Notons qu'après la fin du transitoire ( $t > 14\mu s$  en figure III.25), nous sommes en présence du régime continu (queue du transitoire) ; nous relevons les résistances à partir des résultats en figures III.25 et nous calculons la résistance pour un piquet vertical en utilisant l'expression de E. D. Sunde [III-10] (Annexe 1). Nous avons les résultats sur le tableau III.2 suivant :

<b>R1 (Ω):</b> <b>résistance de terre</b> <b>pour une éolienne</b>	<b>R5 (Ω):</b> <b>résistance de terre</b> <b>pour une ferme à 5</b> <b>éoliennes</b>	<b>R (Ω):</b> <b>Résistance de terre</b> <b>calculée pour un</b> <b>piquet vertical</b>
9	7,2	9,91

**Tableau III.2.** Valeurs de la résistance relevée et calculée.

Notre modélisation (Tableau III.2) confirme bien la réduction de la résistance de terre introduit par les câbles souterrains qui interconnectent les prises de terres.

Pour confirmer le résultat observé en figure III.25, nous réalisons d'autres calculs en faisant varier la résistivité du sol ( $\rho=500 \Omega.m$  ;  $1000 \Omega.m$  et  $5000 \Omega.m$ ).



**Figure III.26.** Impédance transitoire de la tour foudroyée pour différentes résistivités du sol.

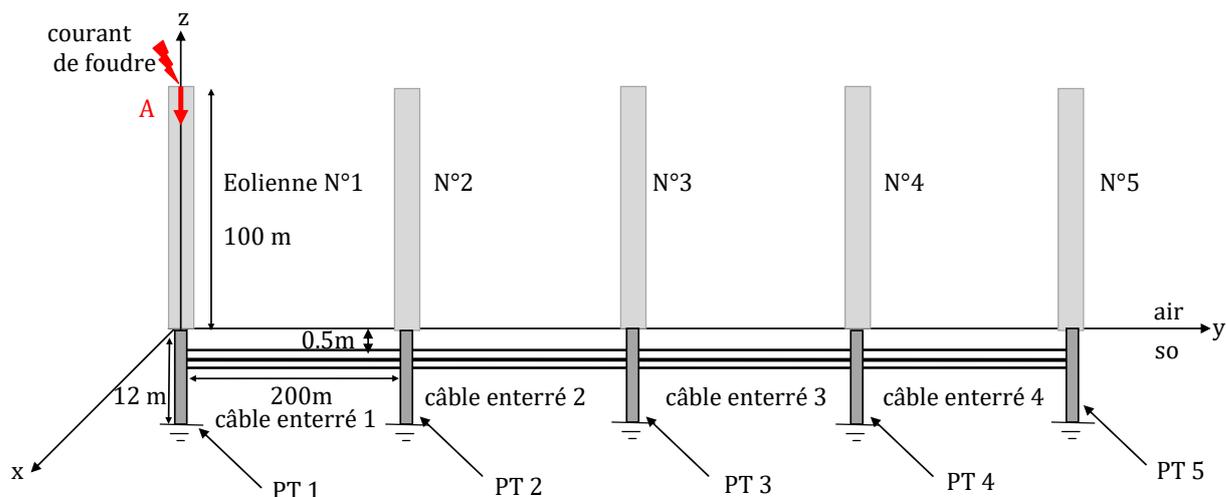
En faisant varier la résistivité du sol, les résultats en figures III.26 confirment l'avantage d'interconnecter les prises de terres par câbles souterrains ; aussi cet avantage est plus en évidence pour la résistivité la plus élevée (figure III.26, pour  $\rho=5000 \Omega.m$ ), donc la résistance de terre verra une forte réduction pour les résistivités élevées. Pour  $\rho=5000 \Omega.m$ , nous constatons une réduction presque de moitié pour une ferme à 5 éoliennes.

**Remarque :** Pour nos simulations, nous avons utilisé de simples piquets verticaux, alors que la prise de terre de l'éolienne doit être formée d'un treillis de mise à la terre et de pieux de fondation pour garantir une résistance de terre de faible valeur. Dans le paragraphe qui va suivre nous considérons l'effet de la forme et de la quantité de cuivre.

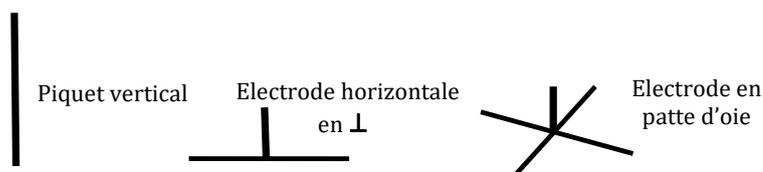
## II.2. Effet sur le GPR de la forme géométrique de la prise de terre

Pour cette application nous considérons la ferme éolienne précédemment décrite, et reprise en figure III.27, mais en adoptant trois types de prises de terres et bien évidemment en gardant la même quantité de cuivre (figure III.28):

- Simple piquet Verticale : **V**
- Simple électrode Horizontale : **⊥**
- Electrode en patte d'oie : **X**



**Figure III.27.** Ferme éolienne avec différentes prises de terres (PT) interconnectées par câbles souterrains.

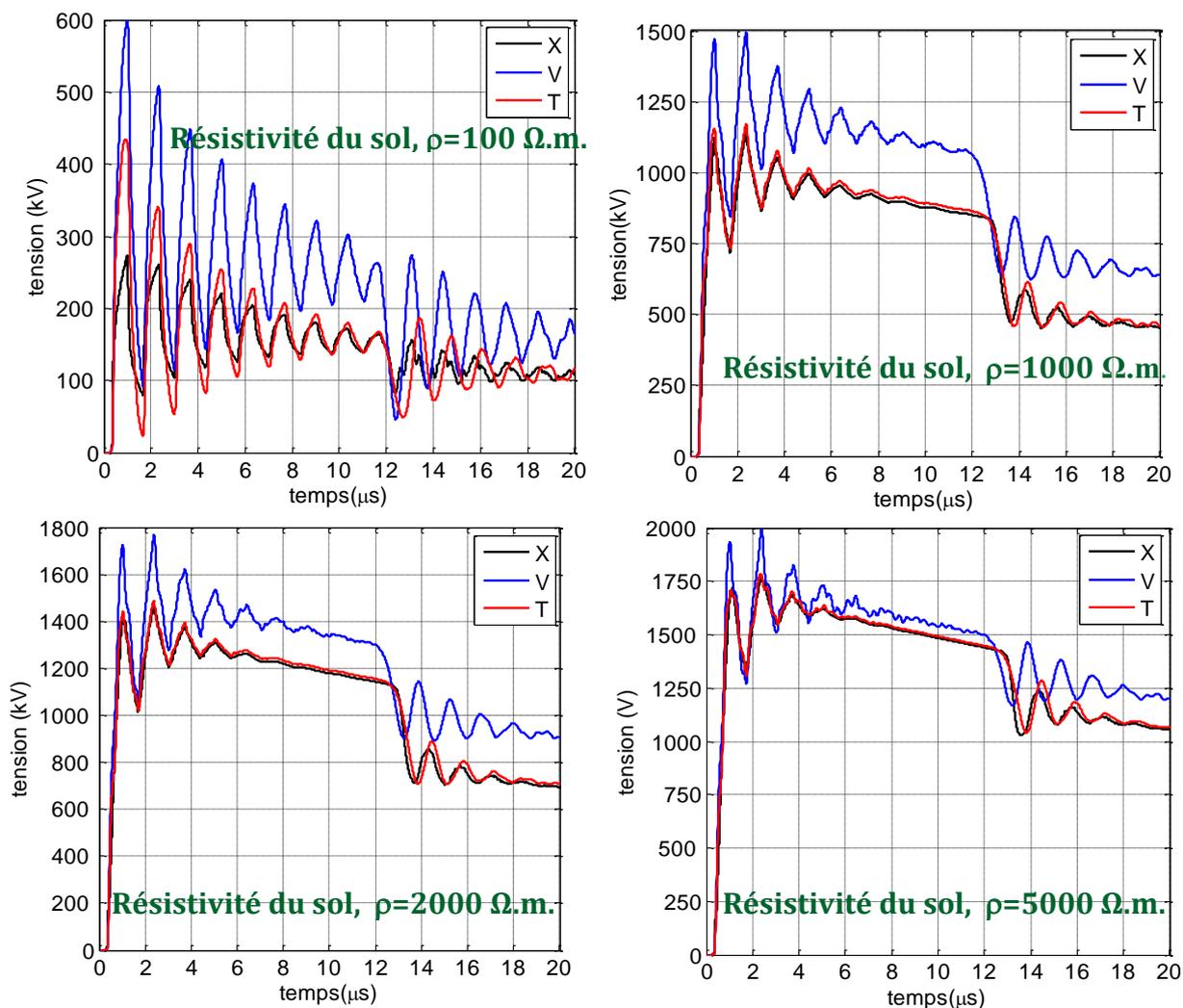


**Figure III.28.** Différentes prises de terres (PT) analysées.

Le générateur de courant est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$i(t) = i_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)),$$

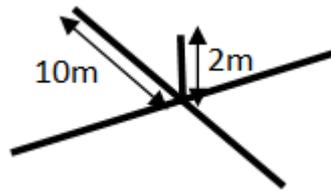
Avec :  $I_0 = 50kA$ ,  $\alpha = 0.0188\mu s^{-1}$ ,  $\beta = 1.6\mu s^{-1}$ .



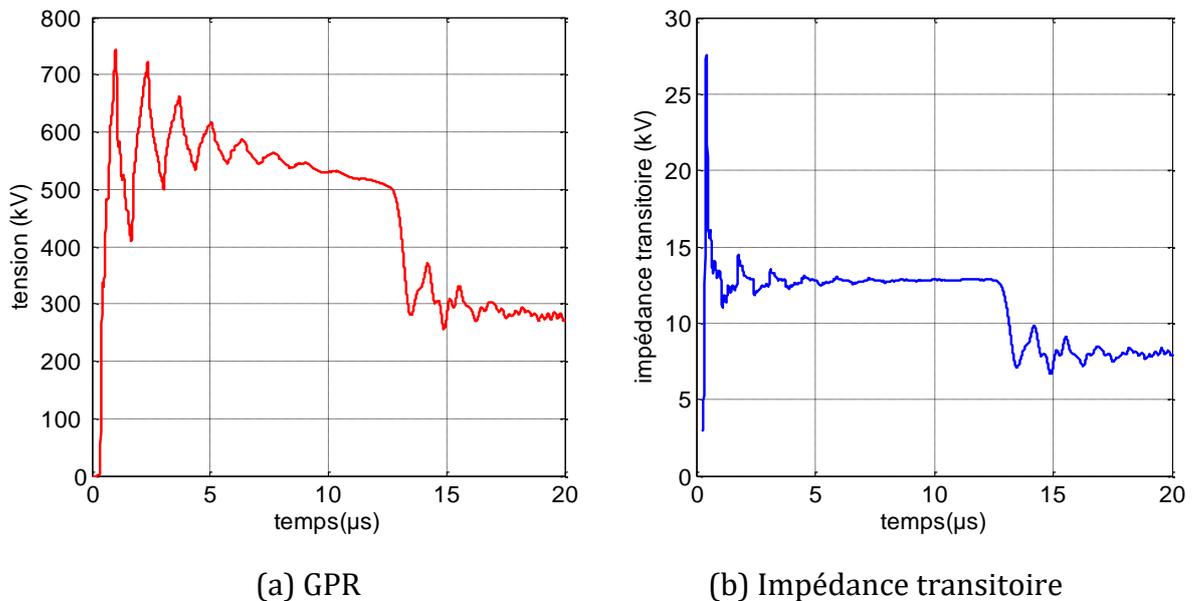
**Figure III.29.** GPR de la tour foudroyée pour différentes formes de prises de terres.

Les résultats en figure III.29, mettent bien en évidence l'effet de la forme de la prise de terre pour pratiquement la même quantité de cuivre. Le piquet vertical apparaît comme le plus mauvais ; pour les résistivités du sol élevées, l'électrode horizontale en T et la patte d'oie conduisent pratiquement au même résultat.

Bien évidemment, il reste possible de diminuer le GPR et donc la résistance de terre en utilisant le plus possible de fils de cuivre pour une patte d'oie à titre d'exemple. Pour mettre en évidence l'effet de la forme de la mise à la terre est donc de la quantité de fil de cuivre utilisée lors de sa conception, nous proposons de considérer le cas où la patte d'oie (prise de terre de chaque éolienne de la ferme en figure III.27) est d'extension plus importante (figure III.30).



**Figure III.30.** Patte d'oie de dimensions importante.

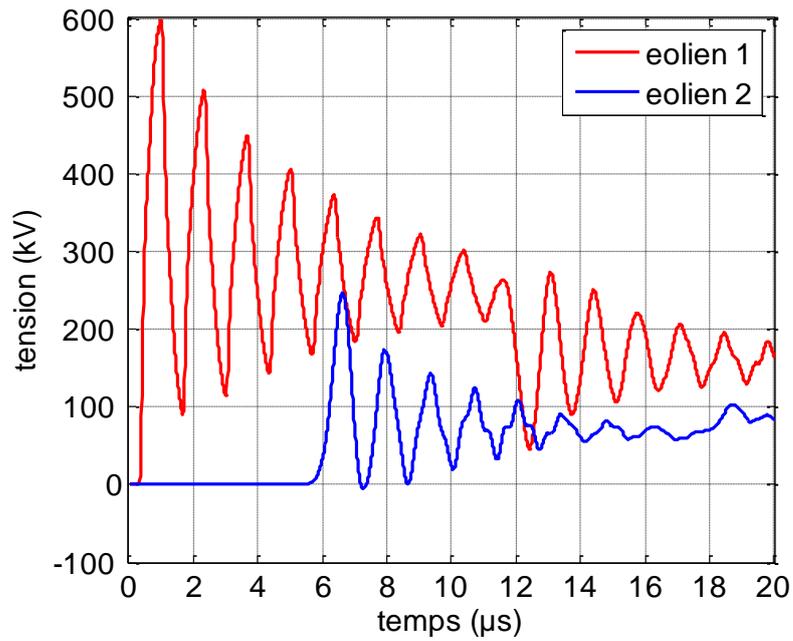


**Figure III.31.** GPR (a) et Impédance transitoire (b) pour une résistivité du sol de  $1000 \Omega.m$  pour une patte d'oie de dimensions importantes.

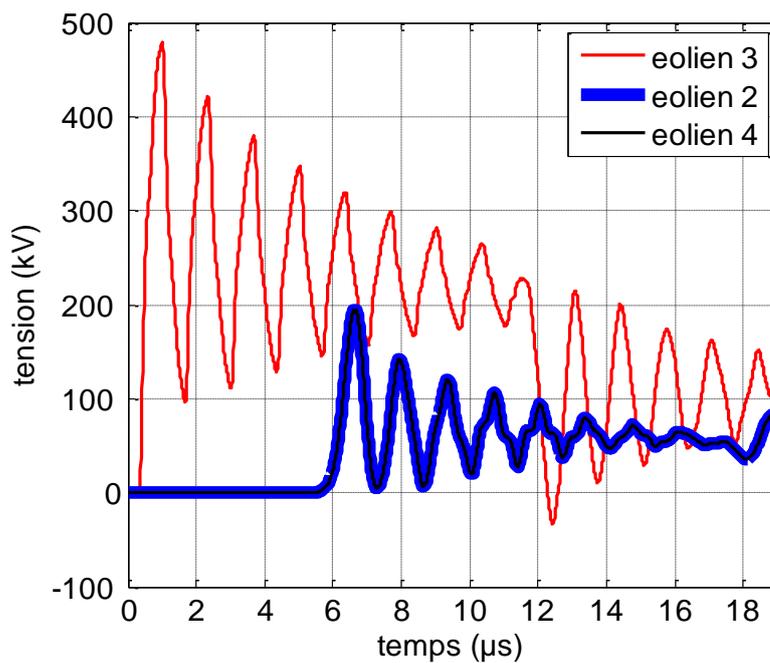
Les résultats en figure III.31, donnent la variation du GPR et de l'impédance transitoire de terre de l'éolienne foudroyée. Comparativement aux résultats obtenus en figure III.29 pour une résistivité de  $1000\Omega.m$ , nous constatons une forte réduction du GPR (de 1200 kV à 730kV) de la tour foudroyée et donc de sa résistance de terre qui est réduite à  $8\Omega$ .

### II.3. Impact de la tour foudroyée sur la tour mitoyenne

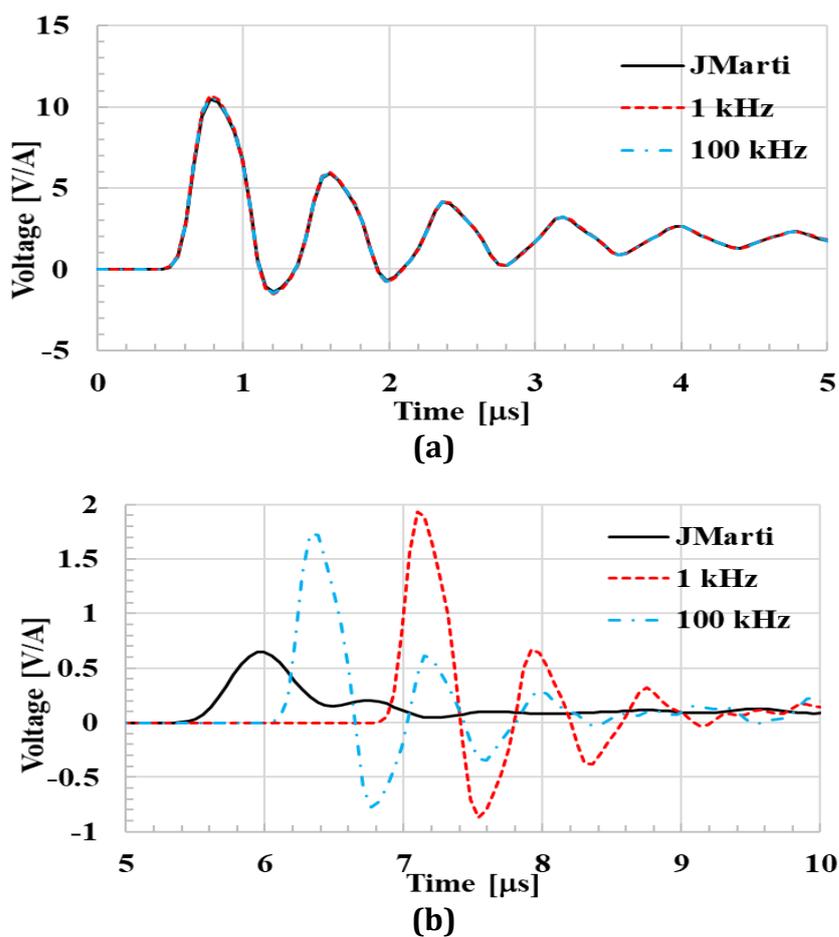
Pour cette application, nous gardons la ferme éolienne figure III.27 (à prise de terre verticale) précédemment traitée avec les mêmes données ( $\rho=100\Omega.m$ ) et en considérant successivement le foudroiement de la première puis la troisième tour.



**Figure III.32.** GPR à la base des tours 1 et 2 (foudroiement de l'éolienne 1).



**Figure III.33.** GPR à la base des tours 3, 2 et 4 (foudroiement de l'éolienne 3).



**Figure III.34.** GPR de l'éolienne foudroyée (a) et de l'éolienne mitoyenne 2 (b) [III-3].

L'analyse des résultats en figures III.32 et III.33, montre que le GPR sur la (ou les) tour (s) mitoyenne (s) est largement inférieur à celui observé sur la tour foudroyée, ce résultat est bien confirmé dans le travail publié par A. Yamanaka et al. [III-3] (figure III.34) pour la configuration en figure III.19. Les résultats en figure III.33 mettent en évidence l'effet de la symétrie électrique où nous constatons le même GPR sur les tours 2 et 4.

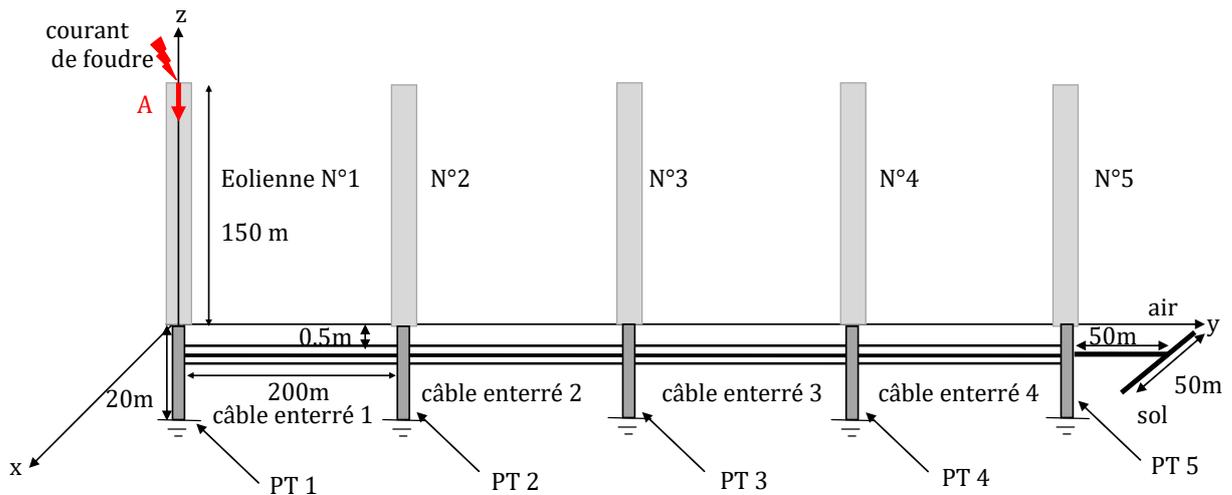
#### II.4. Simulation du circuit de terre complet

Un travail complet consiste à tenir compte de la prise de terre du poste d'interconnexion. La prise de terre du poste est une grille généralement de dimensions importantes. Dans notre travail, nous proposons d'intégrer une forme simplifiée de la prise de terre du poste pour analyser son impact sur le GPR de la tour foudroyée. La dernière application que nous traitons est celle en figure III.35 où nous introduisons la prise de terre (deux électrodes horizontales) du poste de raccordement au réseau à partir de l'éolienne n°5.

Pour cette application nous prévoyons deux scénarios :

- Scénario 1 : l'impact de foudre direct est sur l'éolienne n°1, et nous analysons le GPR de cette dernière dans le cas où le réseau de terre du parc éolien est sans la prise de terre du poste, puis avec prise de terre du poste.

- Scénario 2 : l'impact de foudre direct est sur l'éolienne n°5, et nous analysons le GPR de cette dernière dans le cas où le réseau de terre du parc éolien est sans la prise de terre du poste, puis avec prise de terre du poste.

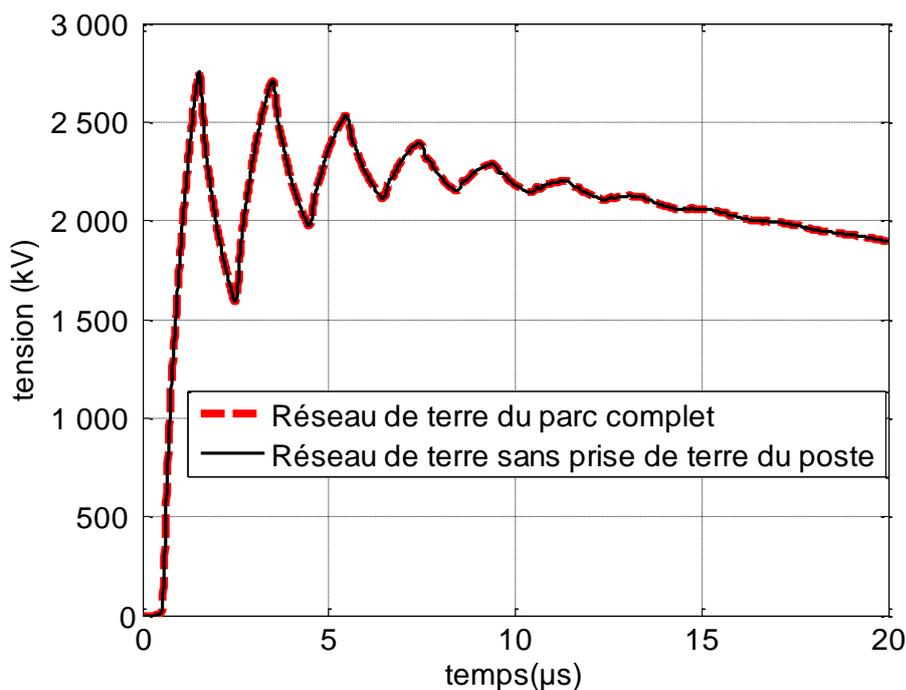


**Figure III.35.** Ferme éolienne réseau de terre complet (prise verticale pour chaque éolienne).

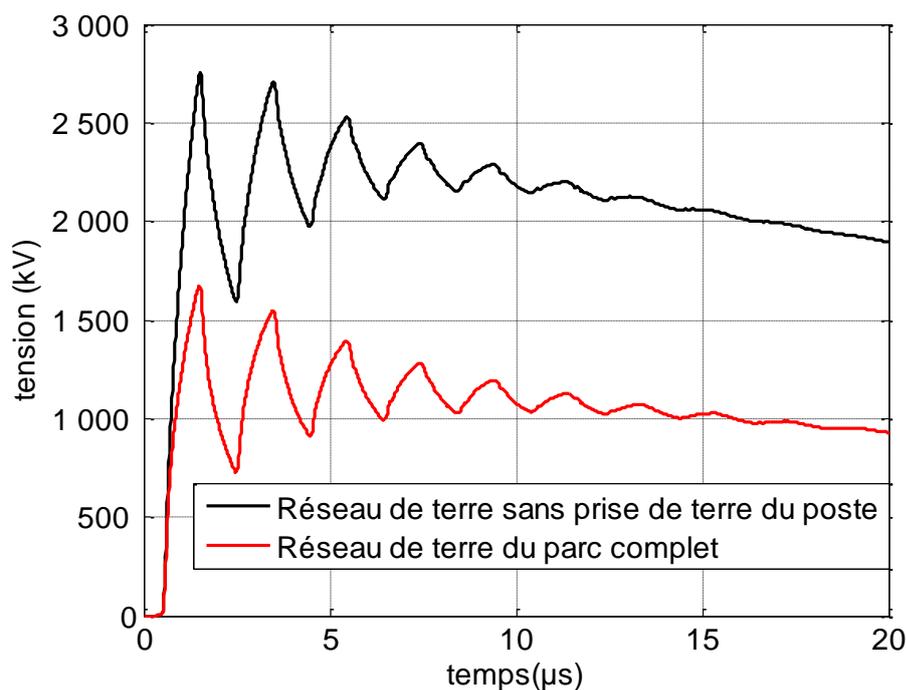
Les données géométriques sont celles en figure III.35, la résistivité du sol est  $\rho=1000\Omega.m$  et le générateur de courant est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle suivante :

$$i(t) = i_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)),$$

Avec :  $I_0 = 50kA$ ,  $\alpha = 0.0188\mu s^{-1}$ ,  $\beta = 1.6\mu s^{-1}$ .



**Figure III.36.** GPR à la base de l'éolienne n°1 (scénario1: foudroiement de l'éolienne 1).



**Figure III.37.** GPR à la base de l'éolienne n°5 (scénario 2 : foudroiement de l'éolienne n°5).

En figure III.36, nous constatons que le GPR à la base de l'éolienne 1 est le même pour les deux scénarios. Ce résultat reste plausible car la prise de terre du poste de raccordement est relativement éloignée (800m) de l'éolienne 1, ce qui conduit à l'évacuation prioritairement du courant de décharge par les prises de terre des différentes éoliennes pour arriver à la fin à la mise à la terre du poste; notons que nous avons déjà constaté que le

GPR chute de façon importante entre la base de l'éolienne foudroyée et la base de l'éolienne mitoyenne (figures III.32 et III.33).

Lorsque c'est l'éolienne n°5 qui est foudroyée, qui est directement reliée à la prise de terre du poste de raccordement, nous constatons pour le scénario 2 que le GPR à sa base a considérablement diminué (figure III.37). Donc la mise à la terre du poste peut contribuer à l'amélioration de la mise à la terre d'une éolienne lorsque cette dernière est proche du point de vu chemin électrique.

## ***Conclusion***

Bien que des modèles électromagnétiques numériques soient actuellement disponibles pour une prédiction précise du comportement transitoire à la foudre des électrodes de mise à la terre, leur temps de traitement est très long. Pour pallier cet inconvénient, dans les applications (réalisées par modélisation) de protection contre la foudre, une représentation approchée des électrodes (exemple par une simple résistance) est souvent nécessaire pour accélérer l'estimation de la réponse à la foudre des systèmes électriques. Malheureusement, cette simplification de la représentation mathématique des électrodes ne permet pas une analyse correcte au début du transitoire.

En effet, bien que dans la plupart des cas, la résistance de terre est le paramètre utilisé pour représenter les systèmes de mise à la terre, car elle peut être facilement mesurée ou calculée, cependant, plusieurs travaux ont montré que cette résistance est acceptable pour représenter la réponse à la foudre de simples électrodes. Il est possible de surmonter cette limitation en utilisant l'impédance transitoire de mise à la terre telle que nous l'avons présentée et associée aux résultats du GPR des applications traitées dans ce chapitre.

Dans notre travail, nous avons opté pour une représentation par la théorie des lignes de l'ensemble des éléments du parc éolien pour rester le plus possible proche de la réalité ; nous avons particulièrement opté pour une représentation d'une électrode enterrée qui tient compte de l'effet des pertes électriques (résistance et conductance), de l'effet du champ électrique (de la capacité) ainsi que de l'effet du champ magnétique (de l'inductance).

Dans ce troisième chapitre, nous avons en premier lieu validé notre modèle en comparant nos résultats à ceux réalisés avec des logiciels commercialisés ainsi qu'à ceux publiés dans la littérature. Puis nous avons proposé quelques applications pour mettre en évidence l'avantage de notre modélisation ; en effet, en utilisant une modélisation réaliste, c'est à dire un modèle théorique accessible, facile à implémenter et des temps de calcul assez faibles, nous avons pu analyser le comportement transitoire d'une ferme éolienne lorsqu'une tour est foudroyée.

Nous avons principalement consacré notre travail au rôle du réseau de terre d'un parc éolien sachant son importance en régime perturbé.

## Références Bibliographiques

- [III-1]** B. Harrat, "Thèse de doctorat en sciences techniques" – université de Jijel – 2008.
- [III-2]** MATLAB et SIMULINK – MathWorks éditeur .
- [III-3]** A. Yamanaka et al., "Effect of Inductive Grounding Impedance on Lightning Transients in Wind Farm", IEEE Symposium ICLP 2018. Poland.
- [III-4]** NEC-4 "Numerical Electromagnetic Code", janvier,1992.
- [III-5]** Working group 05\*, "Calculation of switching Surges", Electra No 62. 1973.
- [III-6]** A. Semlyen and A. Dabuleanu, "Fast and accurate swithing transient calculations on transmission line with ground return using recursive convolutions", IEEE Trans., vol.PAS-94, no.2, pp.561-571, 1975.
- [III-7]** J.R. Marti, "Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Line in Electromagnetic Simulation", IEEE Trans. On PAS-101.N°1, January 1982.
- [III-8]** W. S. Meyer, and T. Liu, "Electromagnetic transients program theory book", Bonneville power admistration, 1995.
- [III-9]** E. J. Rojers, and J. F. White, Mutual Coupling Between Finite Lengths of Parallel or Angled Horizontal Earth Return Conductors, IEEE, Trans. On Power Delivery, Vol.4, No. 1, January 1989, pp. 103-113.
- [III-10]** E. D. Sunde, "Earth Conducting Effects in Transmission Systems", New York, N. Y. Dover publications, Inc 1968.
- [III-11]** Ametani A., A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. IEEE Trans. On Power Apparatus and systems, vol. PAS-99, N°. 3, May/June 1980.
- [III-12]** Robert Hoerauf, "Considerations in Wind Farm Grounding Designs", IEEE Trans. On Industry Applications. VOL. 50, NO. 2, MARCH/APRIL 2014.

## ***Conclusion Générale***

---

## ***Conclusion Générale***

La découverte et l'utilisation massive des énergies fossiles, principalement les hydrocarbures, a permis le développement de nouveaux moyens de transport pour se déplacer plus vite et plus loin, de production pour élaborer des produits en grandes quantités et à coût réduit, de chauffage... Les hydrocarbures sont aujourd'hui partout présents dans notre quotidien. Les hommes ont privilégié ces énergies depuis plus de deux cents ans car elles étaient abondantes, bon marché et faciles à utiliser dans bien des domaines.

De nos jours, le défi est de taille : répondre aux besoins énergétiques croissants, voire exponentiels dans certaines zones du monde, alors que les énergies fossiles se raréfient et que la sonnette d'alarme en matière environnementale est tirée depuis plusieurs décennies. Les experts en la matière sont persuadés maintenant que nous devons compter aussi à l'avenir sur un bouquet énergétique regroupant les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine. Dans le but d'une utilisation optimale et compétitive des énergies renouvelables, nous assistons actuellement à une recherche intensive sur l'intégration des centrales multi-sources (énergie fossile et énergie renouvelable) aux réseaux électriques conventionnels.

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est une énergie qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels. Ces dernières années, plusieurs pays ont installés des parcs éoliens. Un parc éolien est un ensemble de plusieurs aérogénérateurs (éoliennes) sur un site, connectés au réseau d'électricité en un même

point. Le parc éolien s'inscrit aujourd'hui dans la stratégie de l'intégration des centrales multi-sources aux réseaux électriques conventionnels.

Si le plus souvent le principal inconvénient retenu pour la production de l'énergie éolienne est le fait que le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable, un deuxième désagrément causé par la foudre peut rendre le parc indisponible pendant une durée de temps fort importante.

En effet, les sites d'installations sur plusieurs hectares, dégagés et en hauteur, des parcs éoliens dont les aérogénérateurs peuvent atteindre jusqu'à 200m de hauteur sont une cible privilégiée de la décharge orageuse. Lors d'un impact direct de foudre sur une éolienne, si l'énergie injectée par la décharge n'est pas évacuée très rapidement de nombreux dégâts matériels et même humains peuvent intervenir.

En période perturbé le circuit de terre de l'installation électrique (parc éolien) doit tenir un rôle prépondérant dans la protection du matériel et du personnel technique. Le dimensionnement optimal du circuit de terre n'est pas une tâche aisée sachant le caractère inhomogène des sols.

Dans le but de contribuer à l'analyse des circuits de terre d'un parc éolien, nous avons proposé dans ce PFE un outil de modélisation réaliste permettant de simuler le comportement transitoire d'un dispositif électrique complexe composé d'éoliennes équipées de prises de terre et interconnectées par des câbles souterrains.

Le formalisme topologique que nous avons adopté pour notre travail est élaboré à partir de la théorie générale des lignes de transmissions et de la méthode numérique dite FDTD. Après sa validation, nous avons proposés des applications pour mettre en évidence ses principaux avantages.

Avec cet outil de modélisation qui est réaliste en précision et temps de calcul comparativement à ceux utilisant directement un modèle électromagnétique (ex. théorie des antennes), nous avons confirmé un résultat rapporté par la littérature qui indique que le rôle du câble enterré qui interconnecte les éoliennes et de diminuer la résistance de terre à fréquence industrielle. Nous avons montré que notre formalisme permet de modéliser un dispositif complexe, inhomogène (éolienne, câble et prise de terre), de dimensions importantes et surtout de tenir compte aisément des différentes géométries filiformes de prise de terre. Aussi avec ce formalisme, nous avons pu modéliser le dispositif

complet de mise à la terre qui comprend la prise de terre individuelle de chaque éolienne, les câbles souterrains ainsi que la mise à la terre du poste d'interconnexion.

Vu que notre modélisation numérique est tenue par un critère de stabilité, et aussi sachant que nous avons des éléments aériens et d'autres souterrains ce qui conduit à des vitesses de propagation des signaux électriques très éloignées, notre formalisme à constantes localisées (paramètres linéiques constants et calculés à une fréquence donnée) conduit parfois à des résultats présentant des oscillations numériques, alors en perspectives de ce travail, il serait intéressant d'introduire la notion de paramètres linéiques dépendants de la fréquence.

## ***Annexe***

---

# ***Expressions pour le Calcul des Paramètres Linéiques des Lignes***

## I. Equations générales des lignes de transmissions

Les deux équations générales des lignes de transmission (en bi-filaire) sont les suivantes :

$$\frac{d\bar{U}(x, \omega)}{dx} = -\bar{Z}\bar{I}(x, \omega) \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{d\bar{I}(x, \omega)}{dx} = -\bar{Y}\bar{U}(x, \omega) \quad (\text{A.2})$$

Avec :

$$\bar{Z} = R + jL\omega$$

$$\bar{Y} = G + jC\omega$$

Où R, L, C et G sont les paramètres linéiques. Z et Y sont l'impédance longitudinale et l'admittance transversale de la ligne.

R est la résistance linéique de la ligne ;

L est l'inductance linéique de la ligne ;

G est la conductance linéique transverse de la ligne ;

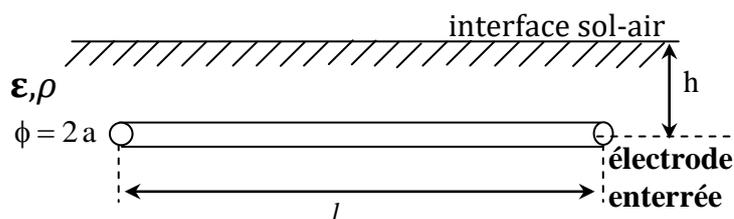
C est la capacité linéique transverse de la ligne.

## II. Représentation d'une électrode enterrée par une ligne de transmission

La représentation d'une électrode, filiforme et enterrée dans un sol de conductivité finie, a été proposée pour la première fois par E. D. Sunde [A-1]. Dans son travail l'auteur propose des expressions pour le calcul des paramètres linéiques qui sont données ci-dessous.

### - *Electrode enterrée horizontalement*

Les expressions des paramètres linéiques sont fonction des données géométriques et physiques en figure (A.1).



**Figure A.1.** Electrode enterrée horizontalement.

$$G = \frac{\pi}{\rho \left[ \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right]} \quad (\text{A.3})$$

$$C = \frac{\pi \varepsilon}{\left[ \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right]} \quad (\text{A.4})$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ah}} \right) - 1 \right] \quad (\text{A.5})$$

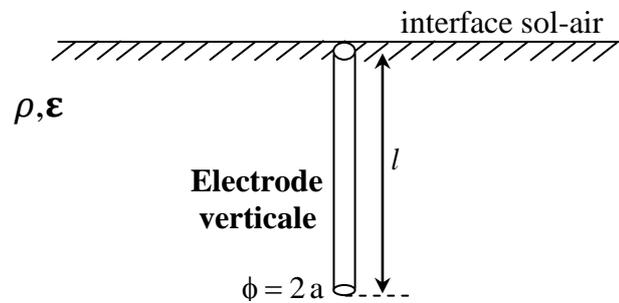
La résistance linéique de l'électrode est donnée simplement par l'expression suivante :

$$R = \rho_c \frac{1}{\pi a^2} \quad (\text{A.6})$$

où :  $\rho$  est la résistivité finie du sol et  $\rho_c$  est la résistivité du conducteur (électrode).

#### - **Electrode enfouie verticalement**

Les expressions des paramètres linéiques sont fonction des données géométriques et physiques en figure A.2.



**Figure A.2.** Electrode enfouie verticalement.

La conductance et la capacité linéiques sont :

$$G = \frac{2\pi}{\rho \left[ \ln \left( \frac{4l}{a} \right) - 1 \right]} \quad (\text{A.7})$$

$$C = \frac{2\pi \varepsilon}{\left[ \ln \left( \frac{4l}{a} \right) - 1 \right]} \quad (\text{A.8})$$

L'inductance et la résistance linéiques sont :

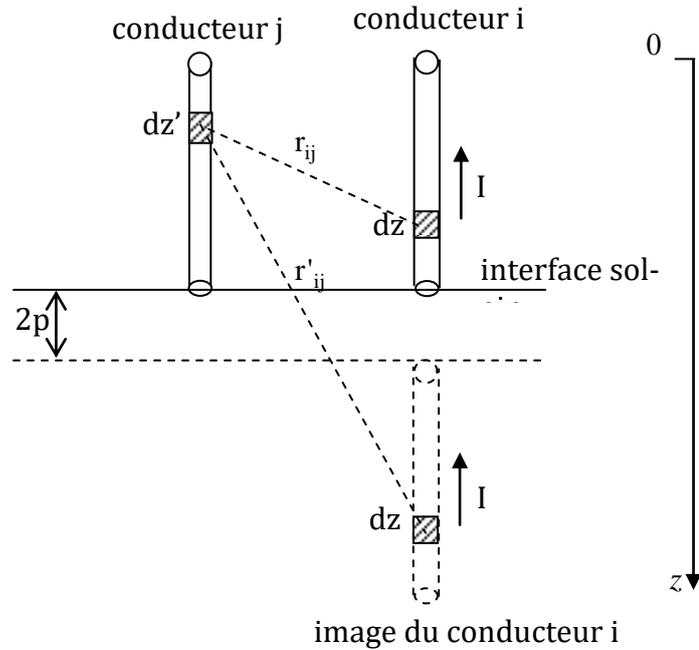
$$L = \frac{\mu}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \quad (\text{A.9})$$

$$R = \rho_c \frac{1}{\pi a^2} \quad (\text{A.10})$$

où :  $\rho$  est la résistivité finie du sol et  $\rho_c$  est la résistivité du conducteur (électrode).

### III. Conducteurs aériens au-dessus d'un sol de conductivité finie

Plusieurs auteurs ont montrés qu'il est possible de représenter un conducteur aérien vertical (figure A.3) et filiforme par une ligne de transmission. Nous donnons dans ce qui suit les expressions proposées par E. J. Rojers [A-2], [A-3]. Les expressions sont fonction des données géométriques et physiques en figure A.3.



**Figure A.3.** Deux conducteurs verticaux au-dessus du sol.

Dans le cas de deux conducteurs  $i$  et  $j$  de même longueur  $l$  (figure A.3), les impédances linéiques propres et mutuelles peuvent être calculées à l'aide des expressions suivantes [A-2], [A-3] :

$$Z_{ii} = j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \left[ \ln\left(\frac{l + A_1}{-l + A_1}\right) + 2\left(\frac{l + p}{l}\right) \ln(-2l - 2p + B_1) + \left(\frac{2p}{l}\right) \ln(-2p + C_1) \right. \\ \left. - 2\left(\frac{l + 2p}{l}\right) \ln(-l - 2p + D_1) + \frac{B_1 - 2D_1 + C_1 + 2r - 2A_1}{l} \right] \quad (\text{A.11})$$

avec :

$$A_1 = \sqrt{l^2 + r^2}, \quad B_1 = \sqrt{r^2 + 4(l+p)^2}, \quad C_1 = \sqrt{r^2 + (2p)^2}, \quad D_1 = \sqrt{r^2 + (l+2p)^2}$$

$$Z_{ij} = j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \left[ \ln \left( \frac{l + A_2}{-l + A_2} \right) + 2 \left( \frac{l+p}{l} \right) \ln(-2l - 2p + B_2) + \left( \frac{2p}{l} \right) \ln(-2p + C_2) \right. \\ \left. - 2 \left( \frac{l+2p}{l} \right) \ln(-l - 2p + D_2) + \frac{B_2 - 2D_2 + C_2 + 2d_{ij} - 2A_2}{l} \right] \quad (\text{A.12})$$

$$\text{avec : } A_2 = \sqrt{l^2 + d_{ij}^2}, \quad B_2 = \sqrt{d_{ij}^2 + 4(l+p)^2}, \quad C_2 = \sqrt{d_{ij}^2 + (2p)^2}, \quad D_2 = \sqrt{d_{ij}^2 + (l+2p)^2}$$

$$\text{et : } \rho = \sqrt{\frac{1}{j\omega\delta_s\mu_0}}$$

Les capacités propres et mutuelles des conducteurs verticaux au-dessus du sol peuvent être calculées par les expressions de E. J. Rojers et al.[A-3] suivantes :

$$C_{ii} = 4\pi\epsilon_0 \left[ \ln \left( \frac{l + A_1}{-l + A_1} \right) + 2 \ln(-2l + B_1) - 2 \ln(-l + D_1) + \frac{B_1 - 2D_1 + C_1 + 2r - 2A_1}{l} \right]^{-1} \quad (\text{A.13})$$

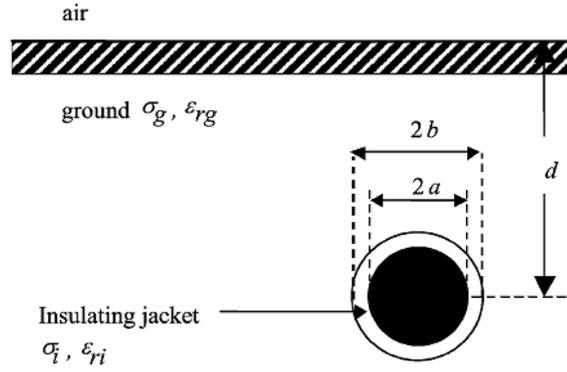
$$\text{avec : } A_1 = \sqrt{l^2 + r^2}, \quad B_1 = \sqrt{r^2 + 4l^2}, \quad C_1 = r, \quad D_1 = \sqrt{r^2 + l^2}$$

$$C_{ij} = 4\pi\epsilon_0 \left[ \ln \left( \frac{l + A_2}{-l + A_2} \right) + 2 \ln(-2l + B_2) - 2 \ln(-l + D_2) + \frac{B_2 - 2D_2 + C_2 + 2d_{ij} - 2A_2}{l} \right]^{-1} \quad (\text{A.14})$$

$$\text{avec : } A_2 = \sqrt{l^2 + d_{ij}^2}, \quad B_2 = \sqrt{d_{ij}^2 + 4l^2}, \quad C_2 = d_{ij}, \quad D_2 = \sqrt{d_{ij}^2 + l^2}.$$

#### IV. Câble simplement isolé et enterré

La représentation d'un câble blindé (âme, écran et blindage) par une ligne de transmission multifilaire a été proposée par A. Ametani [A-4]. Pour le cas d'un câble simplement isolé (âme + isolant) et enterrée dans un sol de conductivité finie (figure A.4), E. Petrache [A-5] a résumé les principales expressions nécessaires au calcul de l'impédance  $Z$  et de l'admittance  $Y$  du câble.



**Figure A.4.** Câble isolé et enterré une profondeur  $d$ .

L'impédance longitudinale s'exprime comme suit :

$$Z = j\omega L + Z_w + Z_g \quad (\text{A.15})$$

$L$  : inductance du câble dans un espace libre.

$Z_w$  est l'impédance par unité de longueur interne du conducteur ;

$Z_g$  est l'impédance par unité de longueur du sol.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (\text{A.16})$$

$$Z_w = \frac{\gamma_w I_0(\gamma_w a)}{2\pi a \sigma_w I_1(\gamma_w a)} \quad (\text{A.17})$$

$\gamma_w = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_w + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{rw})}$  : constante de propagation dans le conducteur (âme).

$I_0, I_1$  : fonctions de Bessel modifiées de première espèce d'ordre 0 et d'ordre 1,

$\sigma_w$  : conductivité du conducteur (âme)

$\varepsilon_{rw}$  : permittivité électrique relative du conducteur (âme).

$$Z_g = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_g b}{\gamma_g b}\right) \quad (\text{A.18})$$

$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{rg})}$  : constante de propagation dans le sol.

L'admittance transversale s'exprime comme suit :

$$Y = \frac{(G + j\omega C) \cdot Y_g}{(G + j\omega C) + Y_g} \quad (\text{A.19})$$

$$Y_g = \frac{\gamma_g^2}{Z_g} \quad (\text{A.20})$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ri}}{\ln(b/a)} \quad (\text{A.21})$$

$$G = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0\epsilon_{ri}} C \quad (\text{A.22})$$

$Y_g$  : admittance par unité de longueur du sol.

$C$  : capacité par unité de longueur du câble dans un espace libre.

$G$  : conductance par unité de longueur du câble.

$\sigma_i$  : conductivité de l'isolant.

$\epsilon_{ri}$  : permittivité électrique relative de l'isolant.

## Références Bibliographiques

- [A-1]** E. D. Sunde, "Earth Conducting Effects in Transmission Systems", New York, N. Y. Dover publications, Inc 1968.
- [A-2]** E. J. Rojers, and J. F. White, Mutual Coupling Between Finite Lengths of Parallel or Angled Horizontal Earth Return Conductors, IEEE, Trans. On Power Delivery, Vol.4, No. 1, January 1989, pp. 103-113.
- [A-3]** E. J. Rojers, and J. F. White, Mutual Coupling Between Horizontal Earth Return Conductors Using Actual Routing Parameters, IEEE, Trans. On Power Delivery, Vol.5, No, 3, July 1990, pp. 1266-1274.
- [A-4]** Ametani A., A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. IEEE Trans. On Power Apparatus and systems, vol. PAS-99, N°. 3, May/June 1980.
- [A-5]** E. Petrache and al., " Lightning Induced Disturbances in Buried Cables—Part I: Theory", IEEE Trans. On Electromagnetic Compattibility, Vol. 47 N°. 3, August 2005.