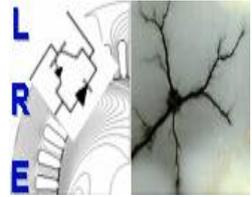




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**CHEBBATA Adel**

Intitulé

# Simulation et modélisation d'un système de terre de trois tiges parallèles

Directeur(s) du mémoire :

L.Nezli	Professeur	ENP
A.boubakeur	Professeur	ENP
R.Tahmi	Professeur	ENP

**ENP 2013**

# Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études, je remercie également mes parents de m'avoir soutenu durant toutes mes études.

Je tiens à remercier Monsieur le professeur TEGUAR pour son encadrement et ses précieux conseils et sa disponibilité, grâce à qui ce travail a vu le jour. Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu examiner mon travail.

Merci à tous les enseignants qui ont participé à ma formation, sans oublier tous mes amis et camarades.

## ملخص :

عملنا يتلخص في تحليل تغيرات الممانعة الكهربائية لنظام تأريضي، وهي ثلاثة قضبان متوازية. اعتبرنا عدة عوامل هندسية مختلفة (طول ونصف قطر القضبان وكذلك المسافة بينهما) و كهربائية (مقاومية وسماحية الأرض). لهذا استخدمنا المعالج 4.2 FEMM . و لكل شكل نقترح دائرة كهربائية موافقة و مقارنة ممانعتها مع الممانعة المستخرجة من 4.2 FEMM . بمجرد التحقق من موافقة هذه الدارة، يتم استخدام الدوائر التي تم الحصول عليها لإعادة إنتاج التوتر الكهربائي الناتج عن التعرض لتيار كهربائي لصدمة برق .

**الكلمات المفتاحية :** نظام تأريضي، ممانعة، قضيب أرضي، تواتر، مقاومة الأرض، سماحية الأرض.

## Résumé:

Notre travail consiste à analyser la variation de l'impédance électrique d'un système de mise à la terre, à savoir trois tiges en parallèle. Divers paramètres géométriques (le rayon et la longueur des tiges ainsi que la distance entre elles) et électriques (la résistivité et la permittivité du sol) ont été considérés. Pour cela, le code de calcul FEMM 4.2 a été utilisé. Pour chaque configuration, un circuit électrique équivalent est proposé dont les valeurs de son impédance sont comparées à celles trouvées en se basant sur le code de calcul susmentionné. Une fois validé, le circuit obtenu est utilisé pour reproduire l'onde de la tension de sortie suite à un choc de courant de foudre .

**Mots clés :** système de mise à la terre, impédance, tige de terre, fréquence, résistivité du sol, permittivité du sol.

## Abstract:

Our work consists in analyzing the variation of the electrical impedance of a system of earthing, namely three parallel rods. Various geometric parameters (length and radius of the rods as well as the distance between them) and electrical ones (resistivity and permittivity of the soil) have been considered. For this purpose, FEMM 4.2 computing code has been used. For each configuration, an equivalent circuit is proposed whose impedance values are compared to those found using the previous code. Once validated, the obtained circuit is used to reproduce the wavelength of the output voltage due to a normalized current lightning stroke.

**Key words :** earthing system, impedance, earthing rod, frequency, soil resistivity, soil permittivity.

**Table des matières**

REMERCIEMENT i

RESUME ii

Introduction générale.....1

**Chapitre I Etude de l'impédance pour un système de trois tiges**

I.1.Introduction .....5

I.2. Présentation du logiciel FEMM :.....5

I.3. Etude de l'impédance pour un système de trois tiges .....6

I.3.1. Basses Fréquence .....6

I.3.2. Hautes fréquences .....8

I.3.3. Variation de l'impédance en fonction de la fréquence  
pour différentes permittivités .....13

I.4. Limites du FEMM 4.2 .....14

I.5. Conclusion .....15

**Chapitre II modélisation de système de trois tiges**

II.1.Introduction .....17

II.2. Circuit électrique équivalent .....17

II.3. Choc de foudre .....20

II.3.1. Choc de foudre généralisé .....20

II.3.2. Onde de foudre .....21

II.3.3. La tension de sortie du circuit soumis à une onde de courant de foudre.....22

II.4. Conclusion .....27

**Chapitre III effet des paramètres géométriques liés aux trois tiges de terre parallèles**

III.1. Introduction .....29

III.2. Impédance en fonction du rayon :.....29

III.3. Circuit électrique équivalent :.....30

III.3.1.Comportement du circuit électrique équivalent suite à un choc de foudre :.....30

III.4. Effet de la longueur des tiges :.....	31
III.4.1. Impédance en fonction de la longueur des tiges :.....	31
III.4.2. Circuit électrique équivalent :.....	32
III.5. Effet de la distance inter-tiges :.....	33
III.5.1. Impédance en fonction de la distance.....	33
III.5.2. Circuit électrique équivalent .....	34
III.6. Conclusion .....	36
Conclusion générale .....	37
Bibliographie .....	39

# Introduction générale

## Introduction générale

Le courant de défaut cherche à s'écouler dans le sol à travers le système de mise à la terre lors d'un défaut à la terre d'un ouvrage énergétique ou sur une ligne de transmission de l'énergie électriques. En général, de tels défauts sont dus aux courts-circuits causés souvent par la foudre, la pluie ou les surtensions créées lors de l'ouverture et la fermeture des disjoncteurs [Georges, 2001]. Les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes en cas de défauts [Nzuru, 2009]. La conception des systèmes de mise à la terre de bonne qualité, dont les caractéristiques sont conservées dans le temps, s'avère indispensable pour protéger les biens et améliorer la qualité du service.

De tels systèmes de terre, ont pour rôles de protéger ou réduire le risque de détérioration du matériel en cas de foudre ou de courant de défaut, de protéger les personnes contre les éventuels défauts d'isolement des équipements sous tension et d'éviter les risques d'électrocution, d'améliorer la qualité du service et de limiter les surtensions nuisibles aux appareils avoisinants.

Etant donné l'importance de système de terre, plusieurs études ont été effectuées afin de prévoir le comportement de tels systèmes sous différentes charges rencontrées, lors d'un défaut du réseau électrique [Nzuru, 2009 et all]. Un tel comportement repose sur les propriétés du sol, la forme géométrique des électrodes de terre et le nombre d'électrodes connectées. Les propriétés électriques du sol sont caractérisées par la résistivité et la permittivité de la terre, qui dépendent du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité.

Le travail, que nous avons entrepris, porte sur l'étude du comportement des systèmes de mise à la terre. Dans cette intension, nous avons étudié le comportement de l'impédance de tels systèmes sous divers paramètres électrogéométriques. Les paramètres géométriques sont liés aux systèmes de terre, à savoir le rayon et la longueur des tiges ainsi que la distance entre elles. Les paramètres électriques concernent la résistivité et la permittivité de sol et la fréquence de l'onde courant à évacuer à la terre.

Le système de mise à la terre que nous avons étudiés est de trois tiges en parallèle . Deux procédures ont été suivies lors de la détermination des impédances équivalentes correspondantes en fonction des paramètres électrogéométriques susmentionnés. Nous avons utilisé, en premier lieu, le code de calcul FEMM dans sa version 4.2. Nous proposons par la suite un circuit électrique équivalent adéquat. L'impédance relative à ce circuit est comparée à celle obtenue en utilisant le FEMM 4.2. Une fois validé, le circuit obtenu est utilisé pour reproduire l'onde de la

tension de sortie suite à un choc de courant de foudre ( $1,2/50 \mu\text{s}$ ). Ainsi, en troisième chapitre est consacré pour examiner l'effet des paramètres géométriques liés aux dimensions du système de 3 tiges en parallèle, sur le comportement fréquentielle de son impédance. Nous utilisons le même système de terre que celui adopté en chapitre 2. Par voie de conséquence, un même circuit électrique équivalent au système précédent est proposé. Ce dernier permet d'étudier le comportement de la tension de sortie, suite à un choc de foudre, en tenant comptes des variations des paramètres géométriques.

# Chapitre 1

## Etude de l'impédance pour un système de trois tiges

### **I.1. Introduction :**

Une évaluation fiable du régime transitoire de la foudre s'écoulant dans un système de mise à la terre, nécessite une modélisation convenable et précise des composants de ce dernier. En effet, le modèle d'une résistance, malgré qu'il soit simple et suffisant pour certains cas d'études, il ne donne pas assez d'informations et de précision, vu que [Visacro et De Conti, 2007]:

- il n'est valable que pour les basses fréquences ; à des fréquences élevées le modèle de la résistance devient de plus en plus non-approprié et donne des résultats qui divergent de la réalité ;
- les paramètres du sol ( $\rho$ ,  $\epsilon$ ) sont liés à la fréquence ;
- l'ionisation du sol se manifeste à des courants élevés.

### **I.2. Présentation du logiciel FEMM :**

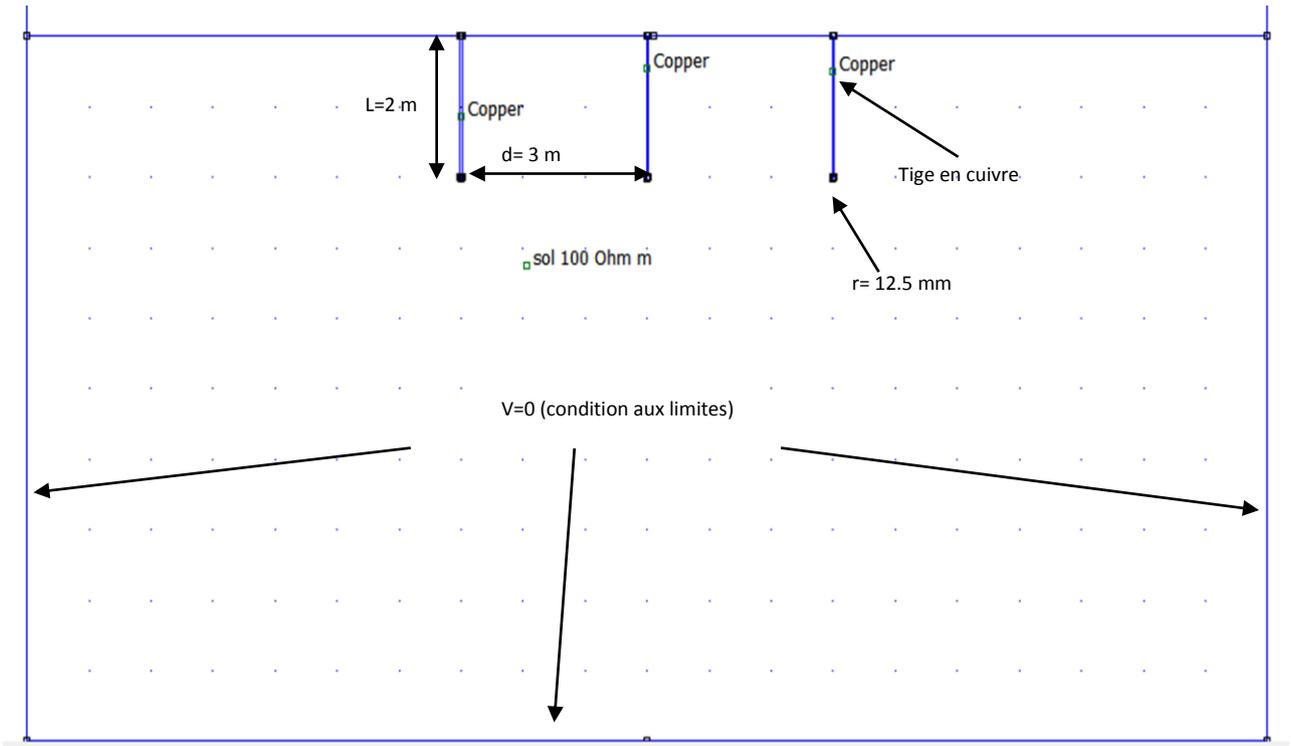
C'est un logiciel basé sur les éléments finis 2D cartésien et 2D axisymétrique dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques. Ce logiciel est destiné aux problématiques du génie électrique : ses menus utilisent le vocabulaire du domaine et il possède un ensemble de pré et de post-traitement dédié à ces problématiques (introduction de la courbe  $B(H)$  pour les matériaux magnétiques non linéaires, conditions de périodicité, calcul des pertes par effet Joule, visualisation des champs électromagnétiques, calcul de forces électromagnétiques, etc).

Il est constitué de trois modules principaux : [Teresa Gomez-Diaz, 2012]

- Un module "Pré-processeur et Post-processeur" qui permet, à travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points clefs que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au format DXF. Ce module intègre également des outils de post-traitement : visualisation et différents calculs inhérents au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc.)
- Un module de maillage (logiciel Triangle) qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.
- Un module de résolution par éléments finis : ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique linéaires et non linéaires, de magnétodynamique en régime harmonique linéaires et non linéaires et de thermique en stationnaire.

**I.3. Etude de l'impédance pour un système de trois tiges :**

J'étudie dans ce qui suit, l'impédance d'un système de mise à la terre de 3 tiges parallèles. Ces dernières sont faites en cuivre et représentées avec leurs dimensions et les conditions aux limites sur la figure I.1. je me suis intéressé à l'étude d'un tel système via son impédance, dans les basses et les hautes fréquences.



**Figure I.1 : Système de mise à la terre sous forme de 3 tiges verticales sous environnement FEMM 4.2**

**I.3.1. Basses Fréquence :**

Pour les fréquences qui ne dépassent pas la fréquence de coupure, le modèle de terre à N tiges est représenté par une résistance simple R donnée par la relation suivante [EDF, 1984] :

$$R \approx \frac{1}{N} \left[ \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left( \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{N} \right) \right] \dots \text{(I.1)}$$

Pour mon cas (3 tiges) je prends N=3 :

$$R \approx \frac{1}{3} \left[ \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6} \frac{\rho}{\pi d} \right] = \frac{\rho}{3} \left[ \frac{1}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right] \dots \text{(I.2)}$$

d : Distance entre les électrodes ;

- $\rho$  : Résistivité du sol ;
- $r$  : Rayon de l'électrode ;
- $l$  : Longueur de l'électrode ;
- $N$  : Nombre de tiges.

La résistivité est exprimée comme suit [Bernou, 2011]:

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \dots (I.3)$$

Pour un sol homogène, la résistivité ne dépendant pas de la fréquence lorsque celle-ci est basse, s'exprime comme suit:

$$\rho = \frac{E}{J} \dots (I.4)$$

- E : Champ électrique en (V/m) ;
- J : Densité volumique du courant en (A/m<sup>2</sup>).

J'ai utilisé le logiciel FEMM 4.2 pour calculer la résistance de notre système de mise à la terre à fréquence industrielle 50 Hz.

Afin de valider ce logiciel, les résultats ainsi trouvés sont comparés à celles trouvées par la relation analytique I.2. Pour cela, différentes valeurs de la résistivité du sol allant de 100 jusqu'à 2000 Ωm et trois valeurs de la permittivité relative ( $\epsilon_r=5$ ,  $\epsilon_r=15$  et  $\epsilon_r=30$ ) ont été choisies.

L'ensemble des résultats trouvés est présenté dans le tableau I.1.

$\epsilon_r=5$							
$\rho(\Omega m)$	100	200	350	1000	1500	2000	
R(Ω) par la relation I.2	17.434	34.869	61.020	174.343	261.515	348.686	
R(Ω) par le FEMM 4.2	17.434	34.868	61.022	174.288	261.503	348.248	
$\epsilon_r=15$							
$\rho(\Omega m)$	100	200	350	1000	1500	2000	
R(Ω) par la	17.434	34.869	61.020	174.343	261.515	348.686	

relation I.2						
R(Ω) par le FEMM 4.2	17.434	34.869	61.023	173.853	259.859	344.818
ε <sub>r</sub> =30						
ρ(Ωm)	100	200	350	1000	1500	2000
R(Ω) par la relation I.2	17.434	34.869	61.020	174.343	261.515	348.686
R(Ω) par le FEMM 4.2	17.434	34.869	61.023	172.409	255.107	333.944

**Tableau I.1 : Résistance analytique (relation I.2) et numérique ( FEMM).**

D'après le tableau les résultats analytiques et numériques sont pratiquement les mêmes. En effet, le modèle d'une résistance simple est suffisant pour modéliser une prise de terre pour les basses fréquences. Cependant, la résistance devient dépendante de la fréquence si cette dernière dépasse une certaine valeur dite de coupure.

**I.3.2. Hautes fréquences :**

Comme je l'ai cité auparavant, le modèle d'une résistance simple n'est plus valable pour les hautes fréquences. Dans cette section, j'étudie l'impédance du même système de mise à la terre en fonction de la fréquence. Pour cela, l'utilisation du FEMM pour le calcul de l'impédance est indispensable vue que la formule analytique I.2 n'est valable que dans les basses fréquences :

Nous avons :

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}}$$

avec  $\vec{E} = \vec{E}_n + \vec{E}_t \dots(I.5)$

et  $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_t \dots(I.6)$

Nous pouvons écrire  $\vec{E}$  et  $\vec{J}$  sous la forme complexe suivante :  $\vec{E} = |E| e^{j\theta_E} \dots(I.7)$

$$\vec{J} = |J| e^{j\theta_J} \quad \dots(I.8)$$

Dans ces conditions, l'expression de  $\rho$  devient:  $\rho = \frac{|E|}{|J|} e^{j(\theta_E - \theta_J)} \quad \dots(I.9)$

En combinant les deux relations I.2 et I.9, l'impédance de notre système peut être exprimée par :

$$|Z| = \frac{|E|}{3 \cdot |J|} \left[ \frac{1}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right] \quad \dots (I.10)$$

avec :

Z: Impédance du système de mise à la terre ( $\Omega$ ) ;

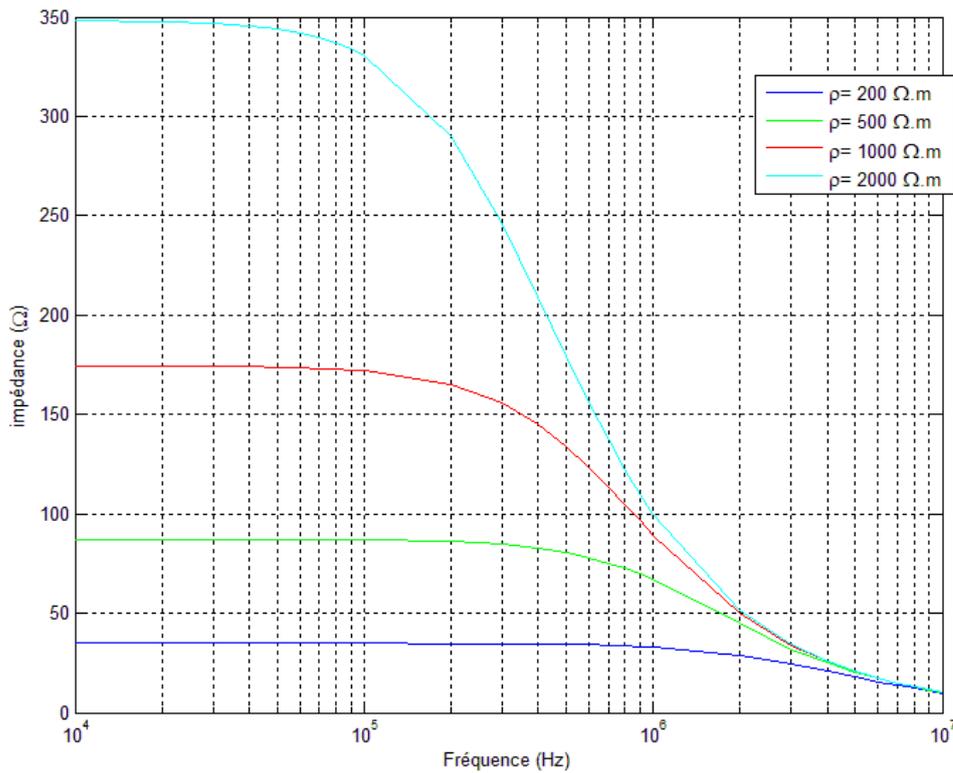
$\vec{E}$  : Vecteur champ électrique (A/m) ;

$\vec{E}_n, \vec{E}_t$  : Composantes normales et tangentielles du vecteur champs électrique  $\vec{E}$  ;

$\vec{J}$  : Vecteur densité volumique de courant ;

$\vec{J}_n, \vec{J}_t$  : Composantes normales et tangentielles du vecteur densité de courant.

Le FEMM 4.2 nous donne directement les valeurs de  $|E|$  et  $|J|$ , ce qui nous permettra de calculer l'impédance de mise à la terre (3 tiges parallèles). La figure I.2 nous montre les variations de cette impédance  $|Z|$  en fonction de la fréquence, pour des résistivités de la terre (200, 500, 1000 et 2000  $\Omega\text{m}$ ) et pour une permittivité relative  $\epsilon_r=30$



**Figure I.2 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour  $\epsilon_r=30$  et  $\rho=200, 500, 1000$  et  $2000 \Omega m$**

L'impédance  $|Z|$  augmente avec l'augmentation de la résistivité de la terre  $\rho$ . Ceci nous ramène à dire qu'il faut faire une étude des caractéristiques du sol et en particulier sa résistivité avant de dimensionner un système de mise à la terre.

Nous remarquons également, que la variation de l'impédance en fonction de la fréquence met en évidence deux phases. Durant la première correspondant aux basses fréquences, l'impédance est constante, ce qui est traduit par le comportement purement résistif du système. Dans la deuxième phase, l'impédance du système commence à diminuer à partir de la fréquence de coupure. Nous remarquons qu'à des fréquences dépassant les 10 MHz, les valeurs de l'impédance chutent jusqu'à une valeur limite d'environ 10  $\Omega$ .

La fréquence de coupure varie avec la résistivité du sol. En effet, elle diminue avec l'augmentation de la résistivité. Nous avons enregistré les fréquences de coupure de 1 MHz, 300, 100 et 20 kHz pour les résistivités 200, 500, 1000 et 2000  $\Omega m$  respectivement. Nous remarquons qu'à des fréquences dépassant les 10 MHz, les valeurs de l'impédance chutent jusqu'à une valeur faible d'environ 10  $\Omega$ .

**Discussion :**

En magnétostatique, le théorème d'Ampère lie la circulation de l'induction magnétique sur un contour fermé, et le courant I qui traverse toute surface S s'appuyant sur ce contour [M.Meyer, 2008]:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I \quad \dots(I.11)$$

Sous forme locale, la circulation de l'induction magnétique s'écrit en termes du vecteur densité de courant  $\vec{J}$  :

$$\text{rot } \vec{B} = \mu \vec{J} \quad \dots(I.12)$$

Maxwell a complété l'équation locale précédente, en introduisant le courant de déplacement  $\vec{J}_d$  de

$$\text{Maxwell : } \vec{J}_d = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

La relation III.11 devient :

$$\text{rot } \vec{B} = \mu (\vec{J} + \vec{J}_d) = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \dots(I.13)$$

En utilisant les formes sinusoïdales complexes des vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{J}_d$  tels que :  $\vec{E} = E e^{j\omega t}$  ;  
 $\vec{J}_d = J_d e^{j\omega t}$ .

$$\text{Nous aurons: } J_d e^{j\omega t} = \epsilon \frac{\partial (E e^{j\omega t})}{\partial t} \quad \dots(I.14)$$

pour un sol homogène :  $E = \rho J$

$$\text{L'équation I.14 peut s'écrire : } J_d e^{j\omega t} = \epsilon \frac{\partial (\rho J e^{j\omega t})}{\partial t} = \epsilon \rho J \frac{\partial e^{j\omega t}}{\partial t} = j\rho\epsilon\omega J e^{j\omega t} \quad \dots(I.15)$$

$$\text{Enfin, le module du courant de déplacement: } |J_d| = \rho\epsilon\omega |J| \quad \dots(I.16)$$

On sait que  $\sigma = 1/\rho$  ( $\sigma$  est la conductivité du sol) donc  $\rho\epsilon\omega = \frac{\omega\epsilon}{\sigma}$

$\sigma$ : Conductivité du sol

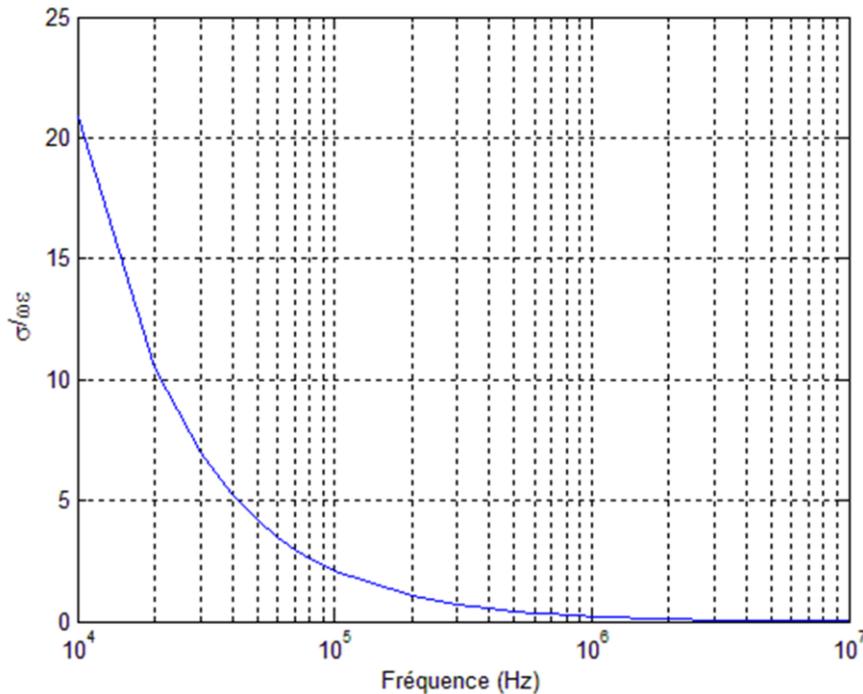
$\epsilon$  : Permittivité du sol

$\vec{J}_d$  : vecteur courant de déplacement

$\mu$  : La perméabilité du sol

$\omega$  : la pulsation du signal injecté vers les électrodes de terre

La figure I.3 représente la variation du rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  en fonction de la fréquence, pour  $\rho = 500 \Omega\text{m}$  et  $\epsilon_r = 30$ . Pour des fréquences dépassant 1MHz, le rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  devient très petit et quasiment nul. Ce qui correspond à un facteur  $\rho\epsilon\omega$  assez élevé. Dans ces conditions, le courant de déplacement est beaucoup plus important que le courant de conduction de la terre.



**Figure I.3: Variation du rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  en fonction de la fréquence, pour  $\rho = 500 \Omega\text{m}$  et  $\epsilon_r = 30$**

D'après cette figure, le rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  est inversement proportionnel en fonction de la fréquence, car la pulsation  $\omega=2\pi f$ . Pour les basses fréquences, le rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  est important. Ceci correspond à de faibles courants de déplacement. Le système de mise à la terre est modélisé par une simple résistance. Cependant, pour des fréquences assez élevées c'est-à-dire  $\omega\epsilon \approx \sigma$ , l'effet du courant de déplacement apparaît de manière évidente et devient aussi important que le courant de conduction, ce qui engendre une diminution considérable de l'impédance. Dans ces conditions, le système de mise à la terre est simulé par un circuit RC parallèle. Cette analyse a été confirmée par Visacro et De Conti [Visacro et De Conti 2007].

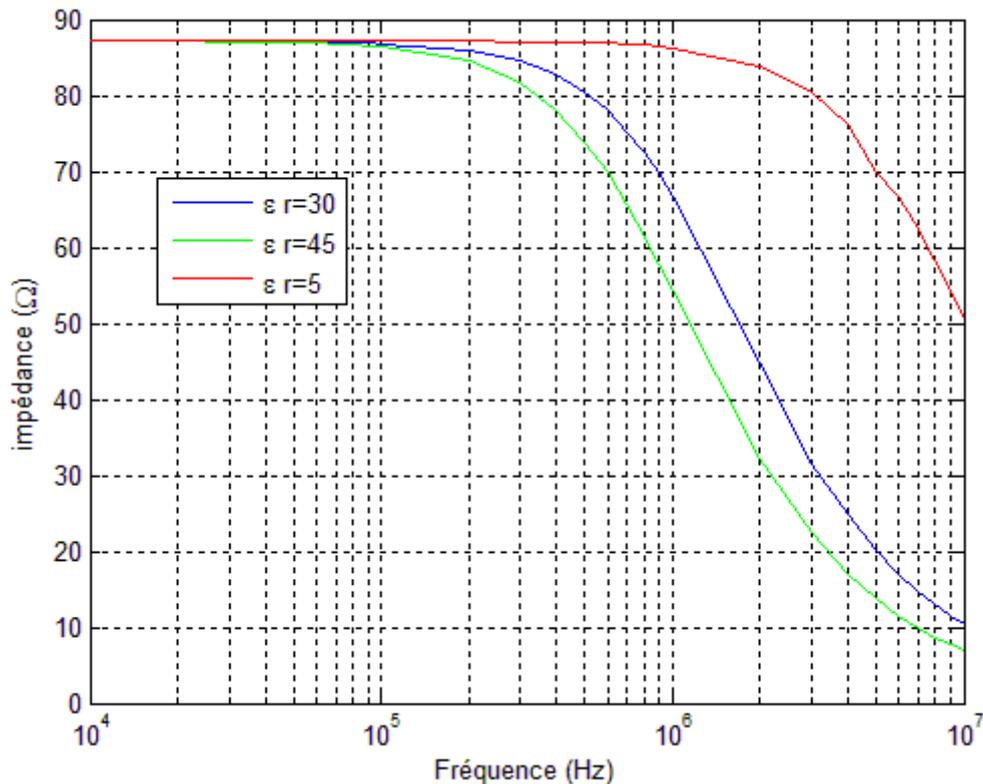
### I.3.3. Variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes permittivités :

Le rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ , considéré comme paramètre important, permet d'expliquer aussi l'évolution de l'impédance de notre système que celle de la fréquence de coupure en fonction des paramètres électriques du sol (résistivité et permittivité). Pour une résistivité du sol donnée ( $\sigma$  est fixe), Le rapport montre que le courant de déplacement augmente avec la fréquence ; l'impédance diminue en conséquence. Par ailleurs, lorsque la permittivité croît, le courant de déplacement augmente et l'impédance totale diminue.

La figure I.4 illustre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes permittivités.

Cette figure montre que l'augmentation de la permittivité relative conduit à une diminution de la fréquence de coupure. Par ailleurs, l'augmentation de la résistivité engendre une diminution du rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ . Ce qui conduit à une augmentation du courant de déplacement. Dans ces conditions, l'impédance capacitive diminue. En revanche, la résistance a augmenté avec la résistivité. L'augmentation de l'impédance totale est due au fait que l'augmentation de la résistance est plus significative que la diminution de l'impédance capacitive .

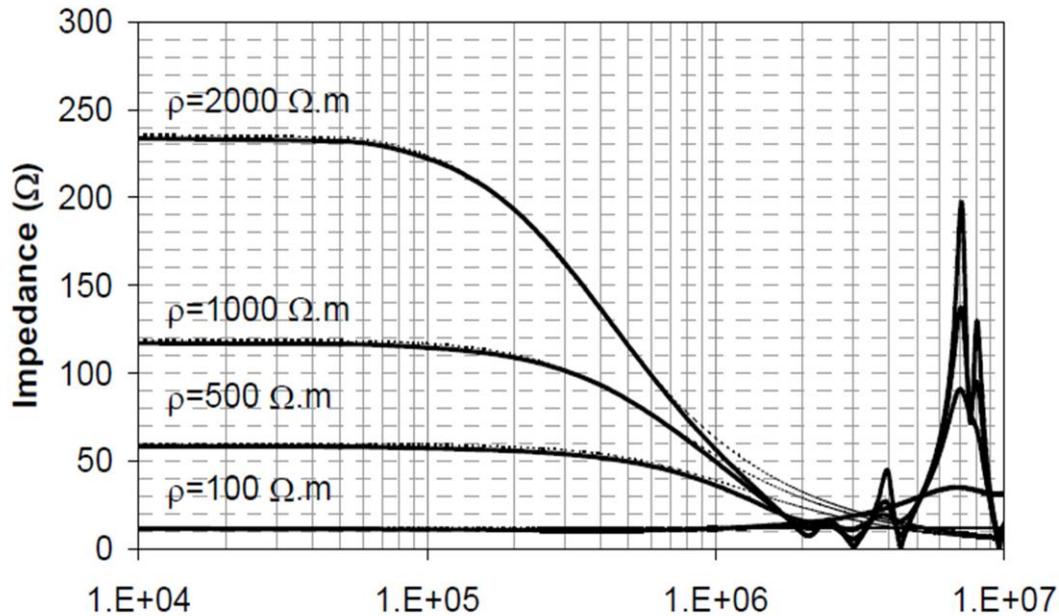
Pour une résistivité donnée, la résistance correspondante est invariante. L'augmentant des valeurs de la fréquence  $\omega$  ou de la permittivité du sol  $\epsilon$ , dans ces circonstances, entraîne la diminution du rapport  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ . Cela implique aussi une augmentation du courant de déplacement. Ce qui engendre la diminution de la capacité et par conséquent l'impédance totale diminue.



**Figure I.4 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la fréquence pour  $\rho = 500$  et  $\epsilon_r = 5, 30, 45$**

#### I.4. Limites du FEMM 4.2 :

Le logiciel FEMM 4.2 nous permet de déterminer l'impédance de mise à la terre, et de varier les paramètres du sol et du matériau utilisé. Néanmoins, les limites du FEMM apparaissent en comparant, pour le même système de terre, nos résultats avec ceux obtenus par Visacro et De Conti [2007]. Cependant, l'évolution de l'impédance en fonction de la fréquence (Figure I.5), trouvée pas ces deux auteurs, présente des pics de résonance pour les ultra fréquences dépassant les 2 MHz. De tels sont dus, selon les mêmes chercheurs, à l'effet inductif de la configuration de mise à la terre dans cette gamme de fréquence. Etant donné que ces pics n'apparaissent lors de l'utilisation du logiciel FEMM 4.2, ce dernier ne prend pas en considération ce phénomène, même pour des fréquences dépassant 5 MHz.



**Figure I.5 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la fréquence étudié par Visacro et De Conti 2007**

### I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons considéré une configuration de mise à la terre constituée de trois tiges en parallèle. Ce système est fréquemment utilisé pour la mise à la terre des parafoudres, des clôtures, etc. Nous avons étudié l'évolution de l'impédance de ce système en fonction de la fréquence, pour différentes propriétés (résistivité et permittivité) du sol, en utilisant le logiciel de simulation FEMM 4.2. Nous avons montré que pour les basses fréquences, notre système peut être assimilé à une simple résistance. Cependant, Pour les hautes fréquences, l'impédance diminue en allant vers une valeur limite. Dans ces conditions, le comportement capacitif. Ainsi, le circuit électrique équivalent est constitué par une résistance en parallèle avec une capacité.

# Chapitre 2

## Modélisation de système de trois tiges

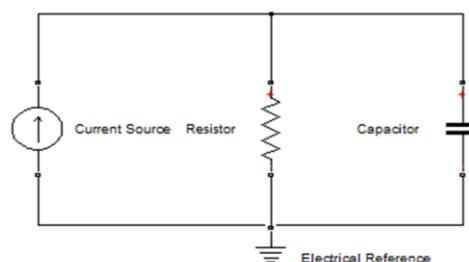
## II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions l'impédance d'un modèle de terre, sous forme de trois (3) tiges en parallèle, utilisé fréquemment pour la mise à la terre des parafoudres ou des clôtures avec mise à la terre. Nous proposons pour ce modèle un circuit RC équivalent. Ce dernier est destiné à être facile à mettre en œuvre que les modèles de terre rigoureux disponibles dans la littérature, mais suffisamment précis pour fournir des résultats raisonnables dans certaines limites. Il est également destiné à être une meilleure alternative pour l'étude des surtensions de foudre que le modèle d'une résistance simple.

## II.2. Circuit électrique équivalent :

L'étude de la variation de l'impédance nous a permis de constater qu'une simple résistance n'est pas valable à représenter réellement le système de terre pour les hautes fréquences. Ce qui revient à dire que l'impédance totale dépend de la fréquence. En effet, un circuit RC parallèle sera plus convenable comme modèle pour notre configuration de système de mise à la terre, tout en prenant en compte les considérations suivantes :

- Le domaine d'étude se limite à quelques MHz. Pour un certain niveau de fréquence, le modèle RC parallèle ne sera pas en concordance avec les résultats réels du fait du phénomène d'ionisation du sol qui apparait en ultra-fréquence.
- Malgré le fait que l'effet inductif n'apparaisse pas de manière importante en ultra-fréquence, la résistance doit être suffisamment grande de manière à limiter et neutraliser cet effet.



**Figure II.1 : Circuit RC parallèle équivalent pour la configuration 3 tiges en parallèle de mise à la terre**

L'impédance du circuit précédent s'écrit comme suit :

$$Z_{RC} = \frac{R}{1+(RC\omega)^2} - j \frac{R^2 C \omega}{1+(RC\omega)^2} \dots\dots(\text{II.1})$$

où par la forme trigonométriques :  $Z_{RC} = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}} e^{-j \cdot \arctg(RC\omega)} \dots\dots(\text{II.2})$

avec :  $|Z_{RC}| = R / \sqrt{1 + (RC\omega)^2} \dots\dots(\text{II.3})$

R : la résistance du circuit équivalent trouvée à l'aide de la formule I.2 en basses fréquences.

C : la capacité du circuit équivalent donnée par la formule [Visacro et Di Conti]

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\frac{1}{3} \left[ \frac{1}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right]} \dots\dots(\text{II.4})$$

avec  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  ( $\epsilon_0 = 8,85418782 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4$ )

Nous dressons le tableau suivant relatif aux valeurs de la résistance et de la capacité pour différentes résistivités ( $\rho = 200, 500, 1000$  et  $2000 \text{ } \Omega\text{m}$ ) et permittivités relatives ( $\epsilon_r = 5, 15, 30, 45$ ) du sol.

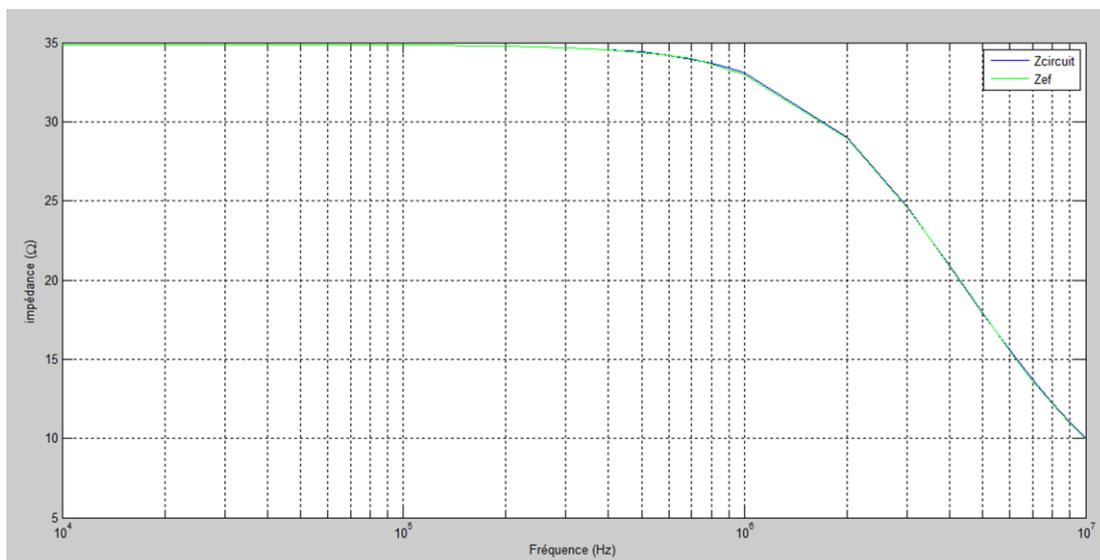
$\rho = 200 \text{ } \Omega\text{m}$				
$\epsilon_r$	5	15	30	45
R ( $\Omega$ )	35	35	35	35
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285
$\rho = 500 \text{ } \Omega\text{m}$				
$\epsilon_r$	5	15	30	45
R ( $\Omega$ )	87	87	87	87
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285
$\rho = 1000 \text{ } \Omega\text{m}$				

$\epsilon_r$	5	15	30	45
R ( $\Omega$ )	174	174	174	174
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285
$\rho=2000 \Omega\text{m}$				
$\epsilon_r$	5	15	30	45
R ( $\Omega$ )	348	348	348	348
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285

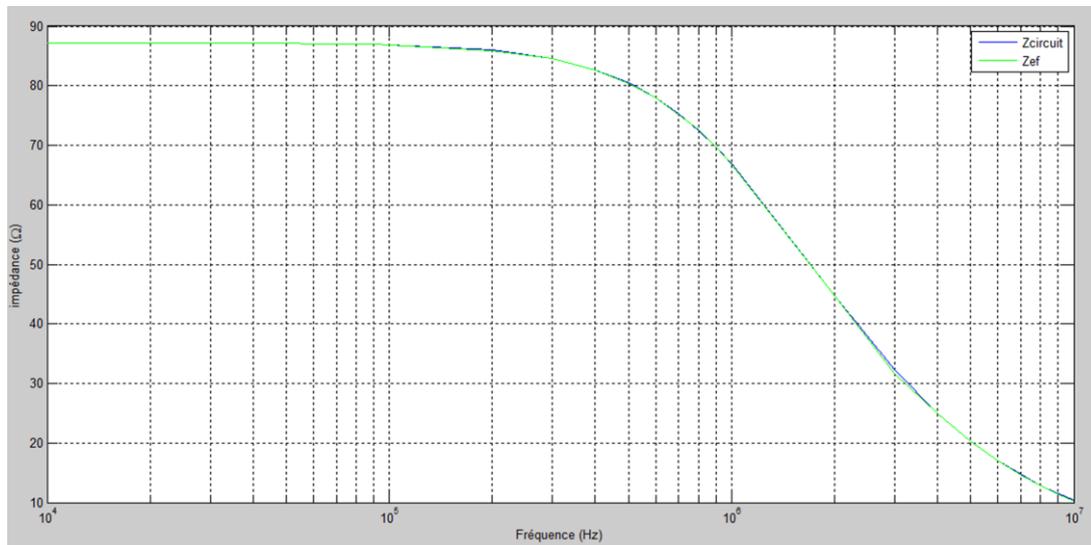
**Tableau II.1 : les valeurs de la résistance R et la capacité C du circuit électrique équivalent**

Nous remarquons que la résistance ne dépend que de la résistivité du sol et ceci de manière linéaire comme le montre la formule I.2. Quant à la capacité, elle ne varie que linéairement en fonction de la permittivité relative du sol ( $C = \frac{\rho \epsilon}{R} = \frac{\rho \epsilon_r \epsilon_0}{constane \cdot \rho} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{constane} = A \cdot \epsilon_r$ )

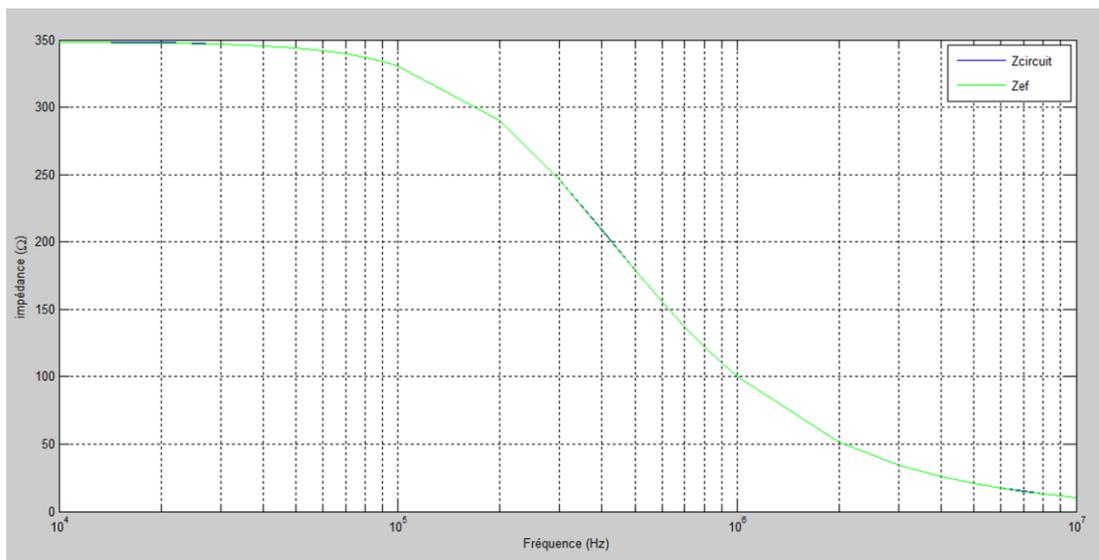
Les trois figures II.2.a, II.2.b, II.2.c présentent les caractéristiques relatives à l'évolution de l'impédance de la terre en fonction de la fréquence trouvée en se basant le modèle RC proposé, et celle déterminée via le FEMM, respectivement pour les résistivités du sol de 200, 500 et 2000  $\Omega\text{m}$ . Etant donné que les courbes sont confondues, le modèle RC est bien valide et convenable pour représenter la configuration de notre système de mise à la terre (3 tiges en parallèle).



(a) :  $\rho=200 \Omega\text{m}$



(b) :  $\rho=500 \Omega\text{m}$



(c):  $\rho=2000 \Omega\text{m}$

**Figure II.2 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM  $Z_{\text{ef}}$  et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent  $Z_{\text{circuit}}$**

### II.3. Choc de foudre :

#### II.3.1. Choc de foudre généralisé :

La foudre est un phénomène perturbant de manière considérable le fonctionnement de toutes les installations électriques :

- Les différents niveaux de puissance et de tension sont concernés : du transport d'énergie THT jusqu'aux circuits intégrés en passant par les alimentations BT et les transmissions de données et les configurations des mises à la terre.
- Elle peut être à l'origine de perturbations momentanées du service et de la qualité des alimentations.
  - Elle peut causer des destructions de matériels, et en conséquence de longues interruptions du service.
  - Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre). [Benoît de Metz-Noblat, 1993]

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Cette foudre génère une surtension importante.

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé. Plusieurs décharges secondaires apparaissent après la décharge principale à environ de 100 ms.

- L'amplitude des courants des CdF (Coups de Foudre) positifs peut être considérable, supérieure à 150 kA dans 10% des cas. Dans 50% des cas, l'intensité du courant est de 25 kA.

- L'amplitude des CdF négatifs est moins grande. Dans 10% des cas, elle est de l'ordre de 50 kA.

Dans

50% des cas, l'intensité des CdF négatifs est de 18 kA [A.Tilmatine, 1999].

### **II.3.2. Onde de foudre :**

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. La forme d'onde réelle est très variable (Figure II.3). Elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microsecondes à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes. Le domaine spectral associé s'étend dans une bande de 10 kHz à plusieurs MHz) [Benoît de Metz-Noblat, 1993].

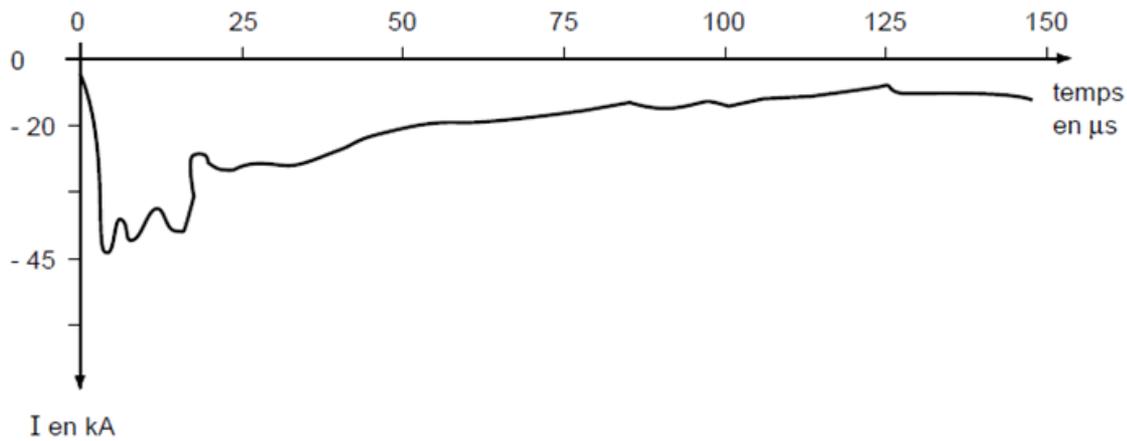


Figure II.3: oscillogramme d'un courant de foudre

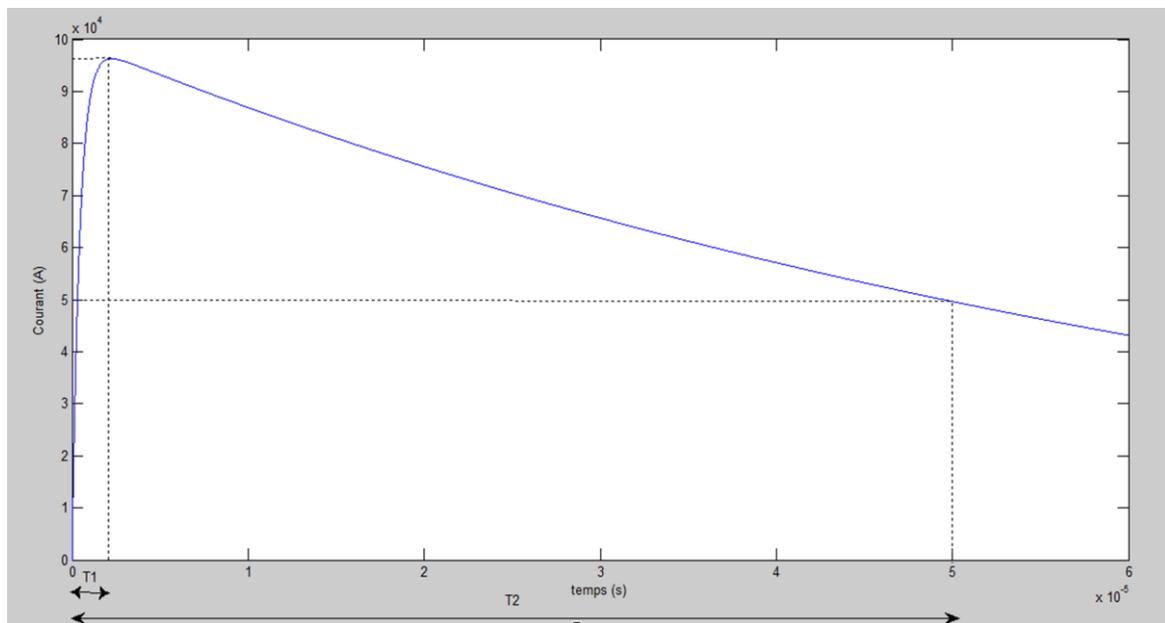
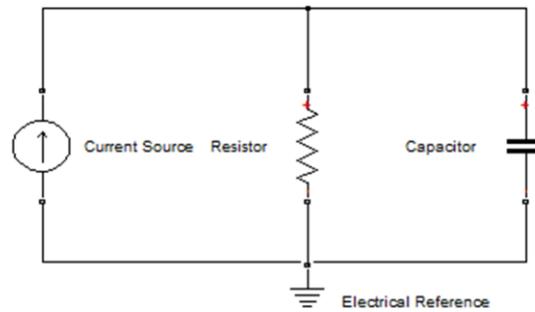


Figure II.4: Onde de courant 1.2/50 µs

### II.3.3. La tension de sortie du circuit soumis à une onde de courant de foudre :

Dans le but d'étudier le comportement du circuit RC parallèle équivalent (Figure II.5) que nous avons proposé, nous lui injectons une onde de courant de foudre 1.2/50 µs de valeur de crête égale à 100 kA (Figure II.4). Nous reproduisons et étudions l'évolution de la tension. Pour cela, nous fixons dans le premier cas, la permittivité et faisons varier la résistivité. Dans le deuxième cas, nous fixons la résistivité et faisons varier la permittivité.



**Figure II.5 : Circuit RC parallèle équivalent pour la configuration 3 tiges en parallèle de mise à la terre**

En écrivant les équations de maille de ce circuit, la tension  $V$  aux bornes de la résistance (identique à celle aux bornes de la capacité) s'écrit comme suit :

$$V = R \cdot i_r = R (i - i_c) \text{ avec } i_c = C \frac{dV}{dt}$$

$$\text{donc } V = Ri - RC \frac{dV}{dt}$$

$$\text{D'où: } \dot{V} = -\frac{1}{RC} V + \frac{1}{C} I \quad \dots \text{(II.5)}$$

Il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre de la forme :  $\dot{X} = aX + bU$ . Elle a comme solution :

$$X = X_0 e^{at} + \int_0^t b U(\tau) e^{a(t-\tau)} d\tau$$

avec:  $X_0$  : valeur initiale

$$\text{Dans notre cas : } X = V ; a = -\frac{1}{RC} ; b = \frac{1}{C} ; U = I$$

$$\text{avec : } I = \eta I_0 \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \text{ et } T_1 \approx 2,7 \cdot \tau_1 \text{ et } T_2 \approx 0,7 \cdot \tau_2$$

$$\text{Par conséquent: } I = I_0 \left( e^{-\frac{0,7 t}{T_2}} - e^{-\frac{2,7 t}{T_1}} \right)$$

Sachant que:  $V_0 = V(t=0) = 0$

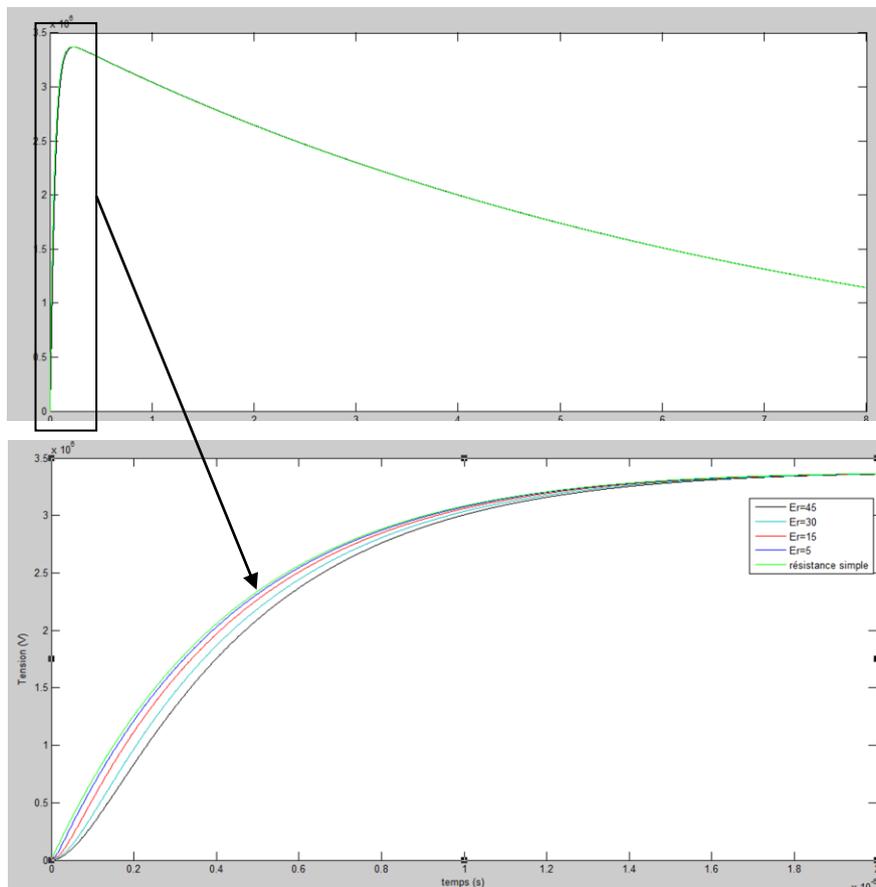
En tenant compte de la condition initiale précédente, la solution de l'équation II.5 devient:

$$V = \int_0^t \frac{1}{C} I_0 \left( e^{-\frac{0.7t}{T_2}} - e^{-\frac{2.7t}{T_1}} \right) e^{-\frac{1}{RC}(t-\tau)} d\tau$$

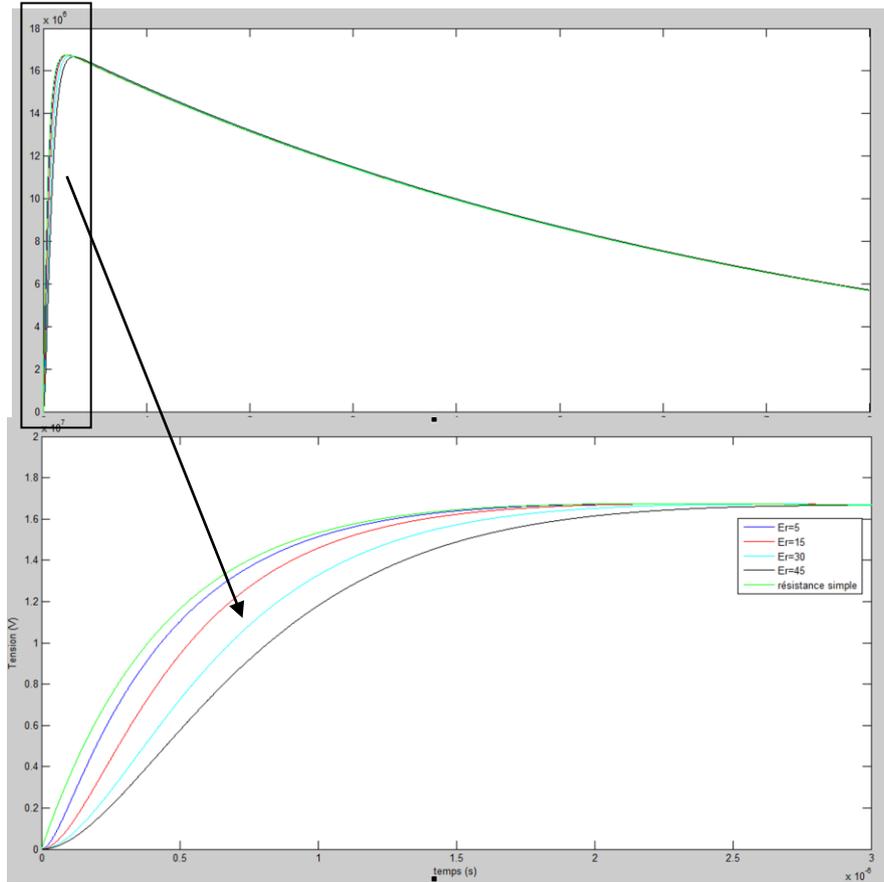
finalement :

$$V = \frac{1}{C} I_0 \left[ \frac{1}{-\frac{0.7}{T_2} + \frac{1}{RC}} e^{-\frac{0.7}{T_2}t} - \frac{1}{-\frac{2.7}{T_1} + \frac{1}{RC}} e^{-\frac{2.7}{T_1}t} - \left( \frac{-\frac{0.7}{T_2} + \frac{2.7}{T_1}}{\left(-\frac{2.7}{T_1} + \frac{1}{RC}\right)\left(-\frac{0.7}{T_2} + \frac{1}{RC}\right)} \right) e^{-\frac{1}{RC}t} \right] \dots (II.6)$$

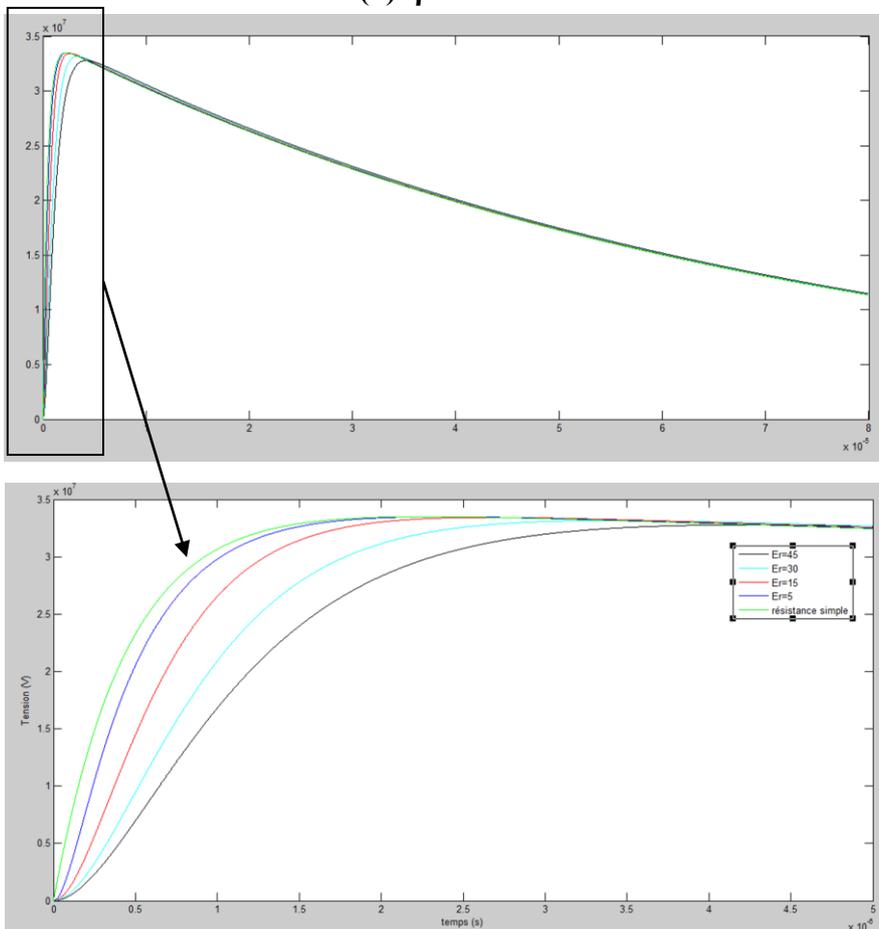
A partir des valeurs de la résistance et de la capacité présentées dans le tableau II.1, nous avons calculé la tension  $V$  en utilisant la formule précédente. Les figures II.6.a, II.6.b, II.6.c illustrent la variation temporelle de la tension de sortie  $V$ , pour différentes résistivités et permittivités.



(a) :  $\rho = 200 \Omega m$



(b):  $\rho = 1000 \Omega m$



(c) :  $\rho = 2000 \Omega m$

**Figure II.5: Variation de la tension de sortie du circuit équivalent RC parallèle pour différentes permittivités du sol**

Ces graphes montrent que la réponse du circuit RC à une onde de foudre suit pratiquement la même allure que l'onde elle-même (somme de deux exponentiels). Pour une résistivité donnée du sol, la tension de sortie augmente avec la diminution de la permittivité. Comme nous l'avons cité auparavant, la capacité  $C$  dépend de la permittivité du sol. A cet effet, varier la permittivité du sol revient à varier la capacité du circuit équivalent. La tension de sortie, dépendant de cette capacité, varie en conséquence.

En outre, la tension de sortie est plus grande pour les grandes résistivités. Notons une tension maximale de 3.4 MV pour  $\rho=200$ , 16.7 MV pour  $\rho=1000$  et 34 MV pour  $\rho=2000$ .

La tension de sortie varie beaucoup plus avec la résistivité qu'avec la permittivité. En effet, la variation en fonction de la permittivité n'est remarquable que dans un intervalle de temps très petit.

**II.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons considéré une configuration de mise à la terre constituée de trois tiges en parallèle utilisé. Ce système est fréquemment utilisé pour la mise à la terre des parafoudres, des clôtures, etc. Nous avons étudié l'évolution de l'impédance de ce système en fonction de la fréquence, pour différentes propriétés (résistivité et permittivité) du sol, en utilisant le logiciel de simulation FEMM 4.2. Nous avons montré que pour les basses fréquences, notre système peut être assimilé à une simple résistance. Cependant, ce modèle n'est plus valable dans les hautes fréquences. Nous avons opté donc pour un circuit équivalent composé d'une résistance et d'une capacité en parallèle. Ce circuit représente parfaitement le système de terre, du fait qu'il nous a permis de trouver des impédances identiques à celles obtenues en utilisant le FEMM 4.2. Nous avons injecté une onde de courant de foudre normalisée à ce circuit et récupéré à la sortie la tension aux bornes de la résistance et/ou la capacité. Cette tension dépend des caractéristiques (la résistivité et la permittivité du sol) du sol. Cependant, elle est affectée beaucoup plus par la résistivité que par la permittivité.

# Chapitre 3

Effet des paramètres  
géométriques liés aux  
trois tiges de terre  
parallèles

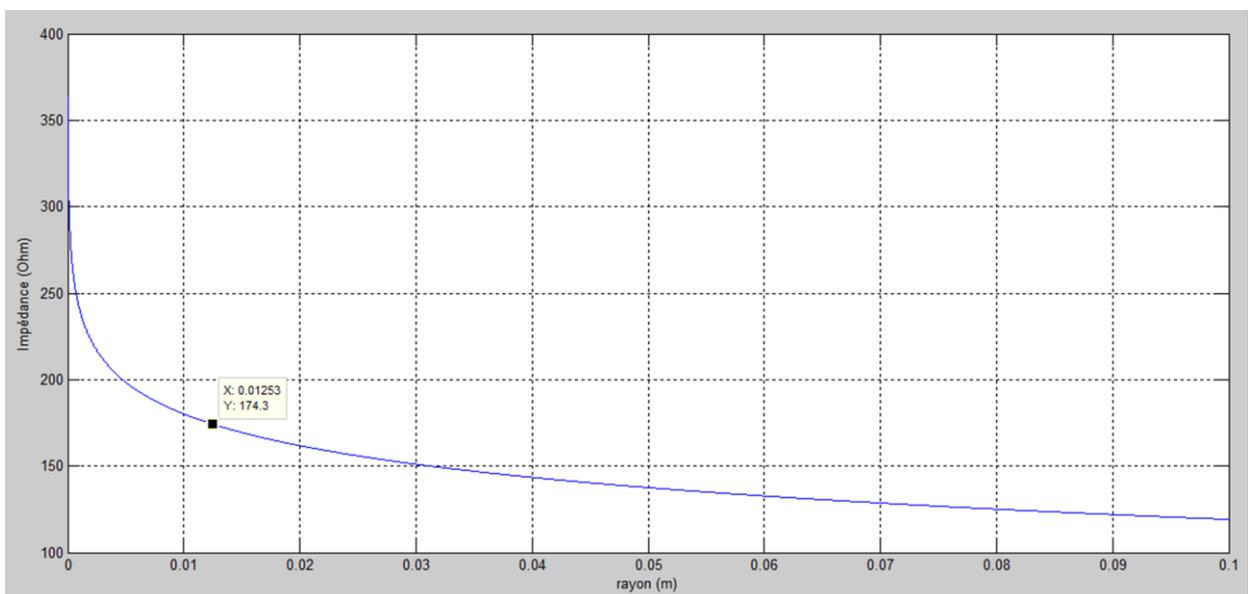
### III.1. Introduction :

L'impédance du système de mise à la terre dépend de la nature du sol (la résistivité et la permittivité du sol) et de la fréquence de l'onde de courant. Avant de concevoir un réseau de terre et en particulier une prise de terre, il faut étudier les paramètres du sol et choisir un modèle de mise à la terre convenable à ce sol en tenant compte bien sûr des contraintes technico-économiques. Enfin déterminer les dimensions et les matériaux nécessaires pour sa conception.

Dans ce chapitre nous considérons le même modèle de mise à la terre de 3 tiges parallèles que nous avons étudié dans le 2<sup>ème</sup> chapitre en prenant un sol homogène. Nous analysons le comportement de son impédance en fonction des dimensions de système de terre en question. Nous étudions aussi le comportement de ce modèle face à un choc de foudre en proposant un circuit électrique équivalent comme c'était le cas pour le chapitre précédent. Il s'agit plus particulièrement d'examiner la variation de la tension de sortie en fonction des dimensions.

### III.2. Impédance en fonction du rayon :

La figure IV.3 illustre la variation de l'impédance en fonction du rayon de l'électrode. Pour cela, la fréquence a été fixée à 50 Hz (fréquence industrielle).



**Figure III.1: Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction du rayon de l'électrode pour  $\rho=1000 \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r=30$**

Avec l'augmentation du rayon, l'impédance du système de terre diminue rapidement pour les rayons appartenant à l'intervalle [0,20] mm, et lentement ailleurs en tendant vers un palier

constant. Cette caractéristique met en évidence un rayon limite à ne pas dépasser pour lequel l'impédance du système demeure pratiquement constante.

### III.3. Circuit électrique équivalent :

Nous proposons pour ce modèle de mise à la terre (3 tiges en parallèle) le même circuit électrique équivalent utilisé dans le chapitre 2. Il s'agit d'une résistance en parallèle avec une capacité comme le montre la figure

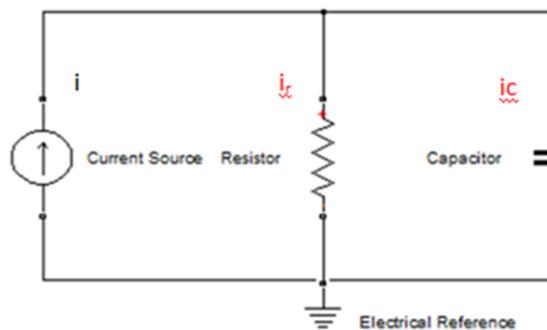


Figure III.2 : Circuit électrique équivalent

#### III.3.1. Comportement du circuit électrique équivalent suite à un choc de foudre :

Pour étudier un tel comportement nous générons une onde de foudre normalisée à front très rapide (1.2/50  $\mu$ s) dans le circuit électrique équivalent. La valeur crête de ce courant 100 kA. La forme de l'onde est montrée sur la figure III.3.

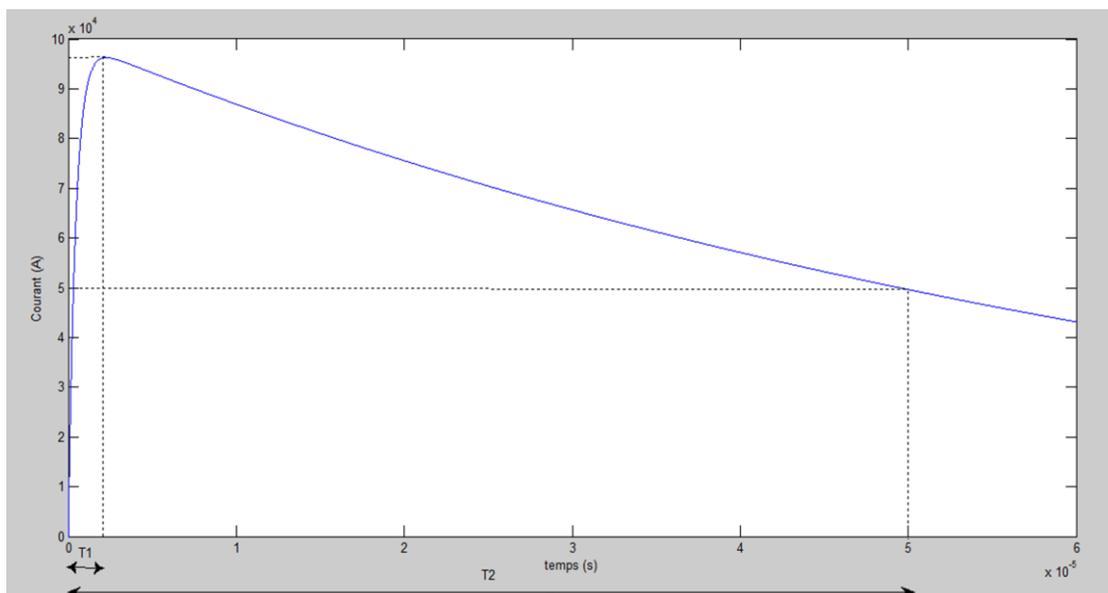
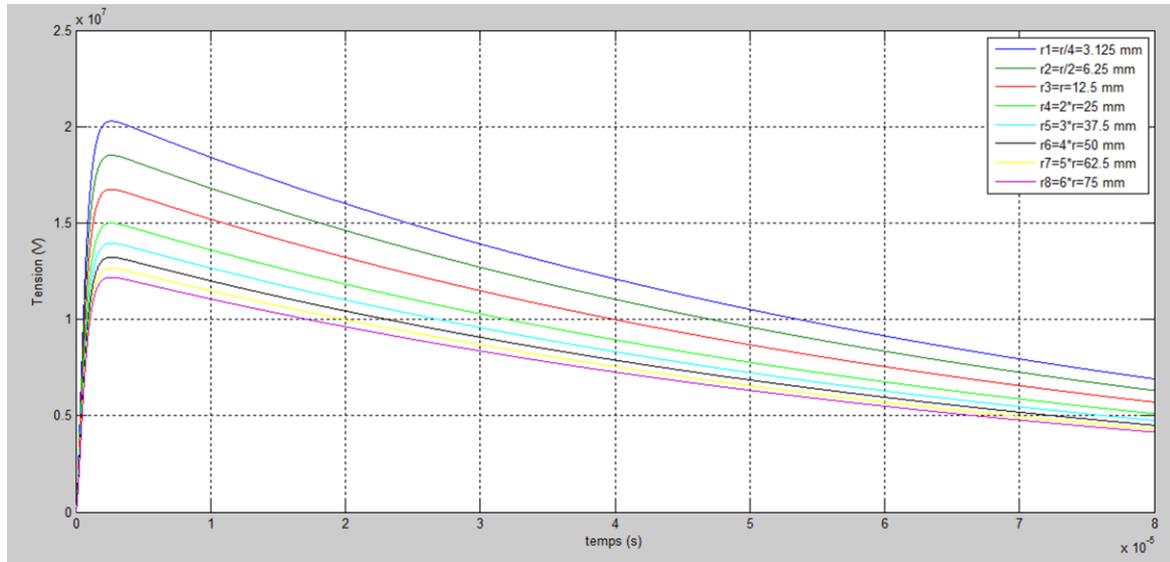


Figure III.3 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50  $\mu$ s

La variation temporelle de la tension de sortie du circuit électrique aux bornes de la résistance R ou la capacité C est montrée sur la figure III.4 pour différents rayons de l'électrode de terre.



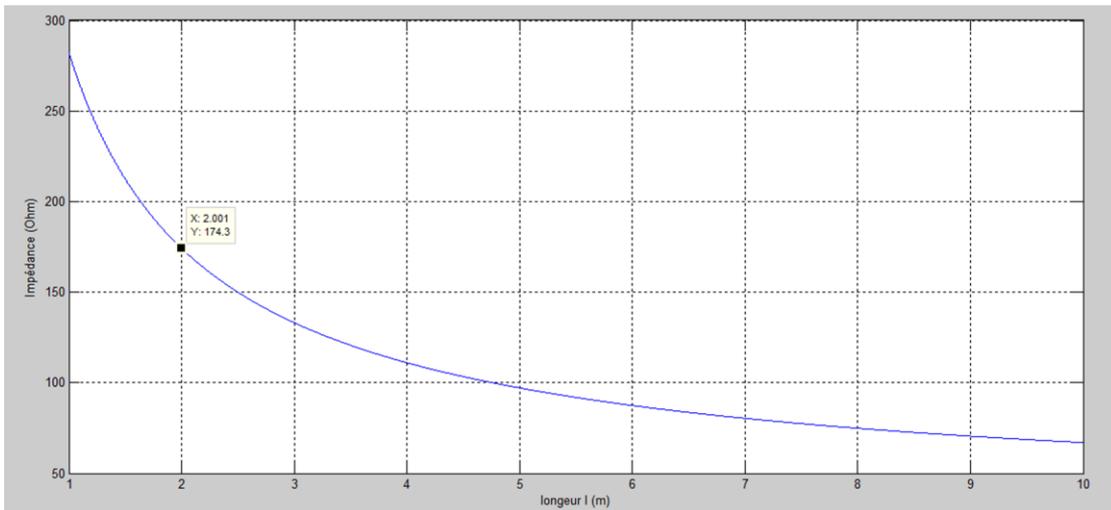
**Figure III.4 : Variation temporelle de la tension de sortie du circuit équivalent pour différents rayons de l'électrode**

D'après la figure III.4 et pour un même rayon de l'électrode de terre la forme de l'onde de foudre a été conservée. La tension de sortie du circuit électrique équivalent possède une variation similaire que celle de l'impédance en fonction du rayon de l'électrode de terre. En effet la tension diminue avec l'augmentation du rayon. A titre d'exemple, la tension maximale est de l'ordre de 20 MV pour un rayon  $r=3,125$  mm, et de l'ordre de 12 MV pour un rayon  $r=75$  mm.

### III.4. Effet de la longueur des tiges :

#### III.4.1. Impédance en fonction de la longueur des tiges :

Pour la fréquence industrielle 50 Hz, la variation de l'impédance de 3 tiges en parallèle en fonction de la longueur est donnée à la figure IV.12. L'impédance de mise à la terre diminue avec l'augmentation de la longueur des tiges de façon hyperbolique. En effet, la diminution est accentuée pour les longueurs entre 1 et 4 mètres ; elle passe de  $280 \Omega$  pour  $l=1$  m à  $133 \Omega$  pour  $l=3$  m (soit un écart de  $147 \Omega$  pour une différence de 2 mètre de longueur). Au-delà de 4 mètres, la diminution devient de plus en plus lente. L'impédance passe, par exemple, de  $133 \Omega$  pour  $l=3$  m à  $97 \Omega$  pour  $l=5$  m (soit un écart de  $36 \Omega$  pour une différence de 2 mètres de longueur). Cela explique l'écart entre les différentes courbes de l'impédance en fonction de la fréquence, qui devient de plus en plus étroit lorsque la longueur des tiges augmente.



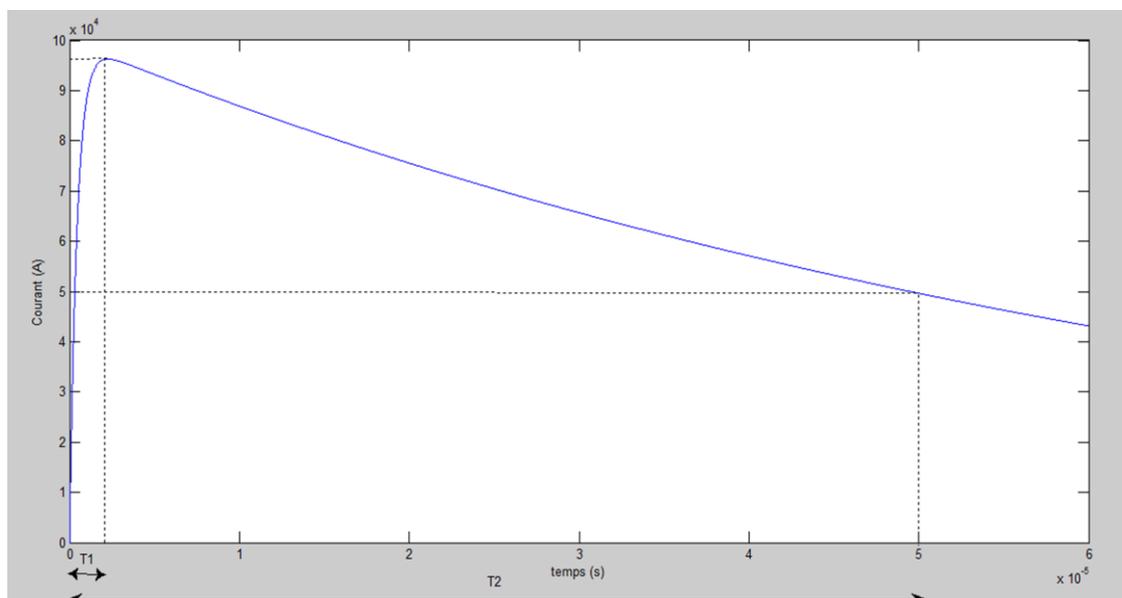
**Figure III.5 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la longueur des tiges pour  $\rho=1000 \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r=30$**

### III.4.2. Circuit électrique équivalent :

Un circuit analogue à celui proposé précédemment est adopté pour le système de mise à la terre lorsque la longueur des tiges parallèles varie. Ce circuit est composé d'une résistance R en parallèle avec une capacité C. Nous conservons, à cet effet, les expressions III.1 et III.19 pour la détermination des éléments électriques R et C du même circuit.

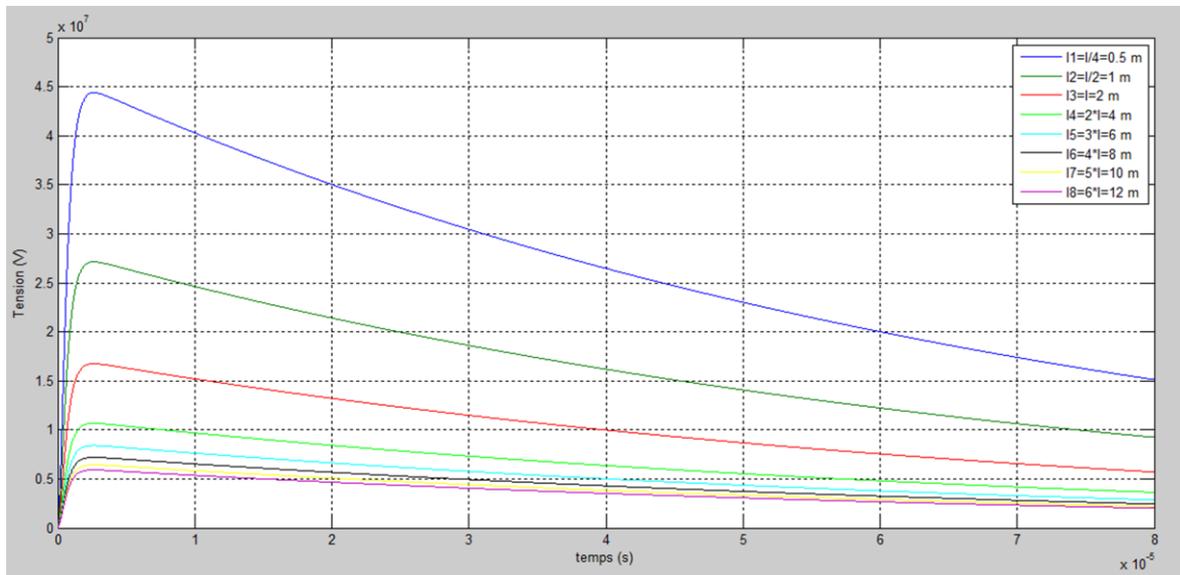
Au circuit électrique équivalent précédemment proposé, nous injectons une onde de courant de choc de foudre normalisée à front très rapide ( $1.2/50 \mu\text{s}$ ) ayant une amplitude (valeur crête) de 100 kA. Une telle opération, permet la détermination de la tension de sortie du circuit électrique.

L'onde de courant injectée est illustrée sur la figure IV.17 suivante :



**Figure III.6 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide  $1.2/50 \mu\text{s}$**

Ainsi, l'évolution temporelle de la tension de sortie aux bornes de la résistance R ou bien la capacité C (du moment que R et C sont en parallèle) du circuit équivalent, pour des différentes longueurs des tiges est montrée sur la figure III.7. Cette évolution temporelle reflète l'onde de la tension de sortie.



**Figure III.7 : La tension de sortie du circuit équivalent pour des différentes valeurs de la longueur des tiges pour  $\rho=1000 \Omega\text{m}$  et  $\epsilon_r=30$**

Pour un temps donné, la tension de sortie diminue avec l'augmentation de la longueur des tiges.

Sur la figure précédente, nous lisons une valeur de crête de 45 MV pour la plus faible longueur  $l=0.5$  m et 6 MV pour la plus grande longueur  $l=12$  m.

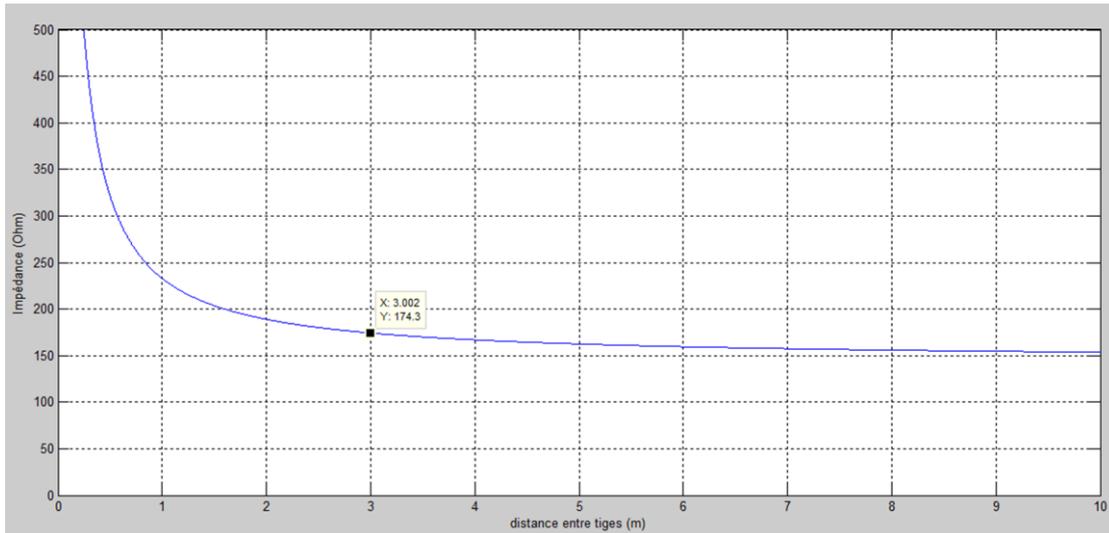
De même que la variation de l'impédance en fonction de la longueur des tiges, l'écart entre les caractéristiques temporelles de la tension, devient de plus en plus étroit quand la longueur augmente. Ceci est évident vu la relation entre les deux grandeurs électriques précédentes:

$$V = |Z_{RC}| \cdot I.$$

### III.5. Effet de la distance inter-tiges :

#### III.5.1. Impédance en fonction de la distance:

La figure III.8 représente la variation de l'impédance en fonction de la distance inter-tiges pour la fréquence industrielle 50 Hz. D'après la caractéristique, l'impédance du système de mise à la terre diminue rapidement en fonction de la distance dans l'intervalle  $[0,2]$  m. Cependant La diminution devient lente pour les distances qui dépassent 2 m. L'impédance tend vers une limite quand la longueur augmente excessivement.

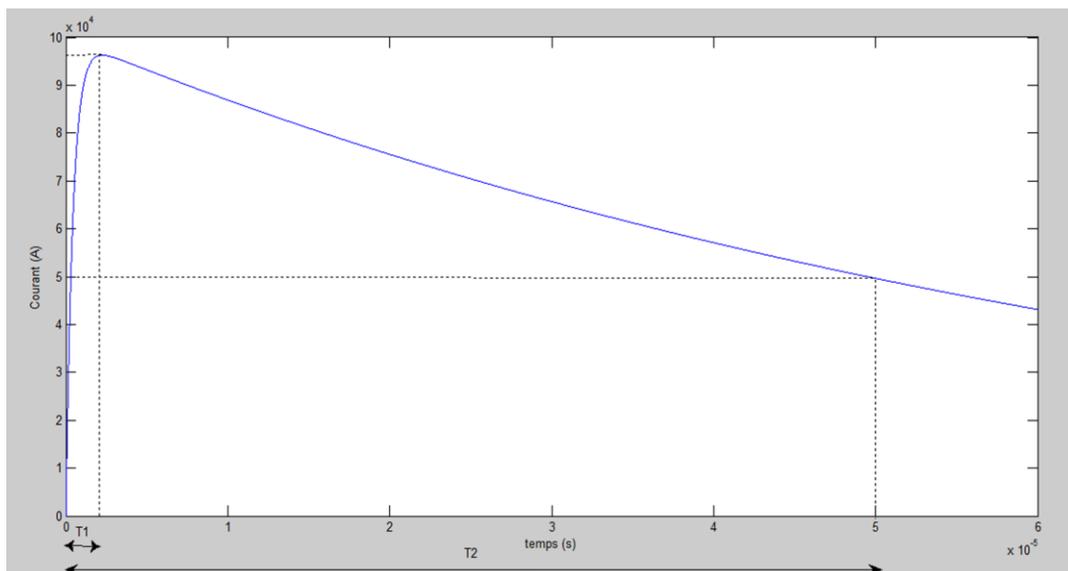


**Figure III.8 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la distance entre les tiges pour  $\rho=1000 \Omega m$ ,  $\epsilon_r=30$  et  $f=50 \text{ Hz}$**

### III.5.2. Circuit électrique équivalent :

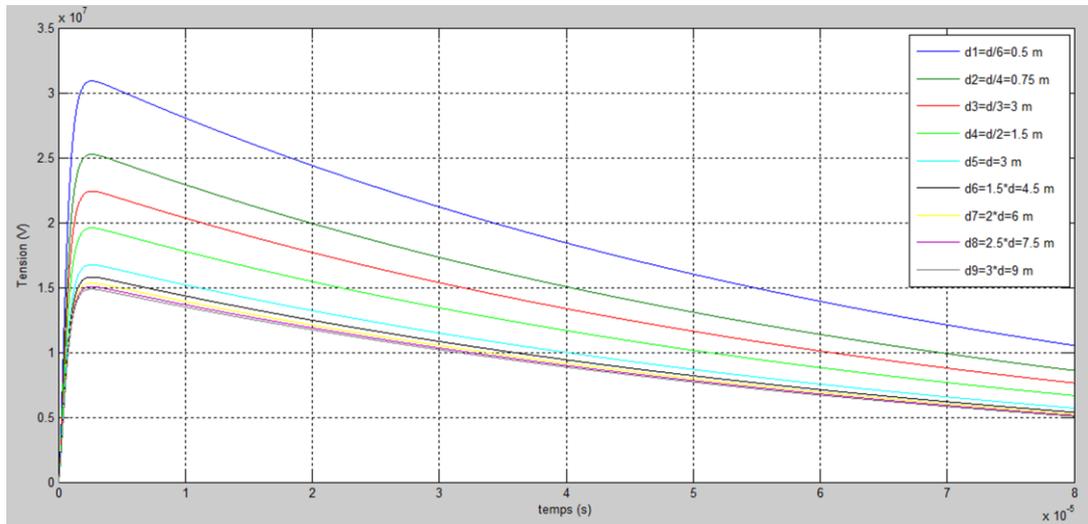
La variation de l'impédance en fonction de la fréquence nous emmène à proposer un circuit électrique équivalent valable pour modéliser notre système de mise à la terre (3 tiges parallèles). Ce circuit n'est qu'une mise en parallèle d'une résistance R avec une capacité C.

Nous passons à l'étude du comportement du système de terre ainsi modélisé face à un choc de foudre. Nous injectons en effet, une onde de courant à ce circuit. Il s'agit d'une onde normalisée à front très rapide (1.2/50  $\mu s$ ), et une valeur de crête de 100 kA, comme le montre la figure III.9.



**Figure III.9 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50  $\mu s$**

Nous déterminons ensuite, la variation temporelle de la tension de sortie du circuit équivalent aux bornes de la résistance R ou de la capacité C pour différentes distance inter-tiges d (figure III.10).



**Figure III.10 : La tension de sortie du circuit équivalent pour différentes valeurs de distance pour  $\rho=1000 \Omega\text{m}$  et  $\epsilon_r=30$**

La figure précédente montre que nous obtenons des variations temporelles de la tension de sortie sous forme d'ondes. Pour un instant donné, ces tensions diminuent avec l'augmentation de la distance inter-tiges. Notons à titre d'exemple, une valeur de crête de 31 MV pour une distance  $d=0,5$  et de 15 MV pour  $d=9$  m.

En outre, l'écart entre les courbes est de plus en plus faible quand la distance d atteint des valeurs assez grandes. Par exemple, nous notons une différence de 6 MV de tension maximale entre les deux premières courbes ( $d_1=0,5$  et  $d_2=0,75$  m) et une différence de 0,6 MV entre les deux dernières courbes ( $d_8=7,5$  m et  $d_9=9$  m).

Il est judicieux d'agir sur la distance inter-tiges que sur les dimensions des tiges, pour diminuer la tension en cas d'un défaut de court-circuit ou un choc de foudre ou de manœuvre. Ce qui représente un avantage économique énorme.

### **III.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons analysé l'impédance du système de terre constitué de 3 tiges en parallèle, en fonction de la fréquence, sous divers paramètres électro-géométriques. Ces derniers consistent en le rayon et la longueur des tiges, et la distance inter-tiges.

L'impédance du système de terre diminue avec l'augmentation du rayon, de la longueur et de la distance inter-tiges. Cette diminution est brusque dans les intervalles [0,20] mm, [0,4] m et [0,2] m respectivement. En dehors de ces intervalles, la diminution devient de plus en plus lente en tendant vers un palier constant.

Le système de terre étudié peut être modélisé par une simple résistance, pour les basses fréquences. Nous rajoutons à cette résistance, une capacité en parallèle, dans le cas des hautes fréquences.

La variation temporelle de la tension de sortie du circuit électrique équivalent obtenue, suite à une injection d'une onde de courant de foudre normalisée, est similaire à celle de l'impédance en fonction des paramètres électro-géométriques relatifs aux tiges susmentionnés.

# Conclusion générale

### Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement de l'impédance des systèmes de mise à la terre, constitués des trois tiges en parallèle, en fonction de divers paramètres électro-géométriques. Ces derniers consistent en le rayon et la longueur des tiges, la distance entre elles, la résistivité et la permittivité de sol et la fréquence de l'onde à écouler à la terre. Cette impédance a été déterminée en utilisant le code de calcul FEMM 4.2, et comparée à celle déduite du circuit électrique équivalent proposé. Ce dernier a été utilisé pour la reproduction de l'onde de la tension de sortie lors de l'application d'un choc de courant de foudre normalisé.

Les principales conclusions retenues pour le système de terre placés dans un sol homogène sont les suivantes :

- ✓ Pour les basses fréquences (cas de la fréquence industrielle 50 Hz), la résistance de mise à la terre obtenue en utilisant le FEMM 4.2 pour une fréquence de 50 Hz coïncide parfaitement avec celle calculées à partir des formules données dans la littérature. Ceci permet non seulement de valider le FEMM 4.2.
- ✓ L'impédance équivalente est constante pour les basses fréquences inférieure à celle de coupure. Dans ce cas là, le système de terre est modélisé par une simple résistance. Pour les hautes fréquences, l'impédance diminue en allant vers une valeur limite. Dans ces conditions, le comportement capacitif. Ainsi, le circuit électrique équivalent est constitué par une résistance en parallèle avec une capacité.
- ✓ Une bonne concordance a été obtenue en comparant les valeurs de l'impédance déduites à partir du circuit électriques équivalent à celle obtenues en utilisant le FEMM 4.2 vis-à-vis des paramètres électro-géométriques considérés.
- ✓ L'impédance du système dépend des caractéristiques électriques (résistivité et permittivité) du sol. L'impédance augmente avec la résistivité. Par ailleurs, la permittivité n'affecte l'impédance qu'au-delà de la fréquence de coupure. Dans ces conditions, l'augmentation de la permittivité engendre une diminution de l'impédance.

Quant au système de trois tiges parallèle placées dans un sol homogène, l'impédance diminue brusquement avec l'augmentation du rayon et de la longueur des tiges, ainsi que de la distance inter-tiges, dans les intervalles [0,20] mm, [0,4] m et [0,2] m respectivement, et lentement ailleurs. Sur le plan économique, il serait préférable d'agir sur la distance inter-tiges au lieu de changer le rayon et/ou la longueur pour diminuer l'impédance. Ceci nous permet d'éviter de changer les tiges, ou d'ajouter une quantité de matière.

## **Bibliographie :**

A.Tilmatine, « Cours de techniques de la Haute Tension ; Chapitre 5 : La foudre », Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Djillali Liabes, 1999.

Bernou A., « Caractéristiques des systèmes de mise à la terre des installations HT utilisant CYMGRD et FEMM ; Proposition d'un circuit électrique dans le cas des hautes fréquences » Thèse de Magister en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2011.

EDF (Electricité De France), « Principes de conception et de réalisation des mises à la terre », Electricité de France, Centre de Normalisation, H 115, Janvier 1984.

M.Meyer, « Licence de sciences physiques 1<sup>ère</sup> année U.E. physique 1.1 », cours d'électromagnétisme 1, Université de la Nouvelle Calédonie, 2008.

Nzuru N. J. P., « Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales », Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.

Visacro S. & De Conti A., « A simplified model to represent typical grounding configurations applied in medium voltage and low voltage distribution lines », IX International Symposium on Lightning Protection, Federal University of Minas Gerais, Lightning Research Center, Brazil, November 2007.

Violaine Louvet. Teresa Gomez-Diaz l'a reprise en mai 2012., « **PROMOUVOIR LES LOGICIELS UTILES MAITRISES ET ECONOMIQUE** dans l'enseignement supérieur et la recherche » ; PLUME, mai 2012. Site internet : <https://www.projet-plume.org/fiche/femm>.