



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



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**BOUCHENAK Hocine**

Intitulé

# Effet du type du sol sur le comportement d'un système de mise à la terre

Directeur du mémoire :

M.Tegaur                      Professeur                      ENP

Membres du jury :

S.Mekhtoub (président)	Professeur	ENP
R.Ibtiouen	Professeur	ENP
O.Touhami	Professeur	ENP

**ENP 2013**

## **Remerciement**

*Je remercie Dieu de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.*

*Je tiens à remercier Mr Tégua Madjid pour sa totale disponibilité, ses conseils et son suivi constant.*

*J'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants Mrs Rachid Ibtouen, Omar Touhami et Saïd Mekhtoub d'avoir voulu examiner mon travail, ainsi que tous les enseignants qui m'ont, de près ou de loin, soutenu et orienté durant ma carrière d'étudiant.*

*Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

## الملخص:

هذا العمل يتلخص في تحليل تغيرات الممانعة الكهربائية انظام تأريضي وهو عبارة عن قضيب أرضي عمودي. عوامل كهربائية (مقاومية و سماحية الأرض) و أخذنا نوعين مختلفين من الأرضيات. لهذا استخدمنا المعالج. كهربائية موافقة و قارنا ممانعتها مع الممانعة المستخرجة من المعالج. بمجرد التحقق من موافقة هذه الدارة يتم اسخدامها لاعادة انتاج التوتر الكهربائي الناتج عن صدمة برق.

الكلمات المفتاحية: نظام تأريض قضيب أرضي مقاومة الأرض سماحية الأرض.

## Résumé :

Ce travail consiste à analyser la variation de l'impédance électrique d'un système de mise à la terre sous forme d'une tige verticale. Divers paramètres électriques du sol ont été considérés (la résistivité et la permittivité du sol) et deux types de sol ont été pris pour cette étude. Pour cela, le code de calcul FEMM 4.2 a été utilisé. Un circuit électrique 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 normalisée.

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

## Abstract:

This work consists in analyzing the variation of the electrical impedance of an earthing system which is a single vertical rod. Various electrical parameters have been considered (resistivity and permittivity of the soil) and 2 soil types have been taken for this work. For this purpose, FEMM 4.2 computing code has been used. For this 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.

<b>Remerciement</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	4
<b>Introduction générale</b> .....	5
<b>Chapitre 1</b> .....	7
I.1. Introduction .....	8
I.2. présentation du système.....	8
I.3. Impédance en fonction de la fréquence.....	8
I.4. Circuit équivalent et choc de foudre.....	10
<b>Chapitre 2</b> .....	14
II.1. Introduction.....	15
II.2. Tige se situe dans la couche supérieure.....	15
II.2.1. Impédance en fonction de la fréquence.....	15
II.2.2. Circuit équivalent et choc de foudre.....	19
II.3. Tige pénétrant dans la couche inférieure .....	24
II.3.1. Impédance en fonction de la fréquence.....	24
II.3.2. Circuit équivalent et choc de foudre.....	28
<b>Chapitre 3</b> .....	32
III.1. Introduction.....	33
III.2. Tige située dans la couche supérieure.....	34
III.2.1. Impédance en fonction de la fréquence.....	36
III.2.2. Variation temporelle de la tension de sortie.....	40
III.3. Tige pénétrant dans la couche inférieure.....	42
III.3.1. Impédance en fonction de la fréquence.....	42
III.3.2. Circuit équivalent et choc de foudre.....	44
<b>Conclusion générale</b> .....	45
<b>Bibliographie</b> .....	47

# 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 j'ai entrepris, porte sur l'étude du comportement d'un système de mise à la terre sous forme d'une tige verticale dans deux types de sol: sol homogène et sol hétérogène à deux couches. Dans cette intension, j'ai étudié le comportement de l'impédance de tels systèmes sous divers paramètres électriques liés aux sols, à savoir la résistivité et la permittivité du sol et la fréquence de l'onde courant à évacuer à la terre.

# Chapitre 1

Etude du système de  
terre d'une tige  
verticale dans un sol  
homogène

## I.1. Introduction

L'impédance de mise à la terre dépend des caractéristiques du sol, c'est-à-dire sa résistivité et sa permittivité. En effet, cette impédance est grande pour des sols ayant une grande résistivité ou des sols avec une faible permittivité. Cependant, l'effet de la permittivité du sol n'apparaît qu'à partir de la fréquence de coupure. Au-delà de laquelle, nous avons vu que l'impédance du système de mise à la terre est plus faible pour les grandes permittivités. La fréquence de coupure dépend, en fait, de la permittivité et de la résistivité du sol.

Nous étudions, dans ce chapitre, la variation de l'impédance d'un système de terre constitué d'une tige verticale en fonction de la fréquence. Deux types de sol ont été considérés : homogène et stratifié (composé de deux couches de différentes résistivités). Ceci nous permet de proposer, pour chaque type de sol, un circuit électrique équivalent. Une étude comparative des résultats ainsi obtenus dans les deux cas y est présentée.

## I.2. Présentation du système

Le système de mise à la terre considéré dans cette section est constitué d'une tige verticale enterrée dans un sol homogène. Cette tige possède les mêmes propriétés et dimensions que celles des tiges utilisées en chapitre 3 ; matériau en cuivre, rayon de l'électrode  $r=12.5$  et longueur de l'électrode  $l=2$  m. Le choix d'une telle tige est justifié du fait qu'elle est fréquemment utilisée pour la mise à la terre des parafoudres ou des électrificateurs des clôtures et même pour les mises à la terre des branchements des petites résidences [Alain Charoy, 2005].

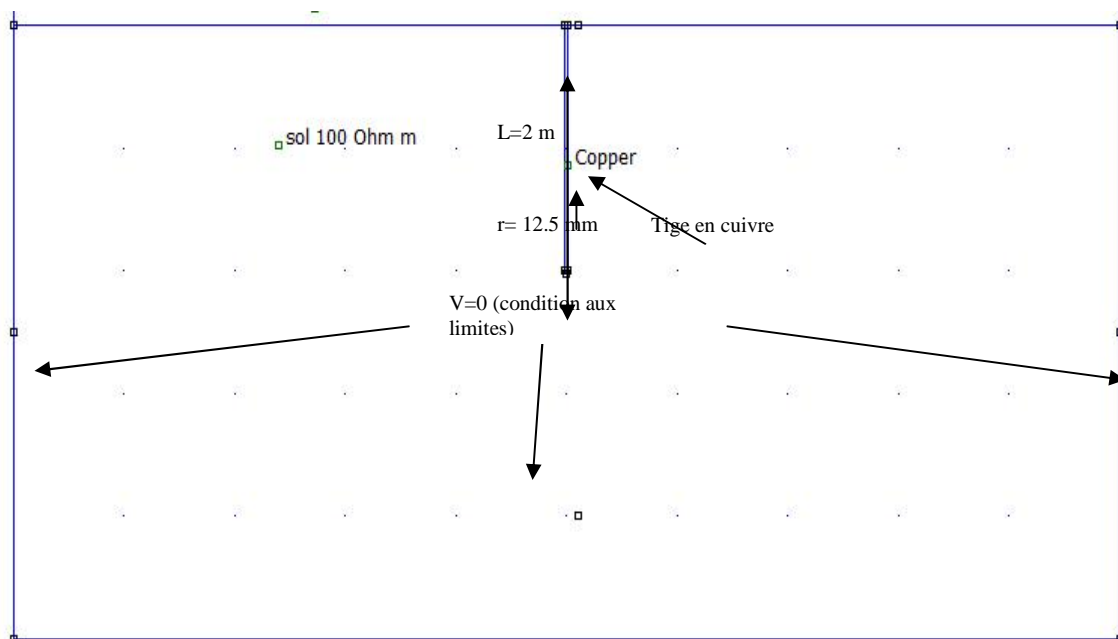


Figure I.1 : Tige de terre verticale sous environnement FEMM 4.2



### I.3. Impédance en fonction de la fréquence

En utilisant le logiciel FEMM 4.2, nous étudions la variation de l'impédance de cette configuration de mise à la terre en fonction de la fréquence, pour différentes résistivités du sol.

Pour le calcul de l'impédance de mise à la terre de cette configuration, nous utilisons la relation II.16 déjà mentionnée dans le chapitre 2.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$$

La relation de l'impédance de mise à la terre peut être déduite à partir de la relation précédente en substituant R par  $|Z_{EF}|$  et  $\frac{|E|}{|J|}$ . Nous obtenons :

$$|Z_{EF}| = \frac{|E|}{|J|} \cdot \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$$

avec :

$|Z_{EF}|$  : Le module de l'impédance de mise à la terre calculée par le FEMM ;

$|E|$  : Le module du vecteur champ électrique ;

$|J|$  : Le module du vecteur densité de courant électrique ;

$\rho$  : La résistivité du sol ;

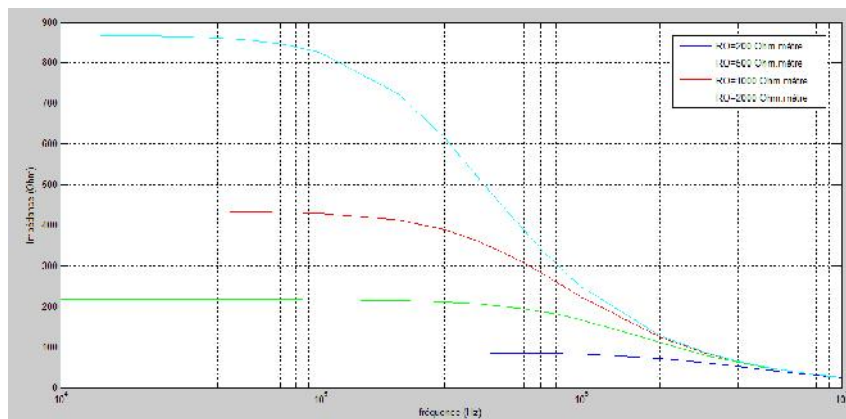
$l$  : La longueur de la tige ;

$r$  : Le rayon de la tige.

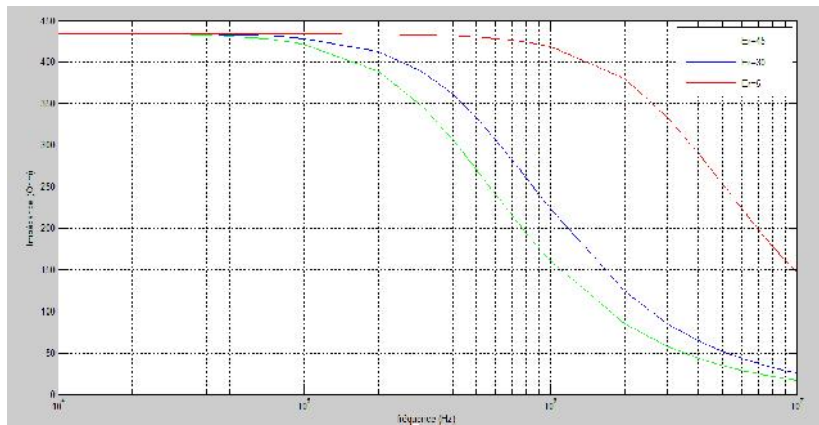
Nous calculons les variations de l'impédance en fonction de la fréquence pour les valeurs de résistivité suivantes :  $\rho=200, 500, 1000$  et  $2000 \Omega\text{m}$  et pour une permittivité relative  $\epsilon_r=30$ .

Ensuite, nous examinons la variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour les valeurs de permittivité suivantes :  $\epsilon_r=5, 30$  et  $45$  pour une résistivité  $\rho=1000 \Omega\text{m}$ .

Les résultats ainsi obtenus sont présentés aux figures I.2, I.3 respectivement.



**Figure I.2 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration d'une tige verticale en fonction de la fréquence pour différentes résistivités ;  $\epsilon_r=30$**



**Figure I.3 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration d'une tige verticale en fonction de la fréquence pour différentes permittivités ;  $\rho = 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$**

L'impédance de mise à la terre pour une seule tige verticale dépend de la résistivité du sol ; plus la résistivité du sol augmente, l'impédance devient plus grande.

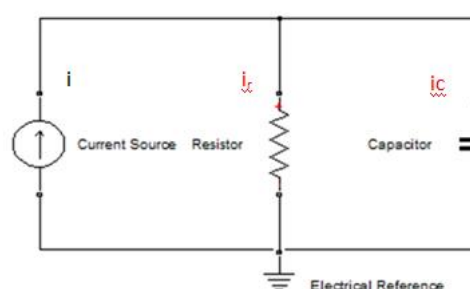
Elle dépend également de la permittivité du sol. Plus la permittivité est faible, l'impédance présente des valeurs plus grandes. Mais l'effet de la permittivité n'apparaît qu'à partir d'une certaine fréquence de coupure. Sachant que la fréquence de coupure dépend des caractéristiques électriques du sol ; elle diminue avec l'augmentation de la résistivité et de la permittivité du sol.

Pour un même sol ayant une résistivité et permittivité fixes, la variation de l'impédance en fonction de la fréquence présente deux parties :

- Une première partie caractérisée par une impédance constante, correspondant à un comportement purement résistif pour les fréquences ne dépassant pas la fréquence de coupure ;
- Une seconde partie où l'impédance commence à diminuer lorsque la fréquence dépasse celle de coupure. Donc le modèle d'une résistance simple n'est plus valable et il faudrait donc rajouter une capacité en parallèle avec la résistance précédente.

#### I.4. Circuit équivalent et choc de foudre

Afin d'étudier le comportement de la tige de terre dans un sol homogène face à un choc de foudre, nous proposons un circuit électrique équivalent. Suivant l'étude faite précédemment concernant la variation de l'impédance de la tige en fonction de la fréquence, nous optons pour un circuit électrique composé d'une résistance  $R$  en parallèle avec une capacité  $C$  (figure V.4).



**Figure I.4 : Circuit électrique équivalent**

La résistance de ce circuit est calculée par la relation [EDF, 1984] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$$

La capacité est déterminée par la relation suivante [Visacro et De Conti, 2007] :

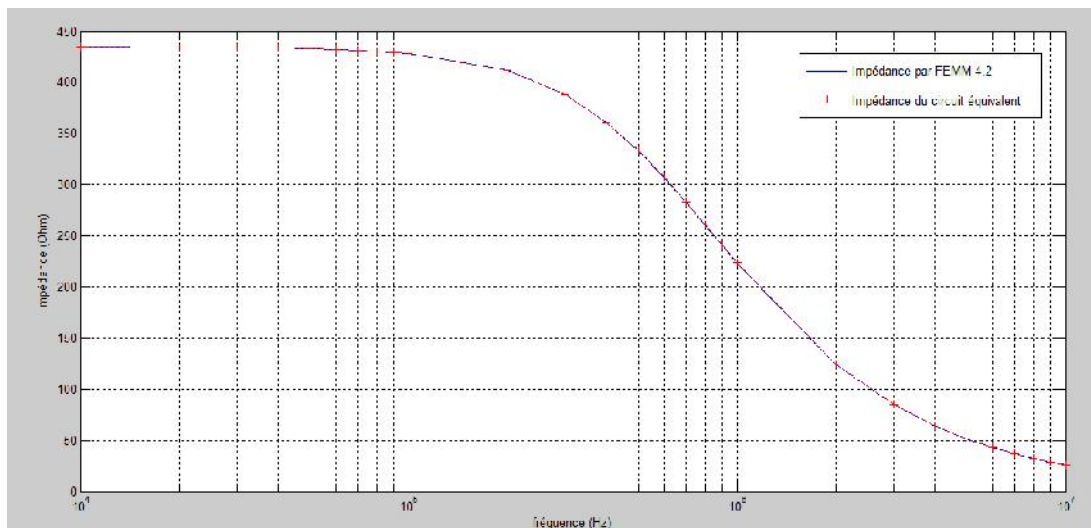
$$C = \frac{\rho \varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{\frac{1}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right)} \dots (I.1)$$

L'impédance totale du circuit équivalent est par conséquent:  $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}} \dots (I.2)$

En utilisant la relation précédente, nous traçons l'allure de l'impédance totale du circuit électrique équivalent  $|Z_{RC}|$  en fonction de la fréquence. Nous avons considéré une résistivité égale à 1000  $\Omega\text{m}$ , et une permittivité équivalente à 30.

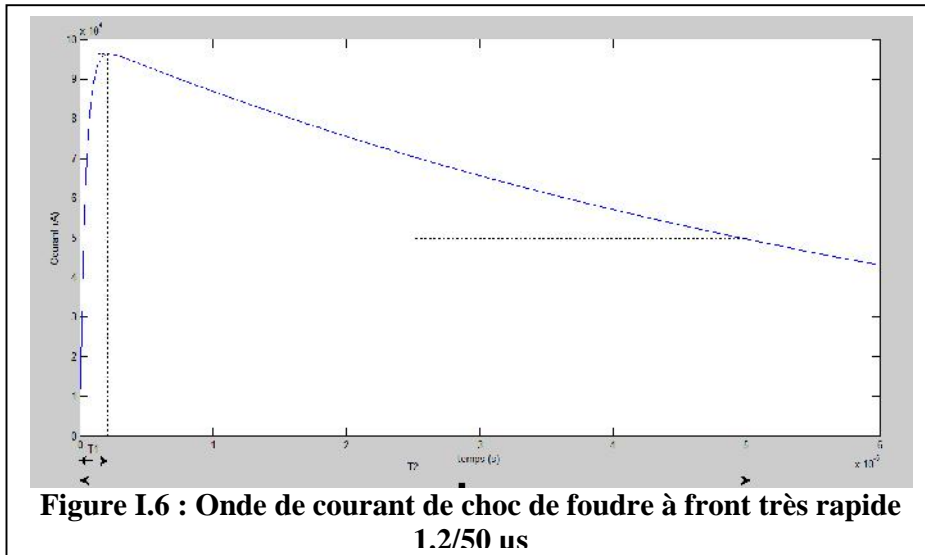
La courbe ainsi trouvée est comparée à celle de la variation fréquentielle de l'impédance du système tirée à partir du logiciel FEMM.

Les résultats de l'étude comparative sont illustrés sur la figure V.5. Cette dernière montre que les deux courbes mentionnées précédemment sont confondues. Ceci reflète que le circuit RC parallèle ainsi proposé modélise parfaitement la tige de terre enterrée dans un sol homogène.

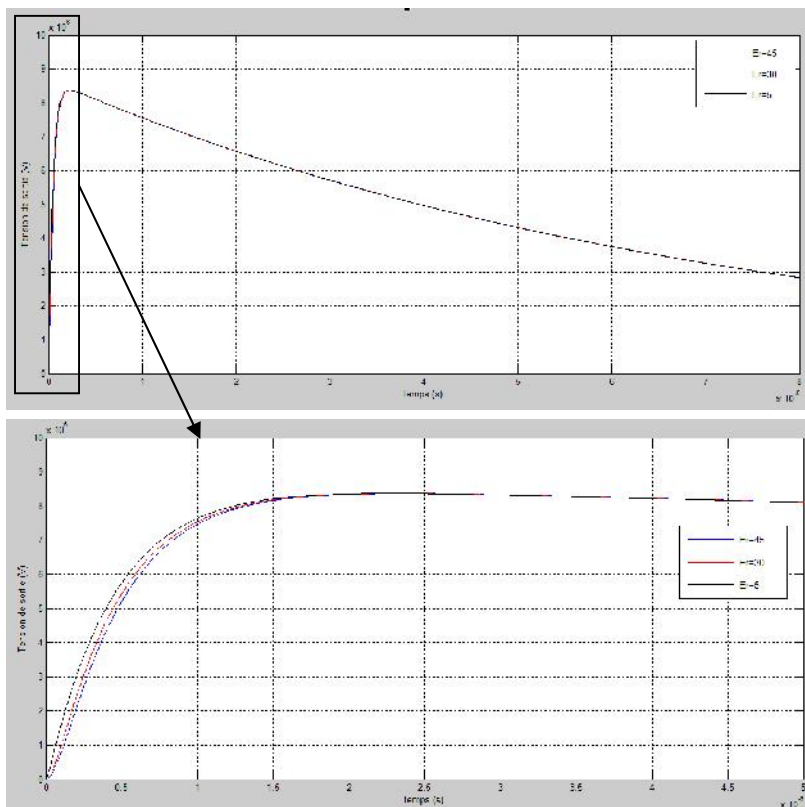


**Figure I.5 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent  $Z_{RC}$  pour  $\rho = 1000 \text{ hm}$  et  $\varepsilon_r = 30$**

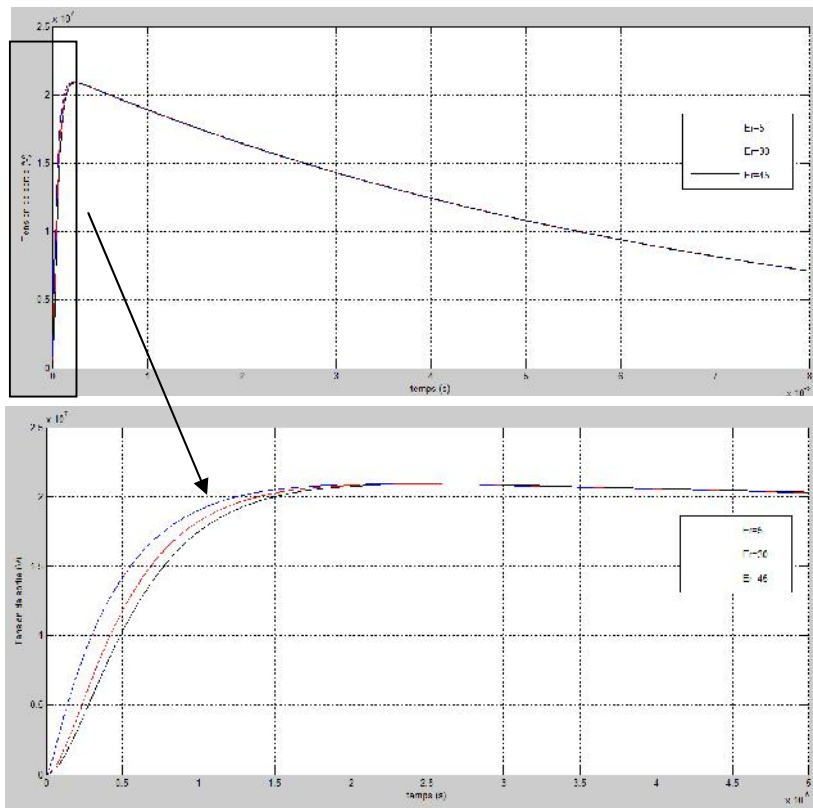
Une fois le circuit équivalent validé, nous lui injectons une onde de courant de foudre pour but d'étudier son comportement face à un choc de foudre. Cette onde est à front très rapide (1.2/50  $\mu\text{s}$ ), de valeur maximale de 100 kA, comme le montre la figure V.6 :



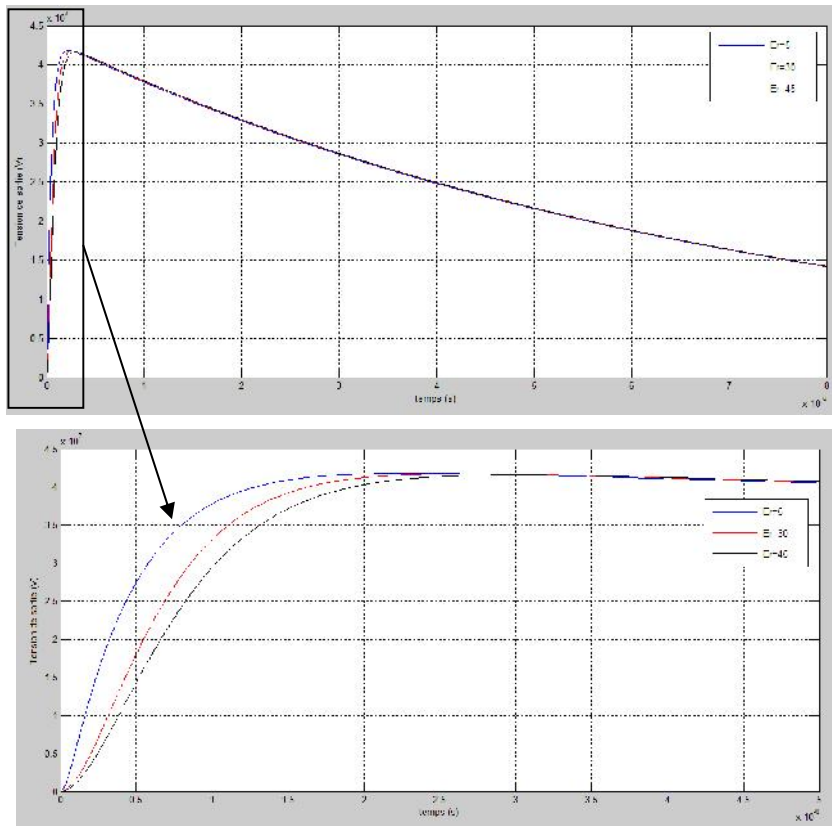
Les figures I.7.a, I.7.b, I.7.c représentent la variation temporelle de la tension de sortie aux bornes de la résistance du circuit électrique équivalent suite à un choc de foudre représentée sur la figure I.6. Plusieurs résistivités du sol ( $\rho = 200, 500$  et  $1000 \Omega\text{m}$ ) ont été prises pour cette simulation. Pour chacune d'elles, 3 valeurs de permittivités relatives ( $\epsilon_r = 5, 30, 45$ ) ont été considérées pour représenter la variation temporelle de la tension.



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



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



(c) :  $\rho=1000 \text{ hm}$

Figure I.7 : Variation de la tension de sortie du circuit équivalent configuration d'une tige verticale dans un sol homogène

Pour un même sol (une résistivité et une permittivité relative données), la variation temporelle de la tension de sortie, d'après les figures précédentes, prennent une forme d'onde. Son amplitude dépendant, entre autres, de la résistivité et de la permittivité relative, diffère d'un sol à un autre. En effet, nous remarquons que la tension de sortie est plus grande pour les sols ayant une résistivité plus grande. A titre d'exemple, notons une tension maximale de 8,4 MV pour une résistivité 200  $\Omega\text{m}$ , 21 MV pour 500  $\Omega\text{m}$  et 42 MV pour 1000  $\Omega\text{m}$ .

Par ailleurs, cette tension diminue quand la permittivité du sol augmente. Cependant, l'effet de la variation de la permittivité du sol n'est pas aussi remarquable que celle de la résistivité ; nous ne l'apercevons que dans un intervalle très petit du temps [0,5]  $\mu\text{s}$ .

# Chapitre 2

## Etude du système de terre d'une tige verticale dans un sol hétérogène

## II.1. Introduction :

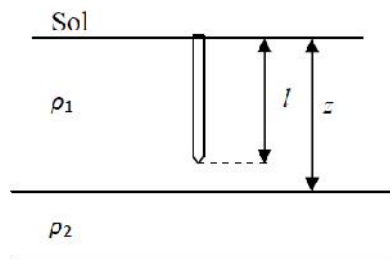
Dans ce qui suit, nous gardons le même système de mise à la terre (tige verticale) et changeons uniquement le type de sol. A cet effet, la tige est enterrée dans un sol stratifié (hétérogène) à deux couches de résistivités différentes. Deux cas de figure sont considérés lors de l'enfouissement de la tige dans un tel sol:

- la tige est entièrement placée dans la première couche ;
- la tige pénètre dans la deuxième couche.

Pour ces deux cas, nous étudions le comportement fréquentielle de l'impédance. Par la suite, nous proposons un circuit électrique équivalent. Nous étudions finalement, à l'aide de ce circuit, le comportement de la tige de terre face à un choc de foudre. Nous supposons que les deux couches possèdent la même permittivité.

## II.2. Tige se situe dans la couche supérieure

La figure II.1 montre le 1<sup>er</sup> cas considéré pour notre étude du système de mise à la terre dans un sol hétérogène. La tige est située entièrement dans la couche supérieure de résistivité  $\rho_1$ .



**Figure II.1 : Tige de terre enfouie dans la couche supérieure d'un sol stratifié à deux couches**

### II.2.1 : Impédance en fonction de la fréquence

Nous calculons l'impédance de mise à la terre de la configuration présentée sur la figure précédente en fonction de la fréquence. En vue de cela, nous utilisons le logiciel FEMM 4.2. Ce dernier nous permet de trouver les grandeurs suivantes :  $|E_1|$ ,  $|J_1|$ ,  $|E_2|$ ,  $|J_2|$ , tel que :  $I_1 = \frac{|E_1|}{|J_1|}$  et

$$I_2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$$

avec:

$|E_1|$ ,  $|E_2|$ : Modules des vecteurs champs électriques des couches supérieure et inférieure respectivement ;

$|J_1|$ ,  $|J_2|$ : Modules des vecteurs densités de courant des couches supérieure et inférieure respectivement ;



$\rho_1$  : Résistivité de la couche supérieure ;

$\rho_2$  : Résistivité de la couche inférieure.

En se basant sur la formule II.31 mentionnée dans le chapitre 2, et en substituant  $\rho_1$  et  $\rho_2$  respectivement par  $\frac{|E_1|}{|J_1|}$  et  $\frac{|E_2|}{|J_2|}$ , l'impédance de mise à la terre dans notre cas (une tige verticale située dans la couche supérieure) est déterminée par la relation suivante :

$$|Z| = \frac{|E_1|}{|J_1| 2\pi l} \left[ \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left( \frac{\frac{nz}{l} + 1}{\frac{nz}{l} - 1} \right) \right]$$

avec :

$l$  : Longueur de l'électrode ;

$K$  : Coefficient de réflexion donné par la relation :  $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$  ;

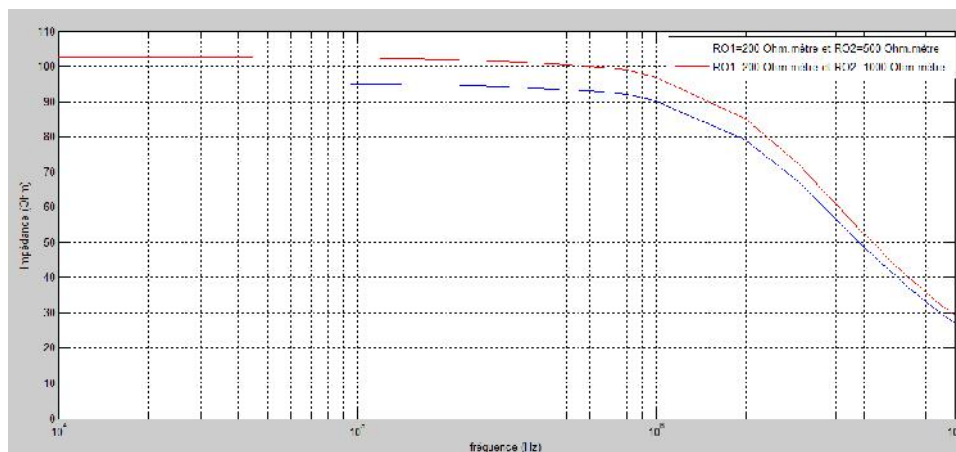
$z$  : Profondeur de la couche supérieure ;

$r$  : Rayon de la tige.

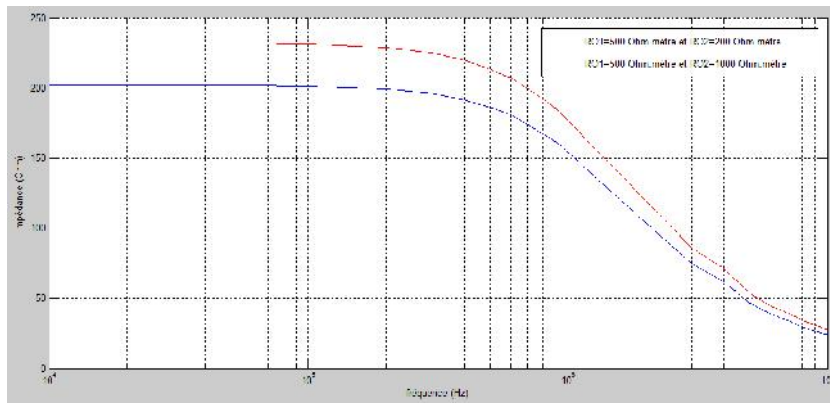
Comme applications, nous traçons la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le cas où le sol est caractérisé par une permittivité relative de 30, et de résistivités :

1.  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$  ;
2.  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
3.  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$  ;
4.  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
5.  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$  ;
6.  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ .

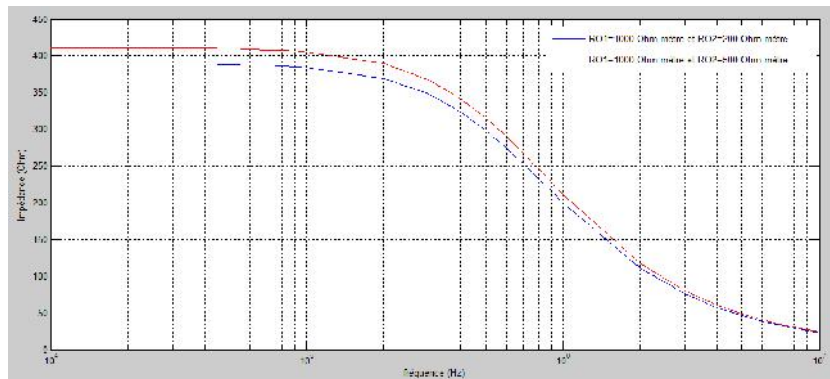
Les courbes II.2.a, II.2.b, II.2.c, ont été obtenues en gardant la valeur de la résistivité  $\rho_1$  constante et changeant uniquement la résistivité  $\rho_2$ . Il s'agit de comparer l'impédance dans le cas des sols : (1) et (3), (2) et (5), et finalement (4) et (6).



(a) :  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$  ;  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=1000 \text{ hm}$

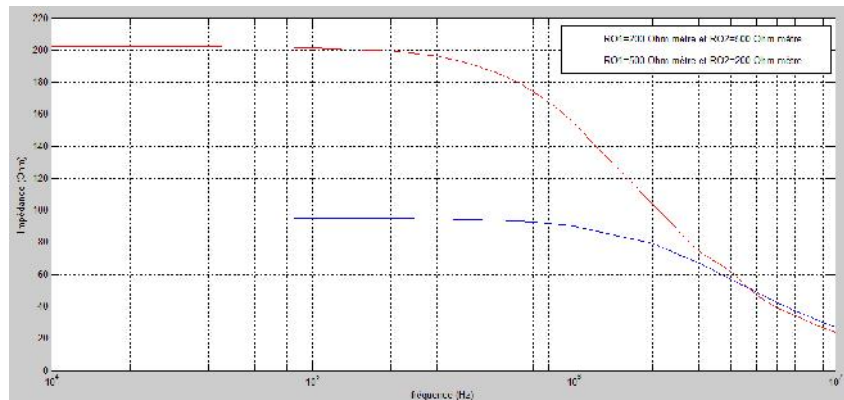


(b) :  $z_1=500$  hm et  $z_2=200$  hm ;  $r_1=500$  hm et  $r_2=1000$  hm

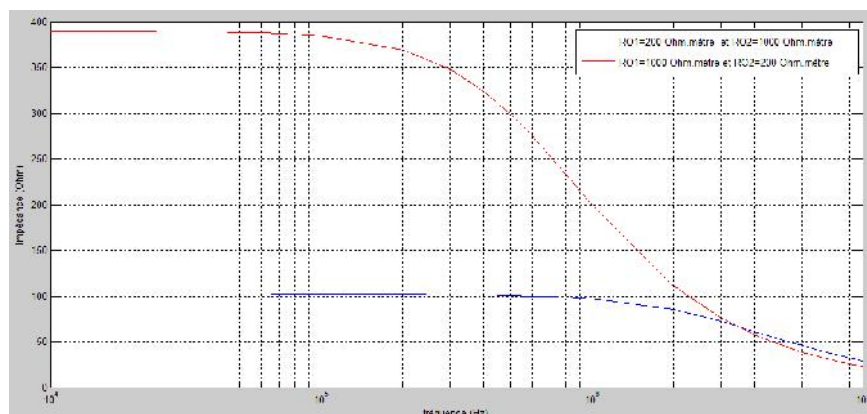


(c) :  $r_1=1000$  hm et  $r_2=200$  hm ;  $z_1=1000$  hm et  $z_2=500$  hm

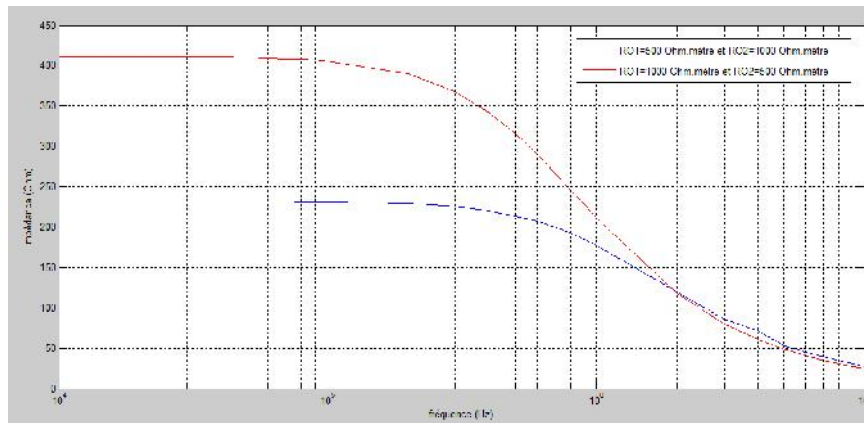
Les courbes II.2.d, II.2.e, II.2.f ont été obtenues en confrontant les valeurs de l'impédance inversant les valeurs de résistivités (courbes D, E et F correspondent aux sols (1) et (2), (3) et (4), (5) et (6) respectivement).



(d) :  $z_1=200$  hm et  $z_2=500$  hm ;  $r_1=500$  hm et  $r_2=200$  hm



(e) :  $r_1=200$  hm et  $r_2=1000$  hm ;  $z_1=1000$  hm et  $z_2=200$  hm



(f) :  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=1000 \text{ hm}$  ;  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$

**Figure II.2: Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour la configuration d'une tige verticale dans un sol hétérogène à deux couches de résistivités  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  et  $r=30$**

Nous remarquons d'après les 6 figures précédentes, que pour un même sol ( $\rho_1$  et  $\rho_2$  donnés), l'impédance de mise à la terre est constante pour les basses fréquences ne dépassant pas la fréquence de coupure. Cette dernière diffère d'un sol à un autre tout dépend de ses deux résistivités  $\rho_1$  et  $\rho_2$ . Dans cette plage de fréquence, le système peut être modélisé par une simple résistance. Au-delà de la fréquence de coupure, nous remarquons que l'impédance diminue en tendant vers une valeur fixe. Dans ce cas là, un circuit électrique capacitif serait plus convenable pour la modélisation de la tige de terre qu'une simple résistance. Un tel circuit, dont nous vérifierons la validité plus tard, est composé d'une résistance en parallèle avec une capacité.

Même si la tige de terre est entièrement enfouie dans la couche supérieure de résistivité  $\rho_1$ , les figures V.9.a, V.9.b, V.9.c, montrent que pour deux sols ayant la même résistivité  $\rho_1$  et différentes résistivités  $\rho_2$ , l'impédance de la tige de terre n'est pas la même. Pour une valeur donnée de  $\rho_1$ , l'impédance de mise à la terre devient plus grande si nous augmentons la résistivité de la couche inférieure  $\rho_2$ . Prenons comme exemple le cas de la figure II.2.a, nous voyons bien que l'impédance dans le cas où :  $\rho_1=200 \text{ }\Omega\text{m}$  et  $\rho_2=1000 \text{ }\Omega\text{m}$  est égale à  $102 \text{ }\Omega$ , et pour :  $\rho_1=200 \text{ }\Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \text{ }\Omega\text{m}$  est égale à  $95 \text{ }\Omega$ . En effet, l'impédance dépend des deux résistivités  $\rho_1$  et  $\rho_2$  (donc des deux couches) peu importe l'emplacement de la tige.

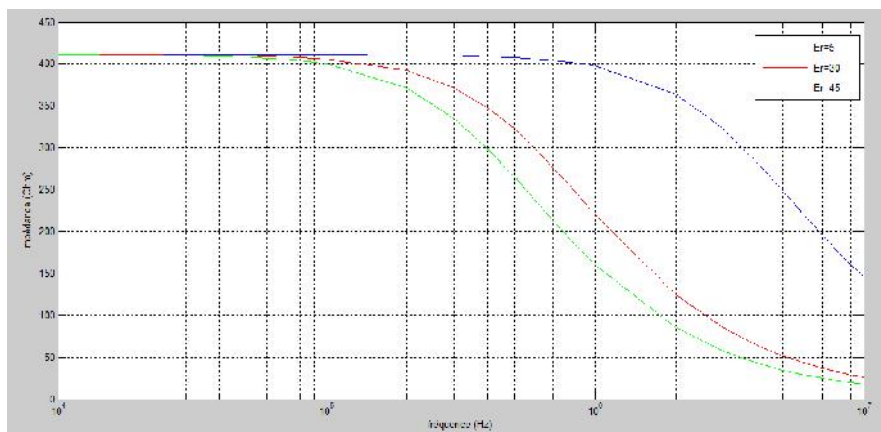
Les courbes V.9.d, V.9.e, V.9.f montrent qu'en inversant entre les valeurs de résistivités des deux couches nous n'aurons pas les mêmes impédances. Ces courbes montrent aussi que l'impédance de la tige de terre est beaucoup plus sensible à la variation de  $\rho_1$  que  $\rho_2$ . En effet, en fixant une valeur donnée pour  $\rho_1$ , les résultats trouvés pour l'impédance seront proches pour différentes résistivités  $\rho_2$  (résistivité de la couche inférieure). En outre, ces résultats s'éloignent d'autant plus que cette résistivité  $\rho_2$  augmente.

A titre d'exemple, notons pour des basses fréquences, que l'impédance de mise à la terre dans un sol ayant  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$  est de  $95 \Omega$ , et pour un sol ayant  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$ , cette impédance est de  $102 \Omega$  (une différence de seulement  $7 \Omega$ )

Nous pouvons dire donc que dans le cas où la tige est située entièrement dans la couche supérieure, l'impédance est plus influencée par la variation de la résistivité de la couche supérieure que par celle de la couche inférieure.

Nous considérons maintenant un sol hétérogène à deux couches de résistivités  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ . La permittivité relative, gardée la même pour les deux couches, a été variée. Nous optons pour les valeurs suivantes : 5, 30 et 45.

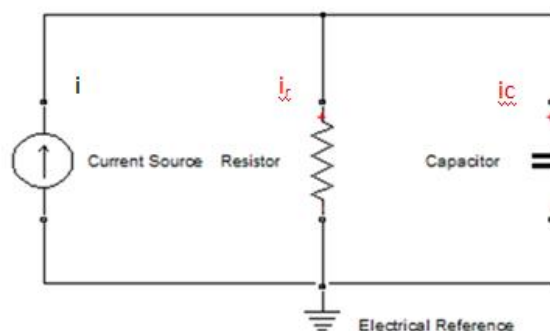
La figure V.10 montre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans de telles circonstances. Nous remarquons que l'impédance de mise à la terre est plus grande pour des valeurs plus faibles de la permittivité du sol. Une constatation analogue a été faite pour le cas d'un sol homogène.



**Figure II.3 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$  et différentes permittivités relatives**

### II.2.2. Circuit équivalent et choc de foudre

Nous proposons, suite à l'analyse faite précédemment, un circuit électrique équivalent pour la modélisation de la tige de terre en question. La variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour un sol quelconque ( $\rho_1$  et  $\rho_2$  donnés), nous conduit à proposer un circuit capacitif. Ce dernier est composé d'une résistance en parallèle avec une capacité, comme le montre la figure II.4.



**Figure II.4: Circuit électrique équivalent**

La résistance  $R$  est déterminée par la relation II.31 [Chong, 2000 ; Nzuru, 2009]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[ \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left( \frac{\frac{nz}{l} + 1}{\frac{nz}{l} - 1} \right) \right] ; \text{ avec } k = \frac{l^2 - 1}{2 + 1}$$

A partir de la formule de la résistance précédente, nous pouvons déduire l'expression de la capacité en remplaçant par et en inversant le reste. Le facteur de réflexion devient dans ces conditions devient :

$$k = \frac{1 - 2}{1 + 2}$$

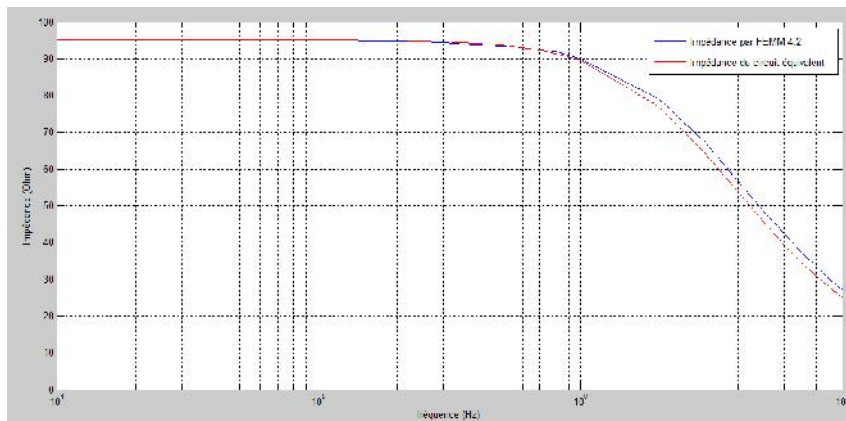
Etant donné que nous avons pris  $r_1 = r_2 = 30$  (la même permittivité des deux couches), le deuxième terme de la somme comprenant le facteur de réflexion devient nul. La relation finale de la capacité  $C$  que nous proposons est alors :

$$C = \frac{\varepsilon \cdot 2\pi l}{\left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right)} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot 2\pi l}{\left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right)}$$

L'impédance totale du circuit est :  $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}$

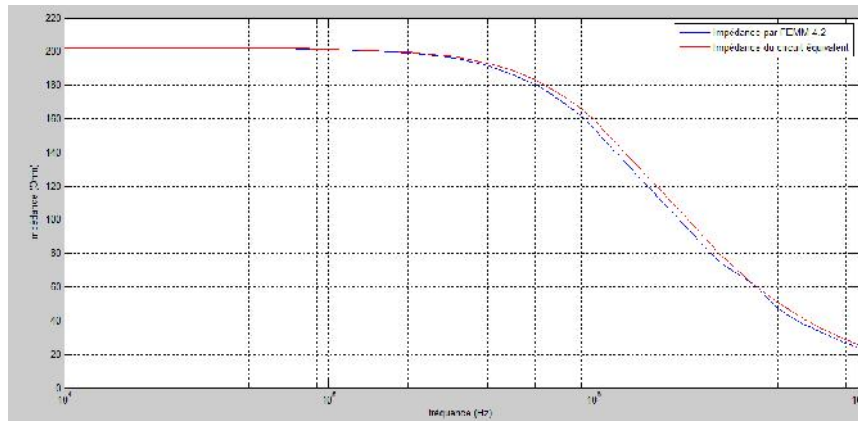
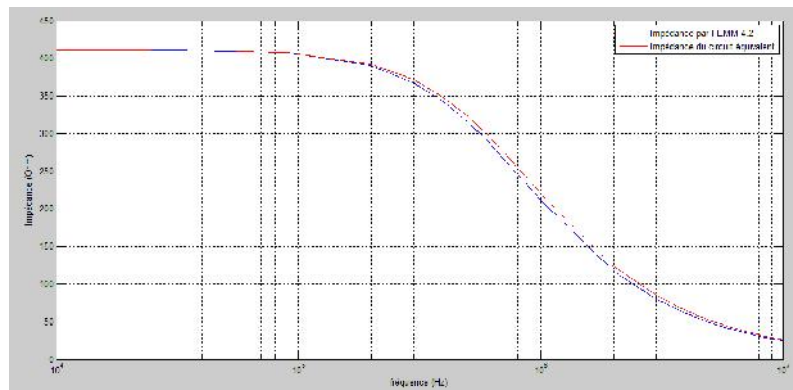
Nous traçons ainsi, la variation de l'impédance totale en fonction de la fréquence déduite du circuit équivalent. Nous comparons les résultats trouvés avec ceux déterminés en se basant sur le logiciel FEMM 4.2 afin de vérifier la validité d'un tel circuit électrique. A cet effet, nous présentons, sur les figures II.5.a, II.5.b, II.5.c 3 exemples de calcul :

- Exemple 1 :  $r_1 = 200 \Omega\text{m}$  et  $r_2 = 500 \Omega\text{m}$  ;
- Exemple 2 :  $r_1 = 500 \Omega\text{m}$  et  $r_2 = 200 \Omega\text{m}$  ;
- Exemple 3 :  $r_1 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $r_2 = 500 \Omega\text{m}$ .



(a) :  $r_1 = 200 \text{ hm}$  et  $r_2 = 500 \text{ hm}$



(b) :  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=200 \text{ hm}$ (c) :  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$ 

**Figure II.5 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC  $Z_{RC}$  pour  $r=30$  et différentes valeurs de  $\rho_1$  et  $\rho_2$**

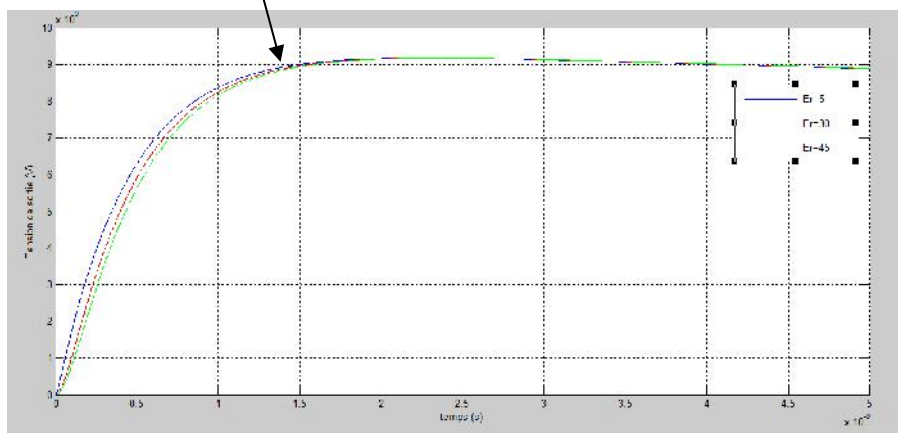
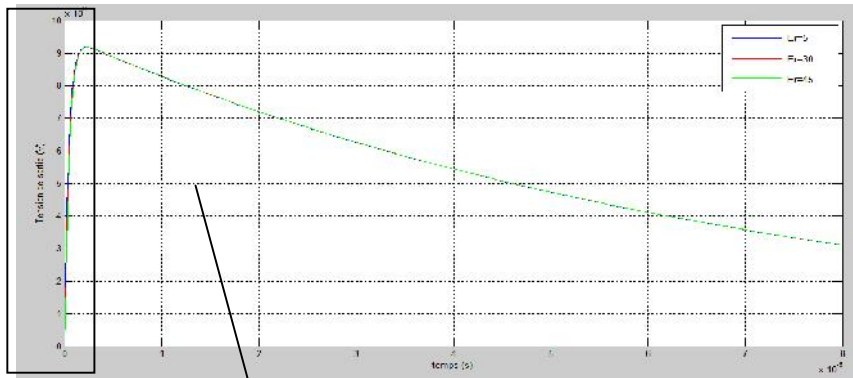
Les trois figures précédentes montrent que les résultats de la variation de l'impédance trouvés par les deux méthodes de calcul, sont très proches entre eux. Pour les basses fréquences les courbes de l'impédance sont confondues, alors que pour les hautes fréquences nous remarquons un léger décalage. Pour les 3 cas, nous notons une erreur qui ne dépasse pas 4,2 %. En effet, nous pouvons conclure que le circuit électrique proposé est suffisamment adéquat pour modéliser notre système de mise à la terre.

Le circuit électrique équivalent validé en haut, est utilisé pour l'étude du comportement du système de mise à la terre suite à un choc de foudre. Nous lui injectons, dans cette intensité, une onde de courant de foudre à front très rapide 1.2/50  $\mu\text{s}$ , et de valeur de crête égale à 100 kA (figure 1.6).

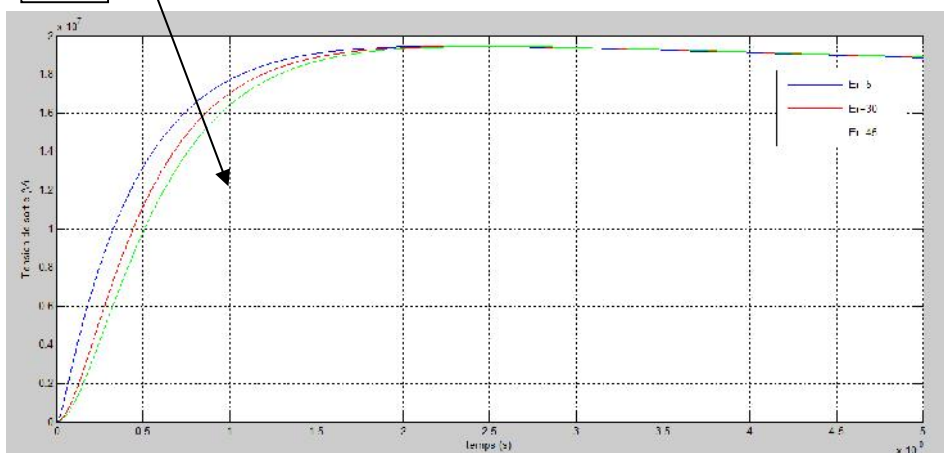
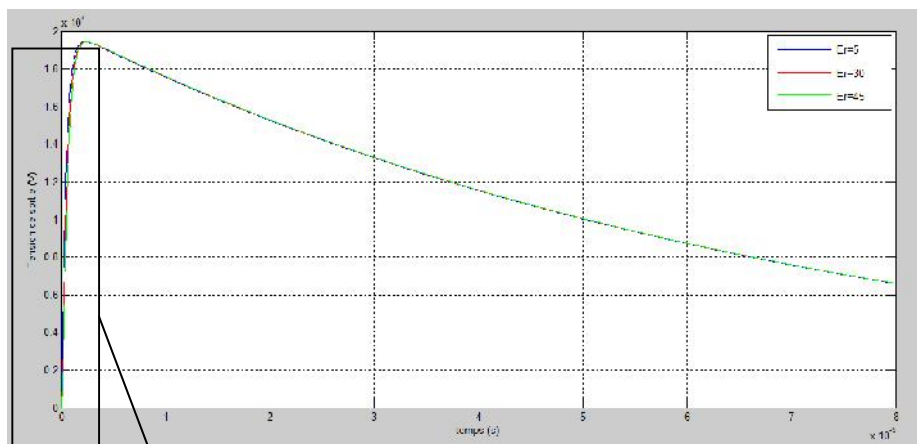
Nous déterminons ensuite les tensions de sortie du circuit aux bornes de la résistance R ou la capacité C (R et C sont en parallèle). Nous prenons pour ceci 3 cas, et pour chaque cas 3 valeurs différentes de la permittivité : ( $r=5, 30$  et  $45$ ) ont été adoptées..

- 1<sup>er</sup> cas :  $\rho_1=200 \text{ }\Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \text{ }\Omega\text{m}$  ;

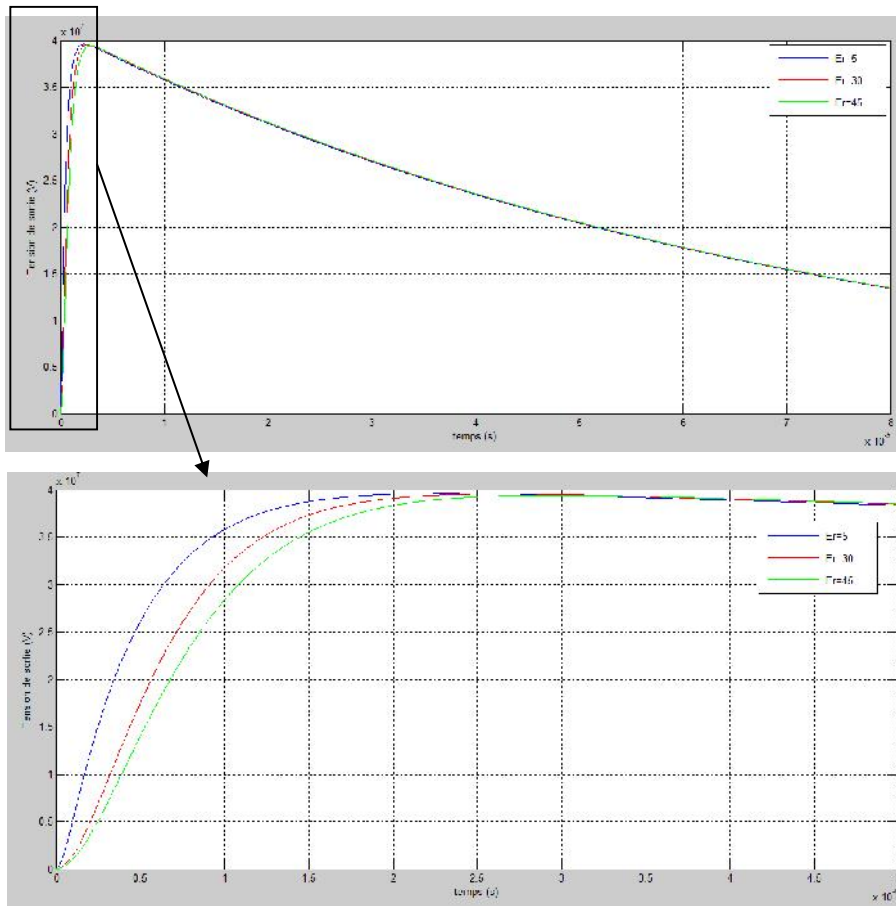
- 2<sup>ème</sup> cas :  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
- 3<sup>ème</sup> cas :  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ .



(a) :  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$



(b) :  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=200 \text{ hm}$

(c) :  $\rho_1=1000 \text{ } \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \text{ } \Omega\text{m}$ 

**Figure II.6 : Variation de la tension de sortie du circuit équivalent pour différentes permittivités relatives  $\epsilon_r=5, 30,$  et  $45$  et pour différentes résistivités des deux couches**

Les figures II.6.a, II.6.b, II.6.c nous laissent tirer les mêmes constatations que celles faites pour le cas d'un sol homogène. La tension de sortie varie en fonction des propriétés du sol. Pour une même permittivité des deux couches de sol, cette tension varie beaucoup plus avec la variation de la résistivité de la couche supérieure  $\rho_1$  que celle de la couche inférieure  $\rho_2$ . Plus  $\rho_1$  augmente la tension de sortie devient plus importante. Par ailleurs, pour une même résistivité  $\rho_1$ , la tension augmente avec l'augmentation de  $\rho_2$ . Nous citons par exemple les tensions maximales pour les 3 cas de figure suivants:

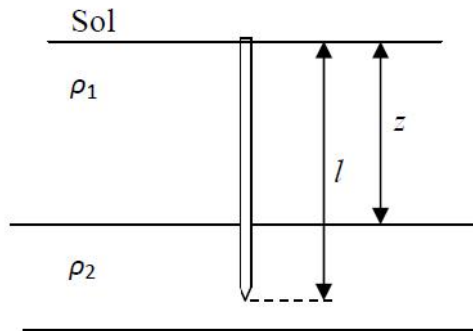
- 9,1 MV pour  $\rho_1=200 \text{ } \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \text{ } \Omega\text{m}$  ;
- 17,4 MV pour  $\rho_1=500 \text{ } \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \text{ } \Omega\text{m}$  ;
- 39 MV pour  $\rho_1=1000 \text{ } \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \text{ } \Omega\text{m}$ .

Pour de mêmes résistivités, la tension de sortie augmente avec la diminution de la permittivité du sol  $\epsilon_r$ . Cette augmentation reste modérée et n'est visible que dans un intervalle de temps très petit  $[0,5] \mu\text{s}$ .



## II.2. Tige pénétrant dans la couche inférieure

La figure V.15 illustre le 2<sup>ème</sup> cas considéré pour l'étude d'une tige de terre enfouie dans un sol stratifié verticalement. La tige pénètre dans la deuxième couche après avoir traversé complètement la première couche.



**Figure II.7 : Tige de terre pénétrant la couche inférieure du sol hétérogène à deux couches**

### II.2.1. Impédance en fonction de la fréquence

Nous refaisons le même travail réalisé dans le premier cas. A l'aide du logiciel FEMM 4.2 et en se basant sur la formule II.32 (mentionnée dans le chapitre 2), nous calculons en fonction de la fréquence, l'impédance du système de mise à la terre, présenté sur la figure précédente. Le FEMM 4.2, comme nous l'avons précisé auparavant, permet de calculer les grandeurs suivantes :  $|E_1|$ ,  $|E_2|$ ,  $|J_1|$ ,  $|J_2|$  ; tels que :  $1 = \frac{|E_1|}{|J_1|}$  et  $2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$ .

En remplaçant ces expressions dans la relation II.32, nous obtenons la formule suivante permettant de calculer l'impédance en fonction de la fréquence :

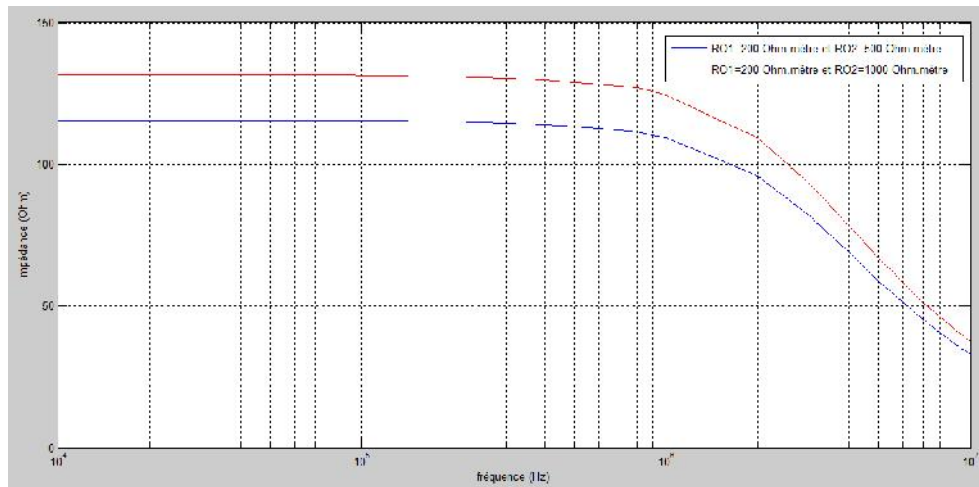
$$|Z| = \frac{|E_1|}{|J_1| \cdot 2\pi l} \frac{(1+k)}{\left[(1-k) + 2k \frac{z}{l}\right]} \left[ \ln\left(\frac{2l}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln\left(\frac{2nz+l}{2z(n-1)+l}\right) \right]$$

$$\text{avec : } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

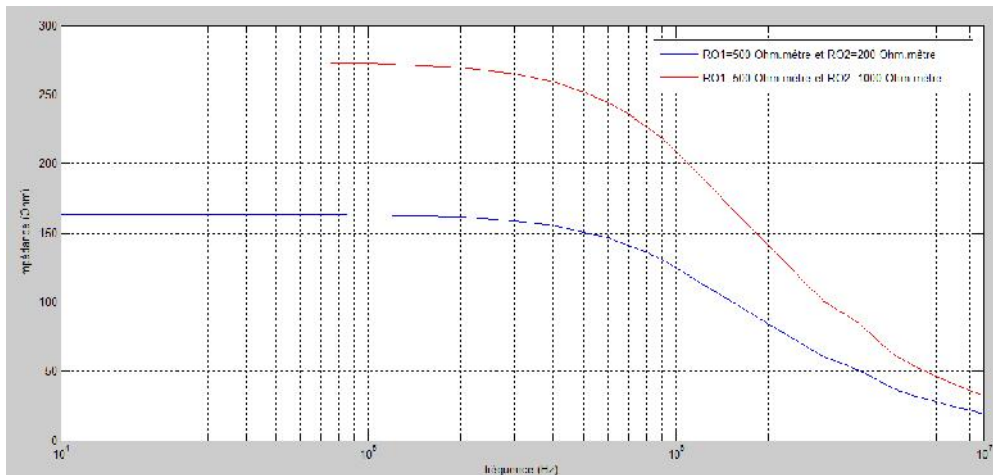
Nous considérons les cas suivants :

1.  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$  ;
2.  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
3.  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$  ;
4.  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
5.  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$  ;
6.  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ .

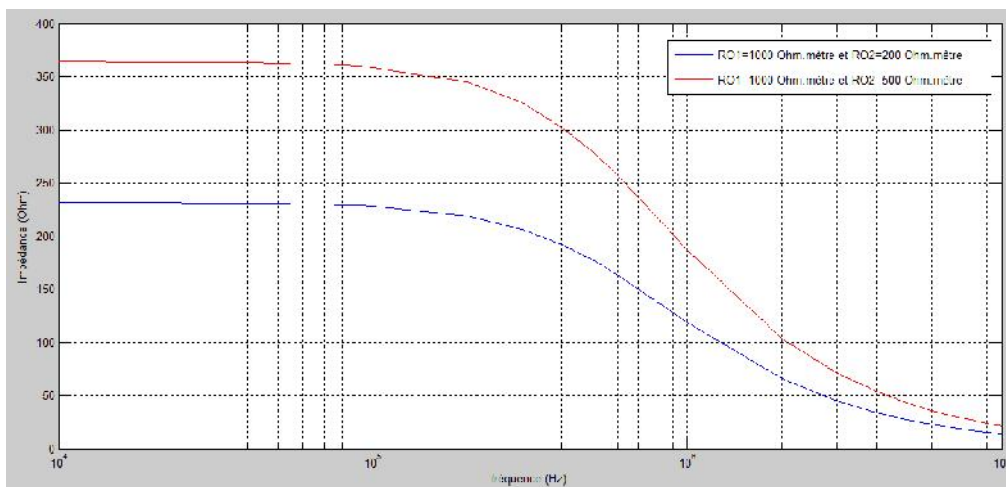
En gardant constante la résistivité  $\rho_1$  pour deux sols donnés, les courbes II.8.a, II.8.b, II.8.c ont été trouvées en traçant l'évolution fréquentielle de l'impédance pour deux résistivités  $\rho_2$ . Il s'agit de comparer l'impédance dans le cas des sols : (1) et (3), (2) et (5), et finalement (4) et (6).



(a) :  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$  ;  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=1000 \text{ hm}$

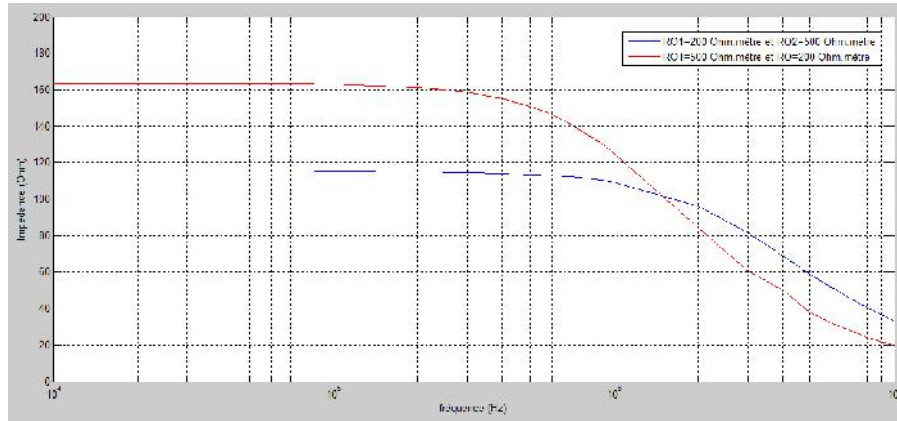


(b) :  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=200 \text{ hm}$  ;  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=1000 \text{ hm}$

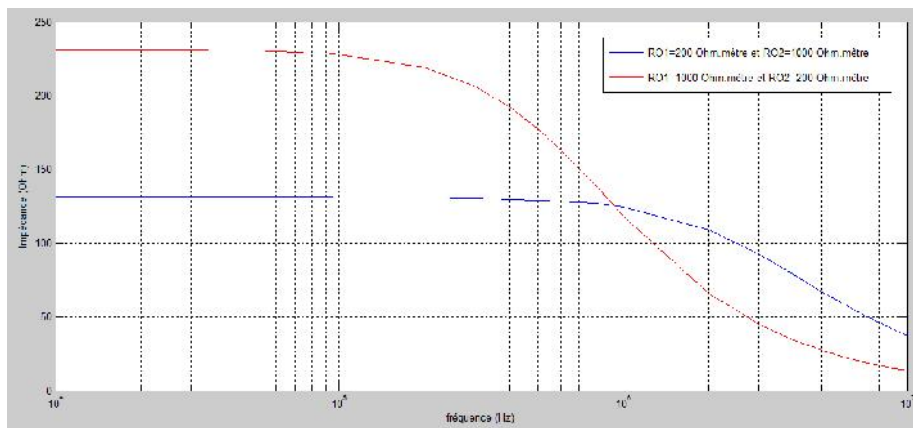


(c) :  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=200 \text{ hm}$  ;  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$

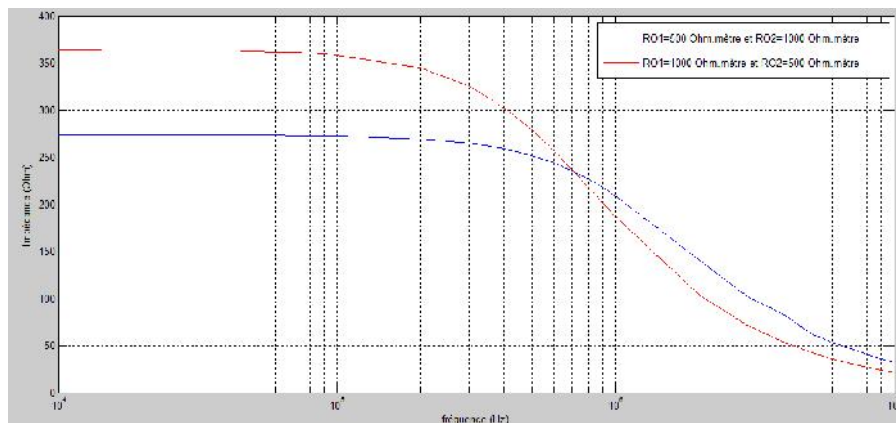
Dans ce qui suit, nous comparons les valeurs de l'impédance pour un cas quelconque à ceux obtenus en inversant entre les valeurs des deux résistivités  $\rho_1$  et  $\rho_2$  ( $\rho_1$  prend la valeur de  $\rho_2$  et vis-versa). Les courbes II.8.d, II.8.e, II.8.f obtenues correspondent aux sols (1) et (2), (3) et (4), (5) et (6) respectivement.



(d) :  $\rho_1=200$  hm et  $\rho_2=500$  hm ;  $\rho_1=500$  hm et  $\rho_2=200$  hm



(e) :  $\rho_1=200$  hm et  $\rho_2=1000$  hm ;  $\rho_1=1000$  hm et  $\rho_2=200$  hm



(f) :  $\rho_1=500$  hm et  $\rho_2=1000$  hm ;  $\rho_1=1000$  hm et  $\rho_2=500$  hm

**Figure II.8: Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour la configuration d'une tige verticale traversant deux couches de résistivités différentes  $\rho_1$  et  $\rho_2$  et  $r=30$**

Les figures II.8.a, II.8.b, II.8.c montrent que, pour une même résistivité  $\rho_1$  de la couche supérieure, l'impédance de mise à la terre augmente avec la résistivité  $\rho_2$  de la couche inférieure. Nous remarquons que dans notre cas, où la tige traverse les deux couches du sol, la variation de  $\rho_2$  affecte grandement celle de l'impédance totale. Ceci n'était pas le cas quand la tige était entièrement enfouie dans la couche supérieure, où l'impédance varie peu en fonction de  $\rho_2$ .

En outre, les figures II.8.d, II.8.e, II.8.f montrent qu'en inversant les valeurs de résistivités entre les deux couches, l'impédance totale varie. Nous expliquons quantitativement cette variation.

Pour cela, nous prenons deux sols (A) et (B) tels que :

Sol (A) :  $\rho_{11}$  : Résistivité de la couche supérieure ;

$\rho_{21}$  : Résistivité de la couche inférieure ;

$Z_1$  : Impédance de mise à la terre.

Sol (B) :  $\rho_{12}$  : Résistivité de la couche supérieure ;

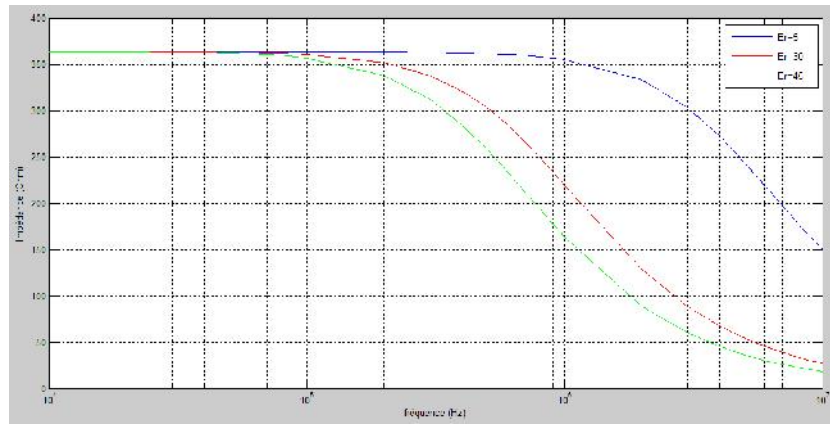
$\rho_{22}$  : Résistivité de la couche inférieure ;

$Z_2$  : Impédance de mise à la terre.

Si nous considérons que  $\rho_{11} > \rho_{12}$ , logiquement, nous nous attendions, en se basant sur les résultats obtenus dans le 1<sup>er</sup> cas (tige située dans la première couche), à ce que  $Z_1 > Z_2$  et ce quelle que soit la fréquence. Cependant cette hypothèse ( $Z_1 > Z_2$ ) est valable jusqu'à une valeur limite de la fréquence, au-delà de laquelle la situation est inversée où  $Z_2$  devient plus importante que  $Z_1$ .

En revanche, nous remarquons que si nous prenons  $\rho_{11} = \rho_{12}$  et  $\rho_{21} > \rho_{22}$  alors forcément  $Z_1$  sera plus grande que  $Z_2$ .

Dans une seconde étape, nous étudions la variation de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour différentes permittivités. Les valeurs prises sont  $\epsilon_r = 5, 30$  et  $45$ , alors que les résistivités sont maintenues constantes ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$ ) comme le montre la figure II.9. D'après les caractéristiques relatives aux trois permittivités considérées, les impédances sont non seulement constantes mais confondues tant que la fréquence ne dépasse pas celle de coupure. Au-delà de cette fréquence, nous remarquons que l'impédance, diminue avec l'augmentation de la permittivité du sol. Cette diminution n'apparaît qu'au-delà de la fréquence de coupure.



**Figure II.9: Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour  $r_1=1000$  hm et  $r_2=500$  hm pour  $r=5, 30$  et  $45$**

En général, l'impédance de la tige de terre enfouie dans un sol quelconque stratifié verticalement (pénétrant dans la 2<sup>ème</sup> couche) est constante pour les basses fréquences inférieure à celle de coupure. Dans ce cas là, la tige de terre est modélisée par une simple résistance. Pour les hautes fréquences, l'impédance diminue en allant vers une valeur limite. Ceci peut être traduit par un comportement capacitif. Nous allons proposer, suite à cette analyse, un circuit électrique équivalent dont nous vérifierons la validité plus tard. Ce circuit est sous forme d'une résistance en parallèle avec une capacité.

## II.2.2. Circuit équivalent et choc de foudre

L'interprétation des résultats trouvés précédemment, nous conduit à proposer un circuit électrique équivalent. En effet, comme nous l'avons précisé, ce circuit est une mise en parallèle d'une résistance R avec une capacité C comme déjà illustré sur la figure V.11.

La résistance R du circuit est déterminée par la relation II.32 [Chong, 2000 ; Nzuru, 2009]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+k)}{[(1-k)+2k\frac{z}{r}]} \left[ \ln\left(\frac{2l}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln\left(\frac{2nz+l}{2z(n-1)+l}\right) \right], \quad \text{avec : } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Nous proposons une expression de la capacité en s'inspirant de la formule de la résistance précédente. Pour cela, nous substituons  $\rho_1$  par  $\frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$  et inversons le reste. Etant donné que nous avons pris une même permittivité des deux couches ( $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 30$ ), le facteur de réflexion  $k = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$  devient nul. Dans ces conditions, la relation finale de la capacité C que nous proposons est alors :

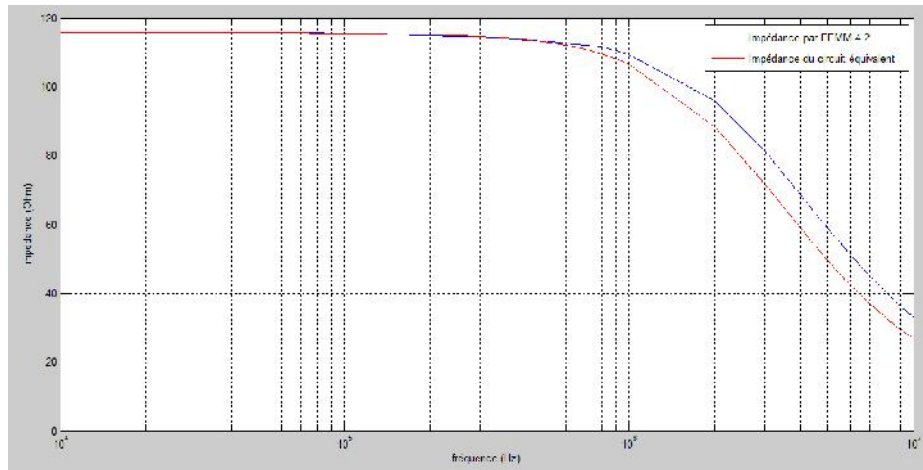
$$C = \frac{\epsilon}{2\pi l \left(\ln\frac{2l}{r}\right)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\pi l \left(\ln\frac{2l}{r}\right)}; \quad \text{avec } \epsilon_r = 30$$

L'impédance totale du circuit est  $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$

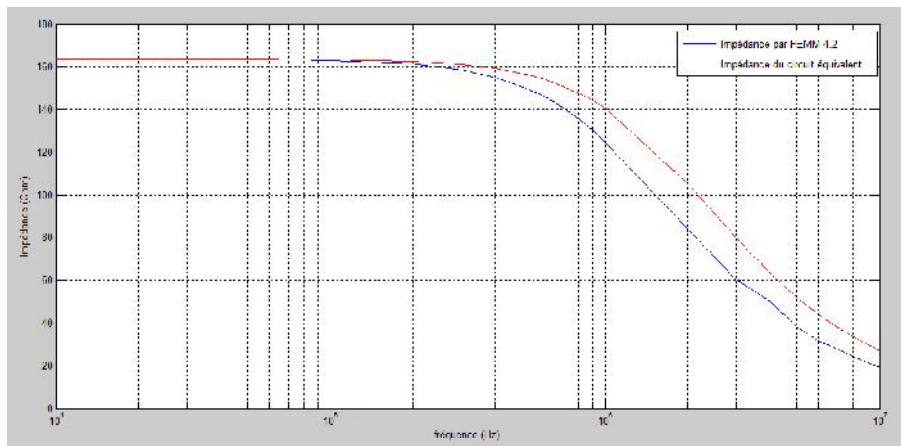
Pour vérifier la validité de ce circuit équivalent, nous faisons une comparaison entre l'impédance trouvée par le FEMM et celle du circuit électrique équivalent. Pour cela, nous traçons

conjointement sur les figures II.10.a, II.10.b, II.10.c les deux impédances précédentes pour 3 sols caractérisés par :

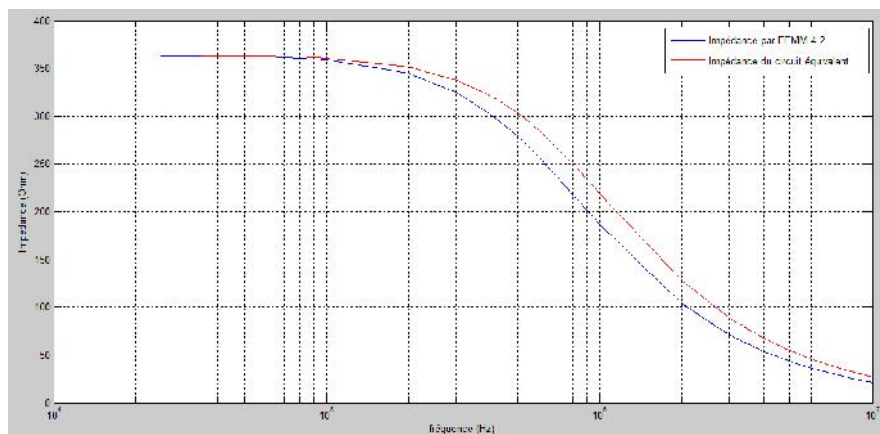
- $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$
- $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$
- $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$



(a) :  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$



(b) :  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=200 \text{ hm}$



(c) :  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$

**Figure II.10:** Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent  $Z_{RC}$  pour  $r=30$  et différentes valeurs de  $\rho_1$  et  $\rho_2$



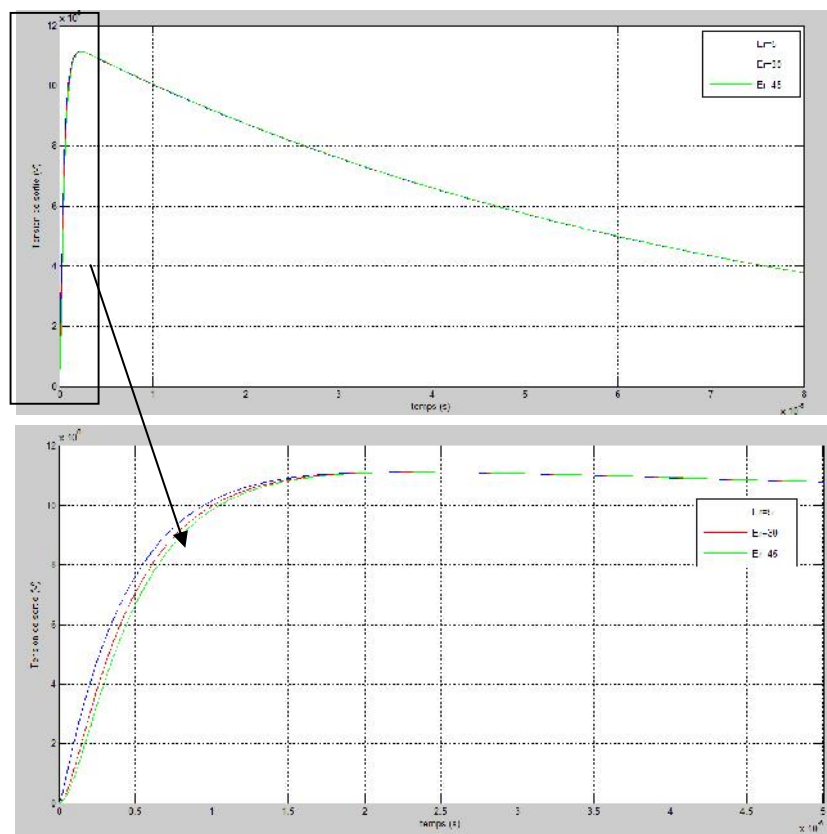
Nous remarquons que les résultats trouvés en utilisant l'impédance totale du circuit sont proches à ceux trouvés en se basant sur le FEMM 4.2. L'écart initialement inexistant pour les basses fréquences devient relativement considérable pour les très hautes fréquences (une erreur maximale de 14 %). Nous pouvons dire donc qu'un circuit RC parallèle est valable pour modéliser la tige de terre traversant deux couches de résistivités différentes, tant que la fréquence ne dépasse une valeur limite de quelques MHz.

Après la validation du circuit équivalent, nous l'utilisons pour étudier le comportement de la tige de terre face à un choc de foudre. A cet effet, nous introduisons dans ce circuit une onde de courant à front très rapide (1.2/50  $\mu$ s) ayant une valeur maximale de 100 kA (Figure V.19) :

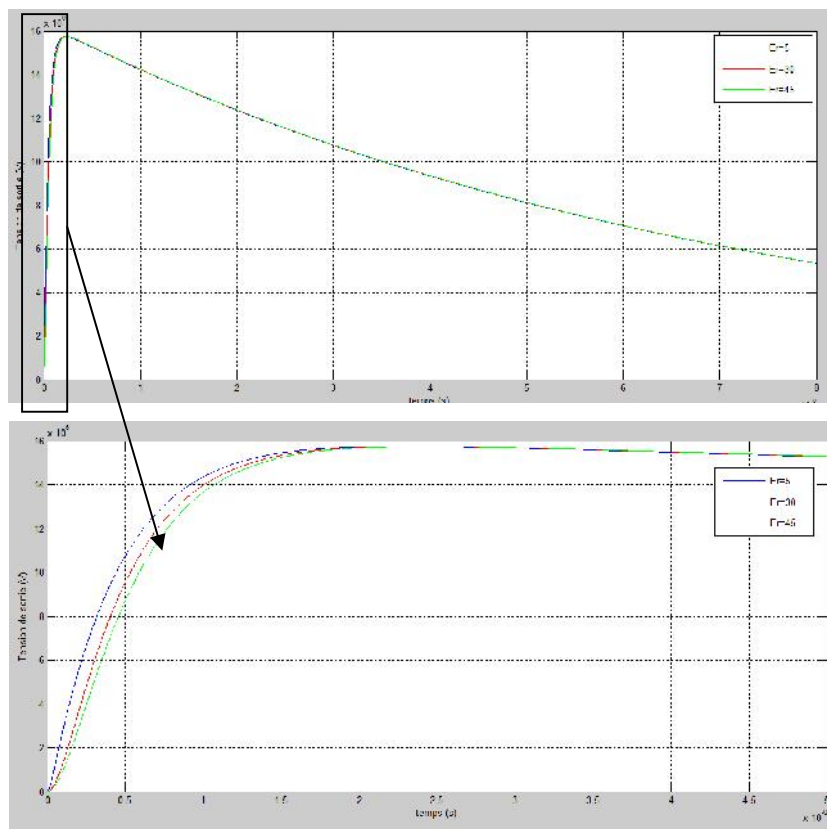
Suite à un choc de foudre, nous déterminons les tensions de sortie du circuit aux bornes de la résistance R ou la capacité C (R et C sont en parallèle). Nous considérons pour ce faire 3 sols :

- Sol 1 :  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$  ;
- Sol 2 :  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
- Sol 3 :  $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ .

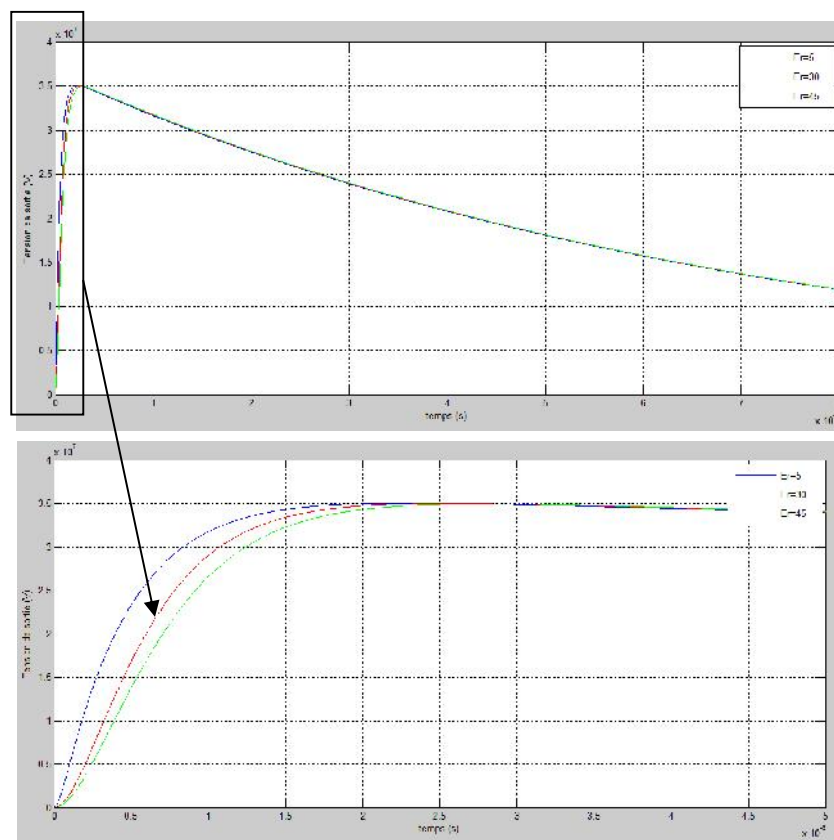
Pour chaque sol, trois permittivités différentes ont été choisies :  $\epsilon_r=5, 30$  et  $45$ . Les figures V.20.a, V.20.b, V.20.c représentent des exemples typiques à ce genre de variation



(a) :  $\rho_1=200 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$



(b) :  $\rho_1=500 \text{ hm}$  et  $\rho_2=200 \text{ hm}$



(c) :  $\rho_1=1000 \text{ hm}$  et  $\rho_2=500 \text{ hm}$

Figure II.11: Variation de la tension de sortie du circuit équivalent pour différentes permittivités relatives  $\epsilon_r=5, 30$ , et  $45$  et pour différentes résistivités des deux couches



Les figures II.11.a, II.11.b, II.11.c montrent que la tension de sortie du circuit équivalent qui subit un choc de foudre, varie en fonction des caractéristiques électriques du sol en l'occurrence,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  et  $r$ . Cette tension augmente de façon remarquable avec l'augmentation de la résistivité, et plus particulièrement avec celle de la couche supérieure. Nous relevons les résultats suivants :

- 11 MV pour  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$  ;
- 15,7 MV pour  $\rho_1=500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=200 \Omega\text{m}$  ;
- 35 MV pour  $\rho_1=200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ .

Pour de mêmes résistivités, la permittivité n'affecte la tension de sortie que dans l'intervalle  $[0,5]$   $\mu\text{s}$ . Dans cet intervalle, la tension augmente légèrement quand la permittivité diminue.

La variation de la tension de sortie suit celle de l'impédance totale. En d'autres termes, quand cette dernière est plus grande, la tension de sortie sera évidemment plus grande vu que  $V=Z_{RC} I$ .

# Chapitre 3

Comparaison entre la configuration d'une tige verticale dans un sol homogène et dans un sol hétérogène à deux couches

### III.1. Introduction:

Nous avons étudié, dans les deux chapitres précédents, un système de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol homogène et dans un sol hétérogène à deux couches. Dans cette 3<sup>ème</sup> section du chapitre 5, nous faisons une comparaison et une étude de l'influence de la nature du sol sur l'impédance et le comportement de la tige de terre. En vue de ceci, nous rassemblons tous les résultats et les courbes réalisés dans les deux sections précédentes. Ainsi, nous comparons les résultats de la variation de l'impédance en fonction de la fréquence et la variation temporelle de la tension de sortie dans les deux types de sol. Nous considérons les deux cas de figures : le cas où la tige est enterrée entièrement dans la couche supérieure et le cas où elle traverse les deux couches.

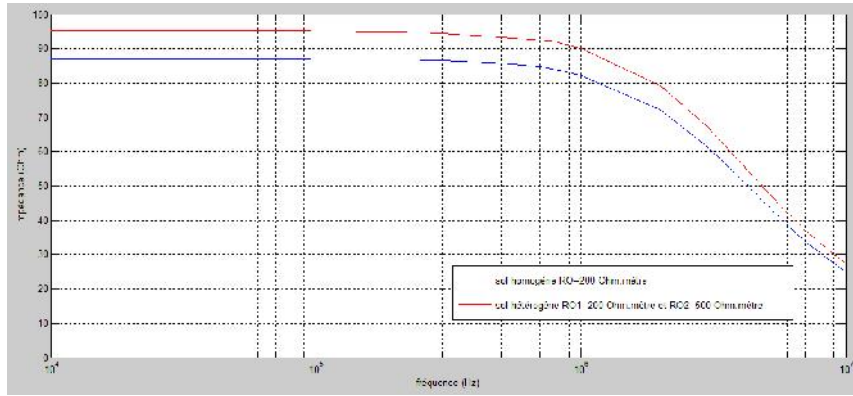
### III.2. Tige située dans la couche supérieure

#### III.2.1. Impédance en fonction de la fréquence

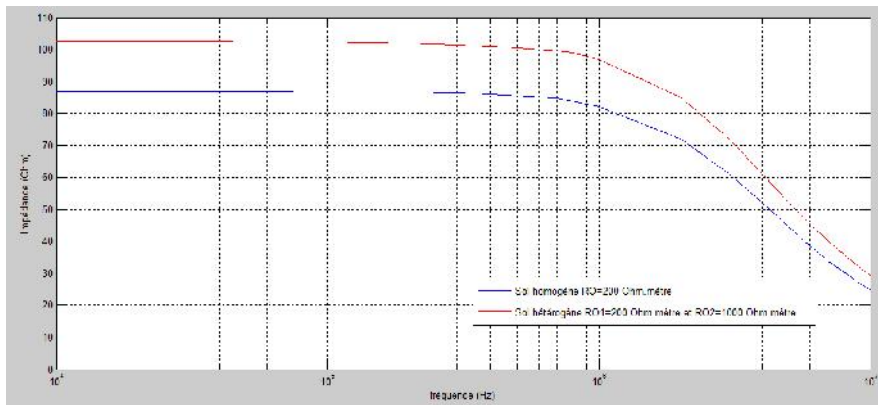
Nous faisons une comparaison de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence dans les sept cas présentés dans le tableau V.2. Ainsi, nous obtenons les figures V.21.a, V.21.b, V.21.c, V.21.d, V.21.e, V.21.f, V.21.g.

	Sol homogène	Sol hétérogène
1 <sup>er</sup> cas	= 200 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 200 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 500 $\Omega$ m
2 <sup>ème</sup> cas	= 200 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 200 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 1000 $\Omega$ m
3 <sup>ème</sup> cas	= 500 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 500 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 200 $\Omega$ m
4 <sup>ème</sup> cas	=500 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 500 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 1000 $\Omega$ m
5 <sup>ème</sup> cas	= 1000 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 1000 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 200 $\Omega$ m
6 <sup>ème</sup> cas	= 1000 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 1000 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 500 $\Omega$ m
7 <sup>ème</sup> cas	= 1000 $\Omega$ m	$\rho_1$ = 1000 $\Omega$ m et $\rho_2$ = 2000 $\Omega$ m

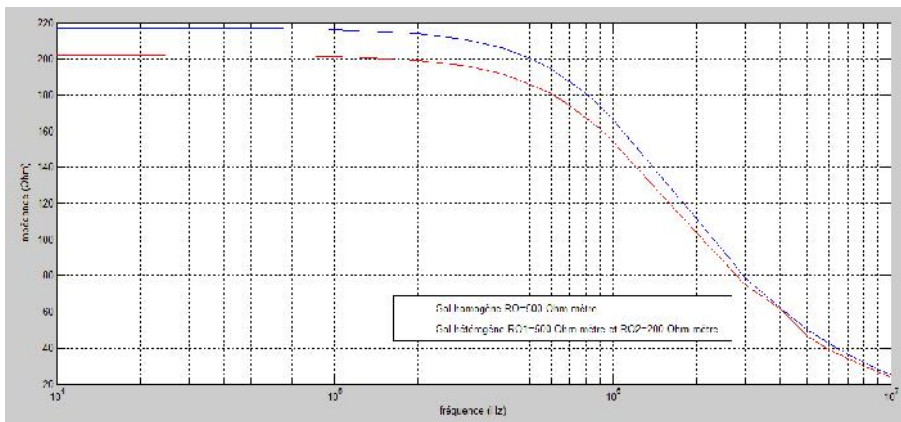
Tableau III.1 : les sept cas de comparaison



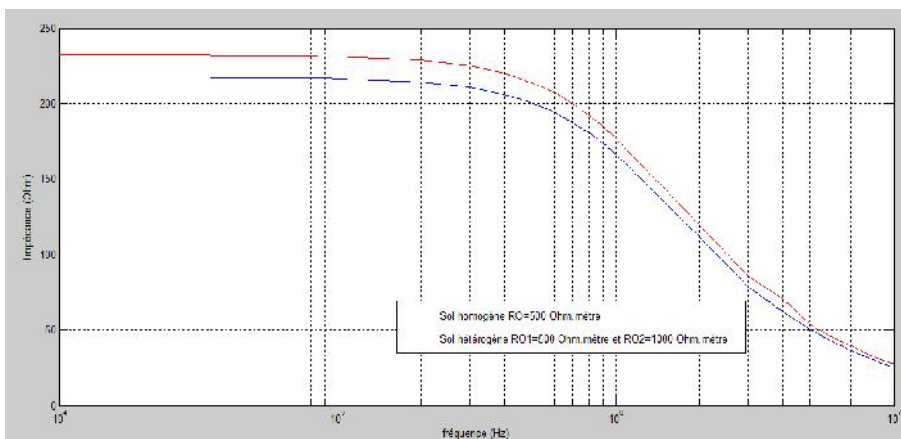
(a) :  $h = 200$  hm ;  $RO_1 = 200$  hm et  $RO_2 = 500$  hm



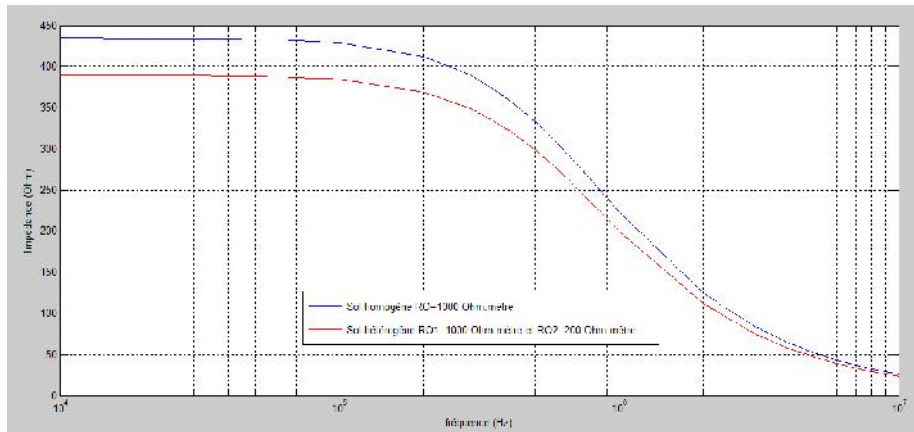
(b) :  $h = 200$  hm ;  $RO_1 = 200$  hm et  $RO_2 = 1000$  hm



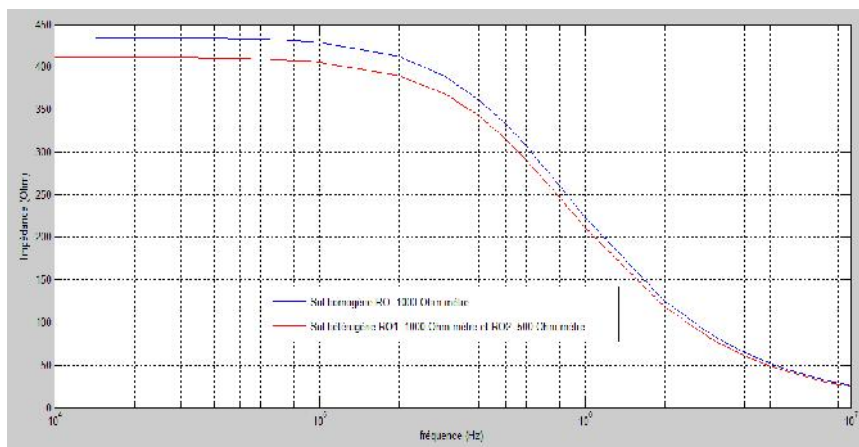
(c) :  $h = 500$  hm ;  $RO_1 = 500$  hm et  $RO_2 = 200$  hm



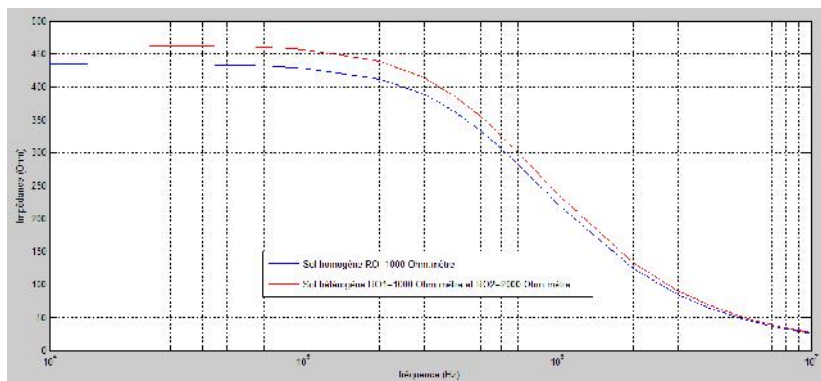
(d) :  $h = 500$  hm ;  $RO_1 = 500$  hm et  $RO_2 = 1000$  hm



(e) :  $h = 1000$  hm ;  $h_1 = 1000$  hm et  $h_2 = 200$  hm



(f) :  $h = 1000$  hm ;  $h_1 = 1000$  hm et  $h_2 = 500$  hm



(g) :  $h = 1000$  hm ;  $h_1 = 1000$  hm et  $h_2 = 2000$  hm

**Figure III.1 : Comparaison entre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le cas d'un sol homogène et un sol hétérogène à deux couches (la tige est située dans la couche supérieure),**

Nous préférons rappeler les expressions de l'impédance dans le cas d'un sol homogène et dans un sol hétérogène qui nous aident à mieux interpréter les caractéristiques précédentes :

- Pour un sol homogène l'impédance est calculée par la formule suivante :

$$|Z| = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) ; \text{ Avec : } \frac{|E|}{|J|}$$

- Pour un sol hétérogène (la tige est entièrement située dans la couche supérieure) :

$$|Z| = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[ \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left( \frac{\frac{nz}{l} + 1}{\frac{nz}{l} - 1} \right) \right]; \quad k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

avec :  $\rho_1 = \frac{|E_1|}{|J_1|}$  et  $\rho_2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$

Selon les valeurs de  $\rho_1$  et  $\rho_2$  le facteur de réflexion  $k$  prend une valeur positive ou négative. Lorsque  $k$  est positif, la somme (comprenant ce facteur  $k$ ) possède une valeur positive. Cependant, quand  $k$  est négatif, nous ne pouvons pas nous prononcer ; car la somme globale, constituant de termes alternés, peut être positive ou négative.

D'après les figures précédentes, nous remarquons que l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus grande que celle d'un sol homogène dans les cas où  $\rho_2 > \rho_1$  suivants :

- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 500 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 2000 \Omega\text{m}$ .

Du fait que  $\rho_2$  est supérieur que  $\rho_1$ , le facteur  $k$  ainsi que la somme globale sont positifs. Ce qui explique que l'impédance dans le cas hétérogène est plus grande que dans le cas homogène.

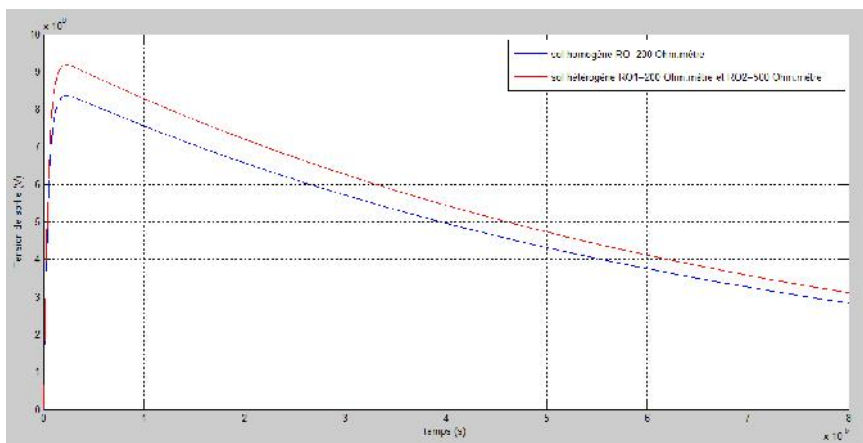
En revanche pour les cas où  $\rho_2 < \rho_1$  suivants, l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus faible que celle d'un sol homogène :

- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 200 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 200 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 500 \Omega\text{m}$ .

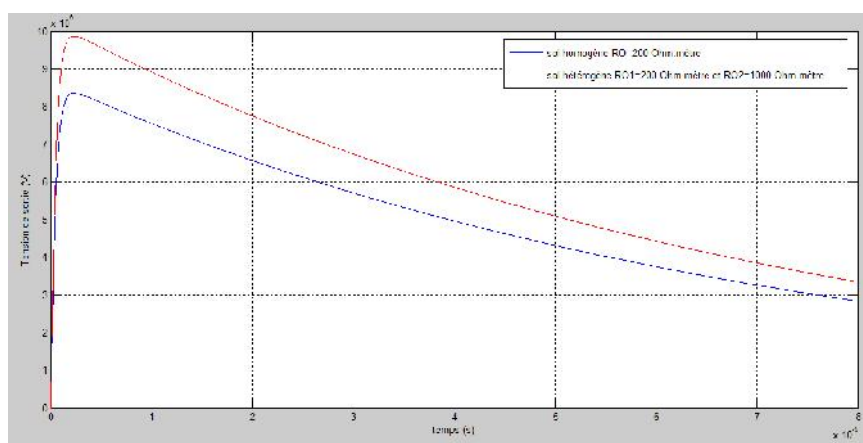
Dans ces conditions le facteur  $k$  est négatif, la somme globale l'est également. C'est pour cette raison que l'impédance dans le sol hétérogène est trouvée inférieure que dans le sol homogène.

### III.2.2 : Variation temporelle de la tension de sortie

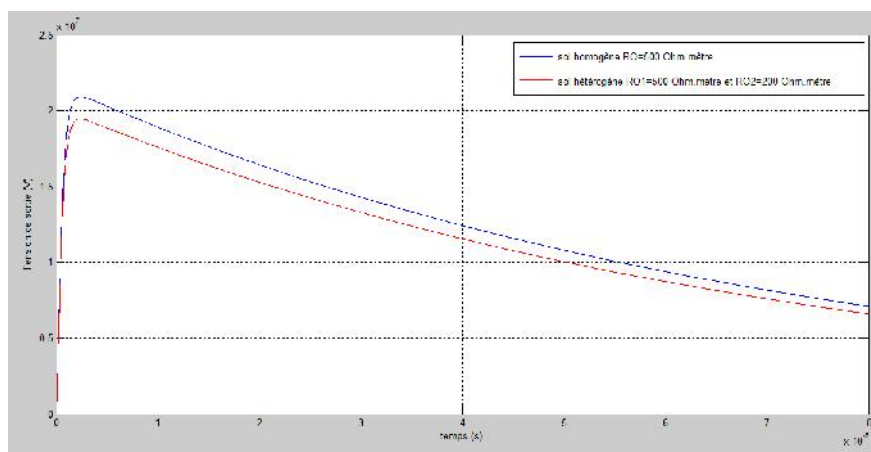
Les figures III.2.a, III.2.b, III.2.c, III.2.d, III.2.e, III.2.f et III.2.g illustrent les variations de la tension de sortie de la tige de terre subissant un choc de foudre pour les deux types de sol (sol homogène et sol hétérogène à deux couches). La tige est entièrement enfouie dans la couche supérieure. Nous faisons une étude comparative des résultats en considérant les 7 cas présentés dans le tableau III.1.



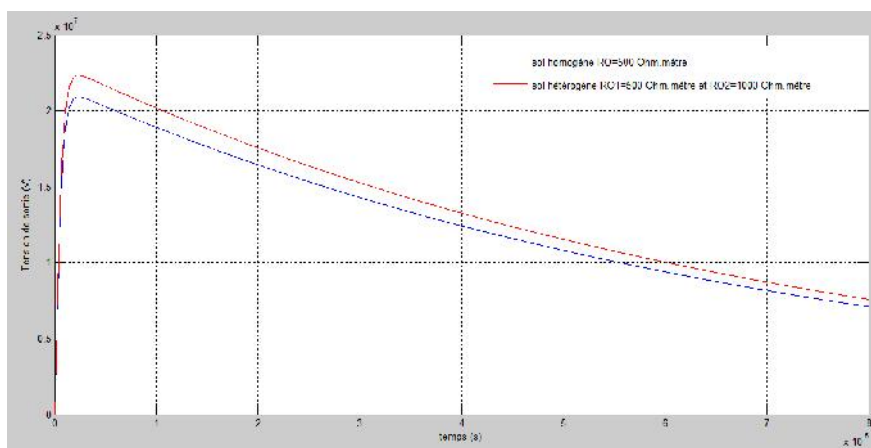
(a) :  $h = 200$  hm ;  $h_1 = 200$  hm et  $h_2 = 500$  hm



(b) :  $h = 200$  hm ;  $h_1 = 200$  hm et  $h_2 = 1000$  hm

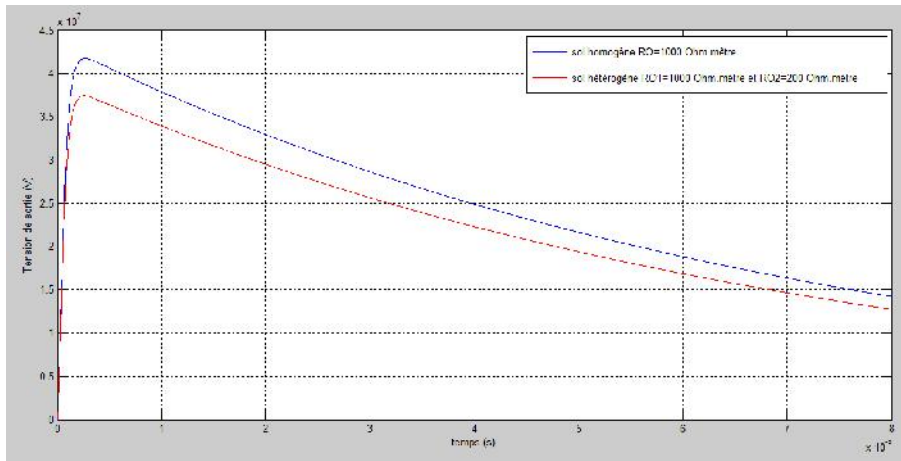


(c) :  $h = 500$  hm ;  $h_1 = 500$  hm et  $h_2 = 200$  hm

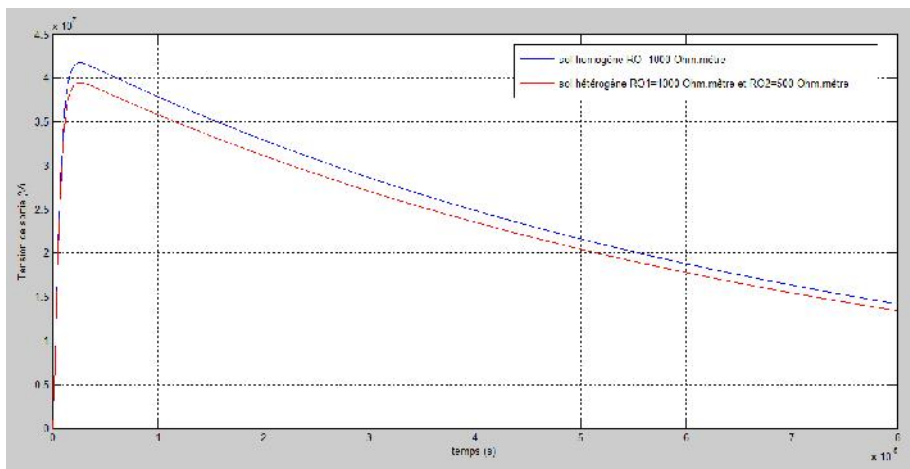


(d) :  $h = 500$  hm ;  $h_1 = 500$  hm et  $h_2 = 1000$  hm

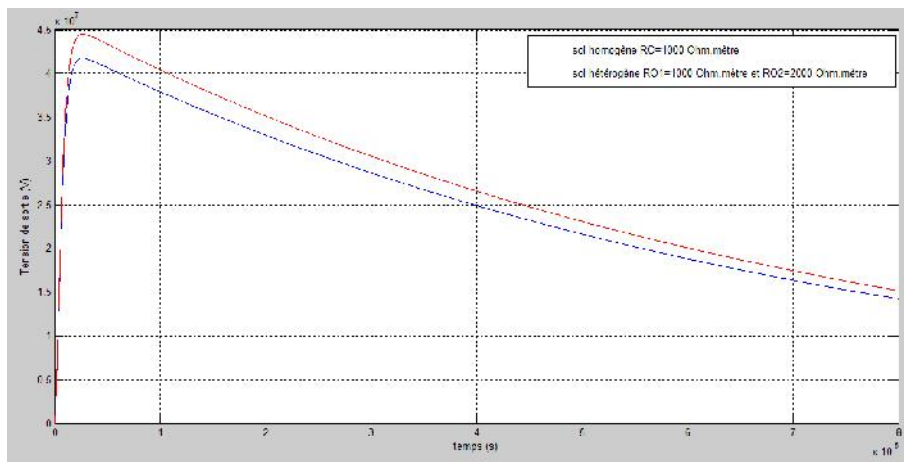




(e) :  $\rho_1 = 1000 \text{ hm}$  ;  $\rho_2 = 1000 \text{ hm}$  et  $\rho_3 = 200 \text{ hm}$



(f) :  $\rho_1 = 1000 \text{ hm}$  ;  $\rho_2 = 1000 \text{ hm}$  et  $\rho_3 = 500 \text{ hm}$



(g) :  $\rho_1 = 1000 \text{ hm}$  ;  $\rho_2 = 1000 \text{ hm}$  et  $\rho_3 = 2000 \text{ hm}$

**Figure III.2 : Comparaison entre la tension de sortie du circuit équivalent dans le cas d'un sol homogène et dans le cas d'un sol hétérogène à deux couches (la tige est située dans la couche supérieure),  $\epsilon_r=30$**

Les mêmes remarques déjà faites pour l'impédance de mise à la terre, sont valables pour la tension de sortie. En effet, cette tension, suite à un choc de foudre, est plus grande dans un sol hétérogène que dans un sol homogène, si le premier possède une résistivité  $\rho_2$  plus importante que

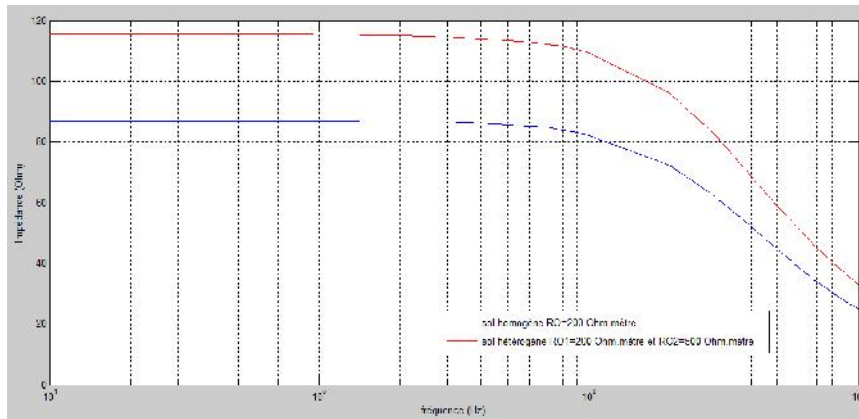


1. Dans le cas contraire, la tension de sortie est plus faible dans le sol hétérogène que celle dans le sol homogène.

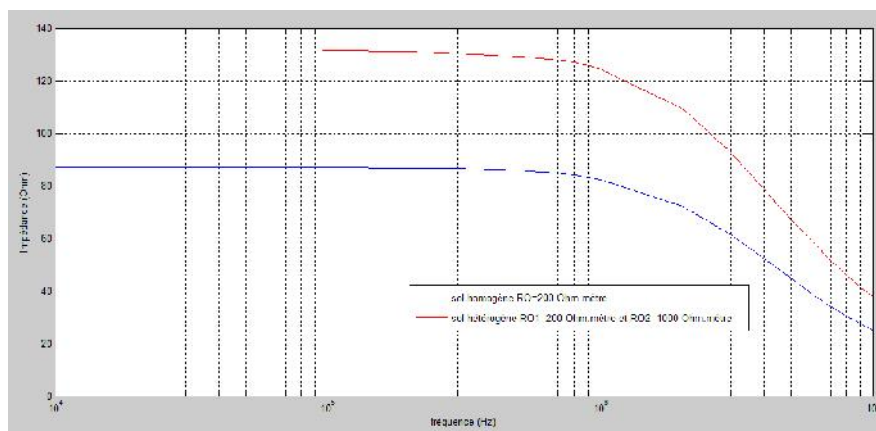
### III.3. Tige traversant les deux couches

#### III.3.1. Impédance en fonction de la fréquence

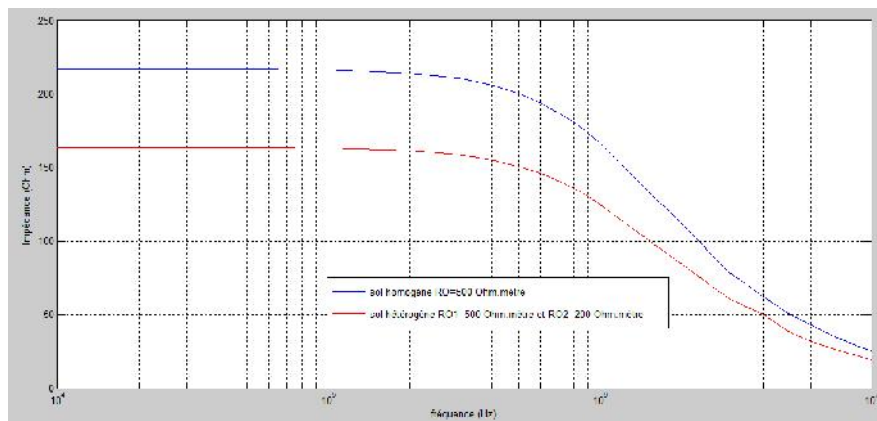
Dans cette section, nous confrontons, pour les sept cas mentionnés dans le tableau V.2, les valeurs de l'impédance d'une tige de terre traversant deux couches de résistivités différentes, avec celles obtenues lorsque le sol homogène. Les figures III.3.a, III.3.b, III.3.c, III.3.d, III.3.e, III.3.f et III.3.g illustrent de telles comparaisons.



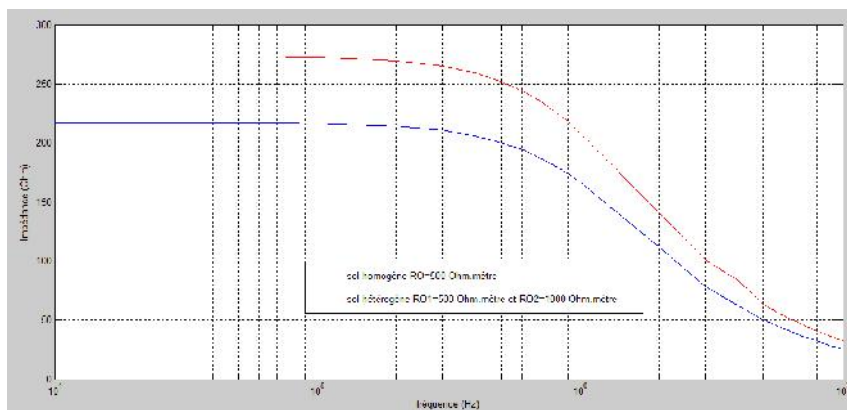
(a) :  $l = 200 \text{ hm}$  ;  $r_1 = 200 \text{ hm}$  et  $r_2 = 500 \text{ hm}$



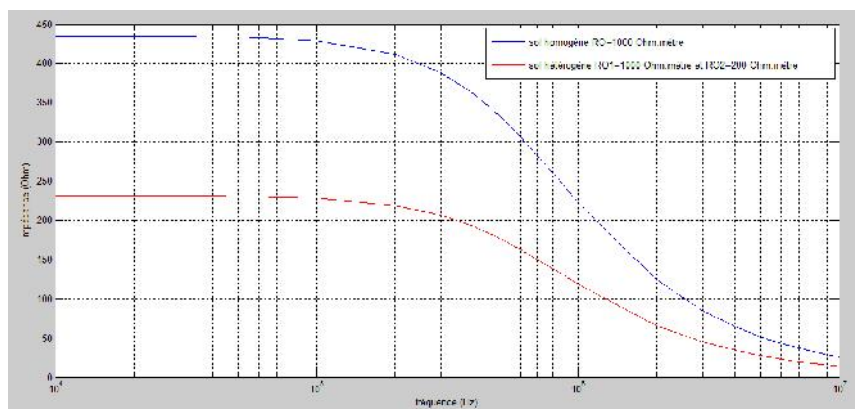
(b) :  $l = 200 \text{ hm}$  ;  $r_1 = 200 \text{ hm}$  et  $r_2 = 1000 \text{ hm}$



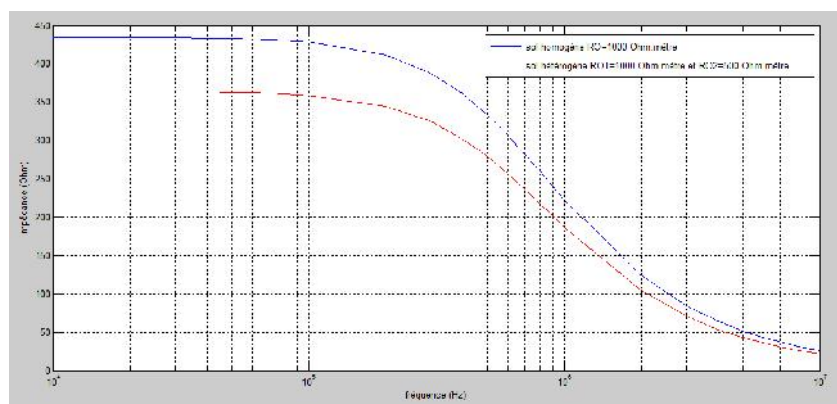
(c) :  $l = 500 \text{ hm}$  ;  $r_1 = 500 \text{ hm}$  et  $r_2 = 200 \text{ hm}$



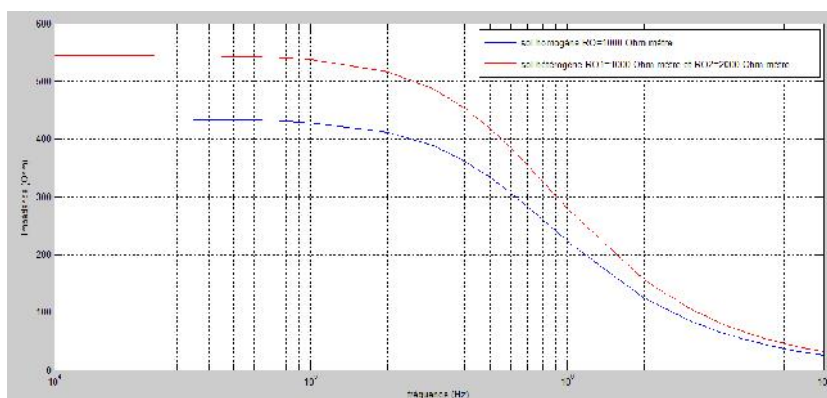
(d) :  $h = 500$  hm ;  $r_1 = 500$  hm et  $r_2 = 1000$  hm



(e) :  $h = 1000$  hm ;  $r_1 = 1000$  hm et  $r_2 = 200$  hm



(f) :  $h = 1000$  hm ;  $r_1 = 1000$  hm et  $r_2 = 500$  hm



(g) :  $h = 1000$  hm ;  $r_1 = 1000$  hm et  $r_2 = 2000$  hm

Figure III.3 : Comparaison entre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le cas d'un sol homogène et un sol hétérogène à deux couches (la tige traverse les deux couches),  $r_1=30$

Nous préférons rappeler les expressions de l'impédance dans le cas d'un sol homogène et dans un sol hétérogène qui nous aident à mieux interpréter les caractéristiques précédentes :

- Pour un sol homogène l'impédance est calculée par la formule suivante :

$$|Z| = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) ; \text{ Avec : } \rho = \frac{|E|}{|J|}$$

- Pour un sol hétérogène (la tige pénétrant dans la couche inférieure) :

$$|Z| = \frac{|E_1|}{|J_1| \cdot 2\pi l} \frac{(1+k)}{\left[ (1-k) + 2k \frac{z}{l} \right]} \left[ \ln \left( \frac{2l}{r} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left( \frac{2nz+l}{2z(n-1)+l} \right) \right]$$

$$\text{avec : } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} ; \rho_1 = \frac{|E_1|}{|J_1|} \text{ et } \rho_2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$$

De même que précédemment, l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus grande que celle d'un sol homogène dans les cas où  $\rho_2 > \rho_1$  suivants :

- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 500 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 2000 \Omega\text{m}$ .

Cependant, l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus faible que celle d'un sol homogène, pour les cas correspondant à  $\rho_2 < \rho_1$  suivants :

- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 200 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 200 \Omega\text{m}$  ;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_3 = 500 \Omega\text{m}$ .

Cette impédance dépend de l'interface des deux couches caractérisée par le facteur de réflexion

$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ . L'écart entre les valeurs des impédances (obtenues respectivement dans les cas de sols

homogène et hétérogène) augmente avec la valeur absolue de k.

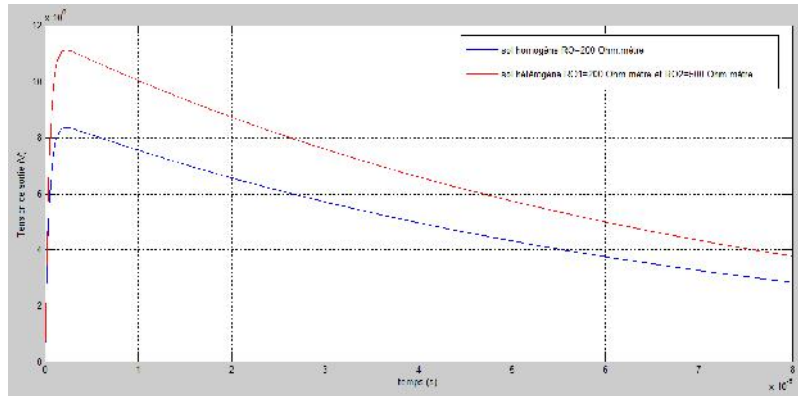
Prenons comme exemple les figures V.23.e et V.23.f, nous remarquons que pour une fréquence de 10 kHz, l'écart entre les courbes est de :

- 203,4  $\Omega$  quand  $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$ , c'est-à-dire  $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = -0,66$  ;
- 70,7  $\Omega$  quand  $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$ , c'est-à-dire  $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = -0,33$ .

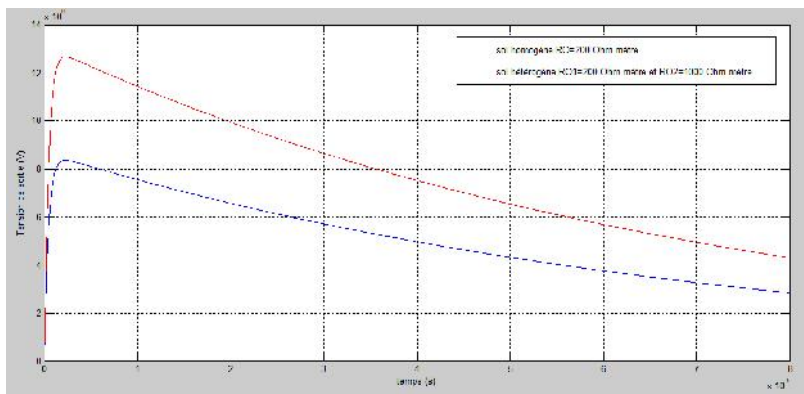
### III.3.2. Variation temporelle de la tension de sortie

Les figures III.4.a, III.4.b, III.4.c, III.4.d, III.4.e, III.4.f et III.4.g montrent les tensions de sortie du circuit équivalent du système de mise à la terre, suite à un choc de foudre. Les deux cas suivants ont été considérés : tige enfouie dans un sol homogène, tige qui traverse deux couches de résistivités différentes.

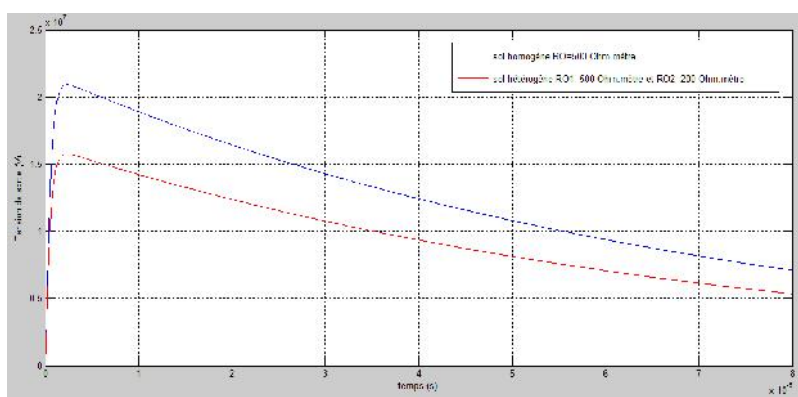
Nous comparons les résultats ainsi trouvés pour les 7 cas mentionnés dans le tableau V.2.



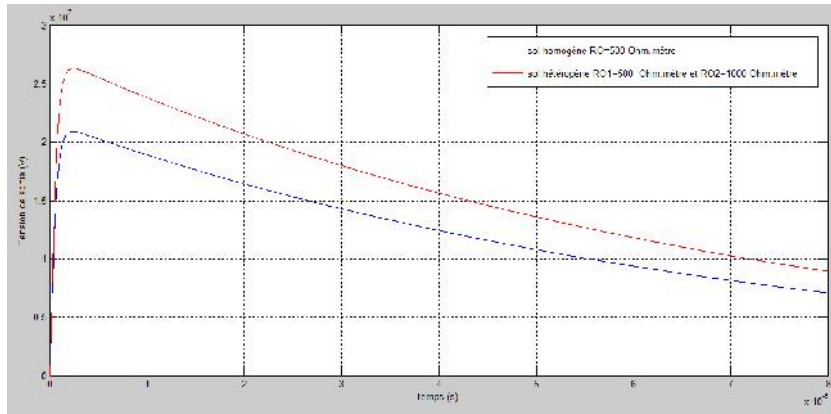
(a) :  $\rho = 200 \text{ hm} ; \rho_1 = 200 \text{ hm et } \rho_2 = 500 \text{ hm}$



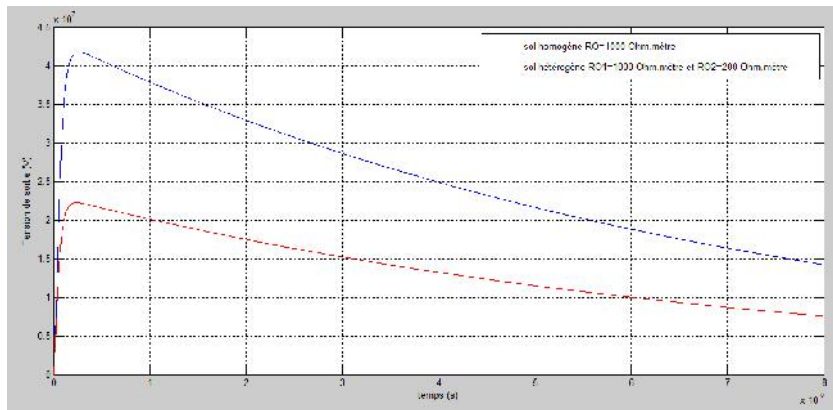
(b) :  $\rho = 200 \text{ hm} ; \rho_1 = 200 \text{ hm et } \rho_2 = 1000 \text{ hm}$



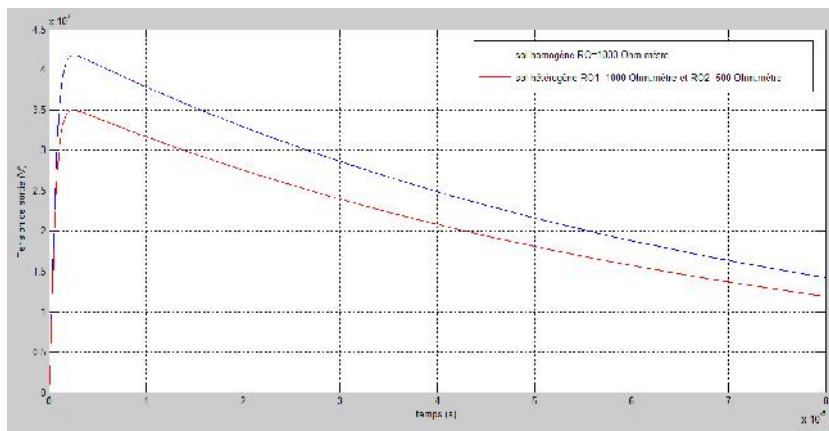
(c) :  $\rho = 200 \text{ hm} ; \rho_1 = 500 \text{ hm et } \rho_2 = 200 \text{ hm}$



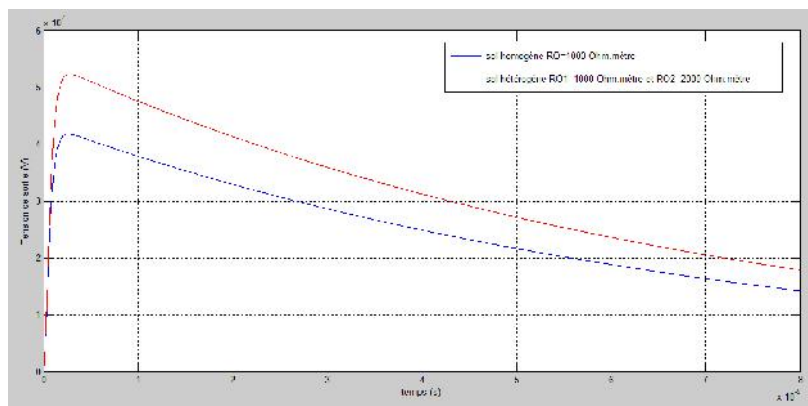
(d) :  $h_m = 500$  hm ;  $r_1 = 500$  hm et  $r_2 = 1000$  hm



(e) :  $h_m = 1000$  hm ;  $r_1 = 1000$  hm et  $r_2 = 200$  hm



(f) :  $h_m = 1000$  hm ;  $r_1 = 1000$  hm et  $r_2 = 500$  hm



(g) :  $h_m = 1000$  hm ;  $r_1 = 1000$  hm et  $r_2 = 2000$  hm

Figure III.4 : Comparaison entre la tension de sortie du circuit équivalent dans le cas d'un sol homogène et dans le cas d'un sol hétérogène à deux couches (la tige traverse les deux couches),  $r_1=30$

Nous pouvons relever les mêmes constatations relatives à l'impédance de mise à la terre faites précédemment. En effet, suite à un choc de foudre, la tension de sortie est plus grande dans un sol hétérogène, que celle trouvée dans le cas d'un sol homogène, si  $\rho_2$  (la résistivité de la couche inférieure du sol hétérogène) est supérieur  $\rho_1$  (la résistivité à la fois du sol homogène et de la de couche supérieure du sol hétérogène). Dans le cas contraire, la tension de sortie est plus faible dans le sol hétérogène que celle dans le sol homogène.

# Conclusion générale



## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement d'une tige de terre verticale dans deux types de sol ; homogène et hétérogène à deux couches de résistivité différentes ( $\rho_1$  la résistivité de la couche supérieure et  $\rho_2$  la résistivité de la couche inférieure du sol). Pour le sol hétérogène, deux cas pour l'emplacement de la tige se présentent; (i) tige enfouie dans la couche supérieure, (ii) tige pénétrant dans la deuxième couche.

Pour un sol homogène, l'impédance de la tige de terre augmente avec la résistivité. Cette impédance, initialement constante, n'augmente avec la diminution de la permittivité, qu'au-delà de la fréquence de coupure. Cette dernière dépend des caractéristiques du sol ; elle diminue avec l'augmentation de la résistivité et de la permittivité du sol.

Dans le cas d'un sol hétérogène étudié, il est évident que l'impédance est affectée par les deux résistivités des ses deux couches. Elle augmente avec l'une ou l'autre ou les deux. Cette impédance est beaucoup plus influencée par la résistivité de la couche supérieure que celle de la couche inférieure, lorsque la tige est enterrée dans la couche supérieure. Cependant, dans le cas où cette tige pénètre dans la couche inférieure, toute variation de l'une des deux résistivités affecte grandement l'impédance.

Supposons un sol hétérogène dont la résistivité de la couche supérieure est identique à celle d'un sol homogène. Supposons également que la résistivité de la couche inférieure est plus importante que celle de la couche supérieure. Dans ces conditions, l'impédance équivalente augmente. Dans le cas contraire, elle diminue. Ceci est valable quelque soit l'emplacement de la tige dans le sol.

La modélisation de notre système de terre par un circuit électrique composé d'une simple résistance en parallèle avec une capacité, a été validée pour tous les cas étudiés. Dans ces conditions, la tension de sortie du circuit électrique équivalent que nous avons trouvée lors de l'application d'une onde de courant de foudre, possède un même comportement que celui de l'impédance en fonction des caractéristiques électriques des sols.

## Bibliographie

Alain Charoy, « *Compatibilité électro-magnétique* », Dunod, 2005, 701 p

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

Bensoam M., « Qualité de la prise de terre et sécurité des personnes », Cours, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, octobre 2003

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.

Biddle C., « Manual of Ground Resistance Testing », Megger, Ground testers, Catalogue de produits, December 1947.

Boubakeur.A, « cours de techniques de la haute tension 4<sup>ème</sup> année Electrotechnique », Ecole Nationale Polytechnique, Département de l'électrotechnique, laboratoire de haute tension, 2012.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Protection Contre la Foudre-Partie 1: Principes Généraux », CEI 62305-01, Première édition 2006-01.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Installations électriques des bâtiments, choix et mise en oeuvre des matériels électriques – Mises à la terre, conducteurs de protection et d'équipotentialité », CEI 60364-5-54, 2<sup>ème</sup> édition 2002-06.

CIGRE, "Guide to procedure for estimating the lightning performance of transmission lines", Working Group 01 (lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), octobre 1991.

C.Gary, "51, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Collection de la Direction des Etudes et Recherches d' Electricité de France, éditions Eyrolles, pp 231-250, 1984.

CIGRE, "Cloud-to-ground lightning parameters derived from lightning detection systems, the effects of System Performance", draft document, CIGRE task Force C4.404A, juin 2007.

Chouteau M. & Giroux B., « Géophysique appliquée II : Méthodes électriques - Notes de cours », Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 148, 2006.

Chauvin Arnoux Group, « Guide de la Mesure de Terre : Contrôleurs de Terre et/ou de Résistivité », Catalogue de produits, Première édition 2010. Site internet : [www.chauvinarnoux.fr](http://www.chauvinarnoux.fr)

Chong Kiat Ng, « Simplified numerical based method for calculation of dc ground electrode resistance in multi-layered earth », Thesis of Master of Science, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada, June 2000.