

# Modélisation du champ électromagnétique rayonné par l'arc en retour subséquent de foudre – approche d'analyse

A. CHAHMI

Entreprise de Construction et Réparation Navale, Mars el-Kebir, Oran  
chahmi\_g@yahoo.fr

**RESUME**—Plusieurs travaux, sont réalisés, dans le cadre de la modélisation du champ électromagnétique rayonné par l'arc en retour subséquent de foudre, l'objectif de cette communication est d'étudier les aspects théoriques lié au calcul du champ électromagnétique.

Ce calcul s'appuie sur distribution du courant à la base et le long du canal de foudre ainsi, pour effectuer ce calcul nous avons été amenés à choisir la forme du courant à la base du canal de foudre. A cet effet une analyse comparative des différents modèles dits d'ingénieurs à été effectuée. A l'issue de cette analyse, le modèle « MTL » à été retenue. Les résultats obtenus, validés par des résultats expérimentaux, montre que les approches d'analyse et les outils informatiques utilisés sont satisfaisants.

**MOTS-CLES**— *Perturbation électromagnétique, foudre, champ électrique vertical, Champ électrique azimutal, Modèle ligne de transmission.*

## I. INTRODUCTION

Le recours à des outils numériques pour l'analyse des problèmes de CEM est devenu une nécessité croissante afin d'avoir des résultats réalistes à partir de modèles établis. Le calcul du champ électromagnétique constitue dans ce sens un grand pôle d'intérêt. L'enjeu de telles études est la mise en œuvre d'outils numériques pour l'ingénieur afin d'analyser les perturbations induites par ces champs sur les systèmes. En effet ces systèmes deviennent de plus en plus vulnérables aux agressions électromagnétiques.

## II. PHENOMENOLOGIE DE LA FOUDRE

La foudre est un phénomène électrique lié a la formation de nuages électrisés : les nuages d'orage. La foudre n'est qu'une manifestation de l'orage, les deux autres manifestations tout aussi dangereuses, étant les précipitations (pluie et grêles) et le vent. La foudre est une très violente et brève décharge d'électricité, une sorte d'immense étincelle de plusieurs kilomètres de long, qui travers l'espace

## III. Modélisation du courant à la base du canal de la foudre

### A. Modèle de 'Heidler'

$$i(0, t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (1)$$

Avec :

$$i_1(t) = \frac{I_1}{\eta_1} \cdot \left[ \frac{(t/\tau_{11})^{n1}}{1 + (t/\tau_{11})^{n1}} \right] \cdot \exp(-t/\tau_{12}) \quad (2)$$

$$\eta_1 = \exp[-(\tau_1/\tau_2)(n1\tau_1/\tau_2)^{1/n1}]$$

$I_1(I_2)$  : amplitude de  $i_1(i_2)$

$\tau_{11}(\tau_{21})$  : temps de montée de  $i_1(i_2)$

$\tau_{12} \tau_{22}$  : temps de l'impulsion de  $i_1(i_2)$

### B. Bi exponentiel :

$$i(t) = I [\exp(t/\tau_1) - \exp(t/\tau_2)] \quad (3)$$

$$is(t) = I/2 [\exp(t/\tau_1) - \exp(t/\tau_2)] \quad (4)$$

$$\eta_1 = \exp[-(\tau_1/\tau_2)(n1\tau_1/\tau_2)^{1/n1}]$$

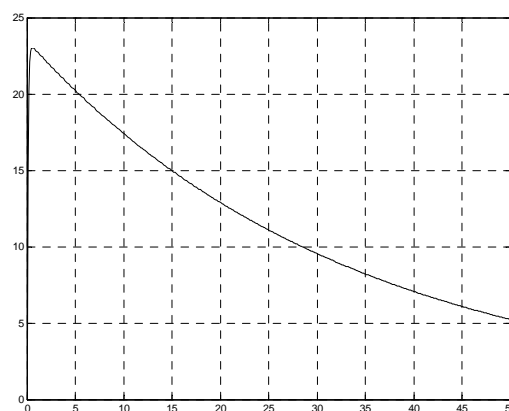


Figure 1 Exemple de courant de foudre à la base du canal obtenu à l'aide des fonctions de Heidler.

Cas 1 (19089501.A2) :

Tableau.1 Paramètres du courant de foudre à la base du canal .  
(  $\lambda = 2$  km et  $v = 1.5 * 10^8$  m/s)

$I_1$ (kA)	$\tau_{11}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{12}$ ( $\mu$ s)	$n_1$	$I_2$ (kA)	$\tau_{21}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{22}$ ( $\mu$ s)	$n_2$
5.2	0.2	1.2	2	5.55	1.9	75	2

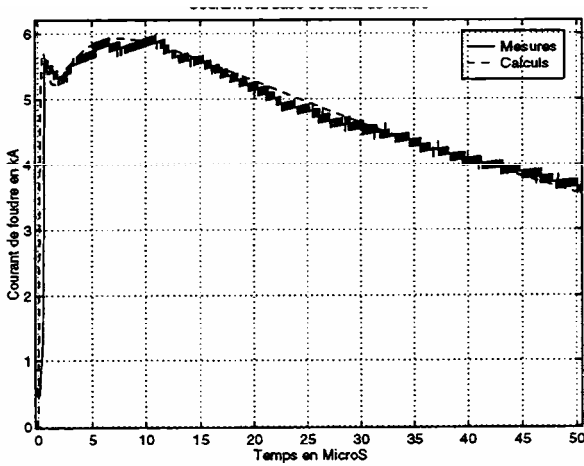


Figure 2 Exemple de courant de foudre à la base de canal (cas1)

Cas 2 (12089504.A2) :

Tableau.2 Paramètres du courant de foudre à la base du canal .  
(  $\lambda = 2$  km et  $v = 1.5 * 10^8$  m/s)

$I_1$ (kA)	$\tau_{11}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{12}$ ( $\mu$ s)	$n_1$	$I_2$ (kA)	$\tau_{21}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{22}$ ( $\mu$ s)	$n_2$
10.5	0.6	0.9	2	7	1.4	14	2

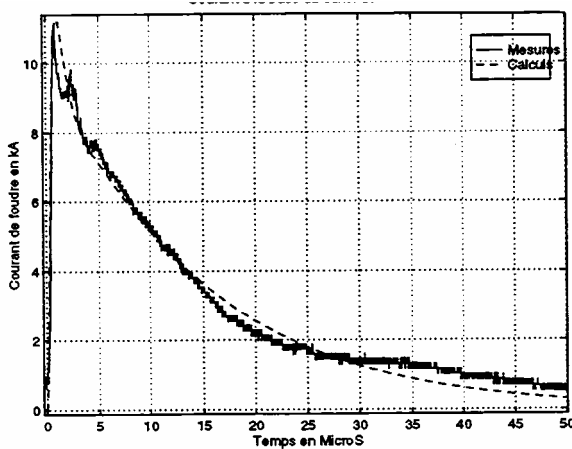


Figure 3 Exemple de courant électrique à la base de canal (cas2)

IV. Modélisation de la distribution du courant de foudre dans le canal

A. Modele MTL (modified transmission line)

$$\left. \begin{aligned} z_c < vt \quad i(z_c, t) &= e^{-(z/\lambda)} \cdot i(0, t - z_c/v) \\ z_c > vt \quad i(z_c, t) &= 0 \\ z_c < vt \quad i(z_c, t) &= 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

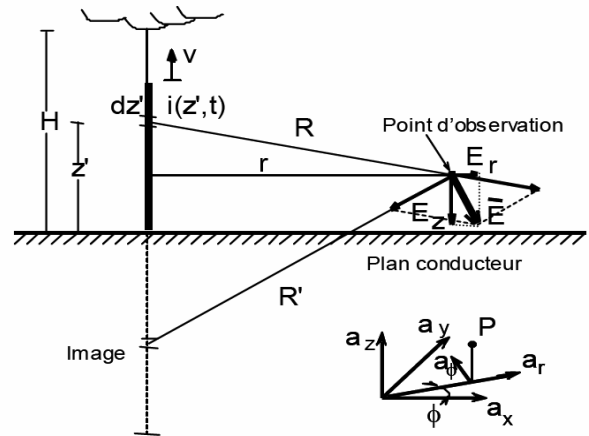
$\lambda$  : Paramètre représentant la décroissance exponentielle du courant dans le canal (sa valeur est comprise dans l'intervalle [1.5, 4] km).

$v$  : Vitesse de propagation de l'arc en retour.

Ce modèle se caractérise par l'introduction d'un paramètre d'atténuation d'allure exponentielle.

V. Calcul du Champ Electromagnétique

Géométrie du problème :



$$\begin{aligned} dE_z(x,y,z,t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \left( \frac{2(z-z_c)^2 - r^2}{cR^4} \cdot i(z_c, t - R/c) \right) \right. \\ &+ \left( \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i}{\partial t} (z_c, \tau - R/c) \right) \\ &+ \left. \left( \frac{2r(z-z_c)^2}{R^5} \cdot \int_0^t i(z_c, \tau - R/c) d\tau \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} dEr(x,y,z,t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \left( \frac{3(z-z_c)^2}{cR^4} \cdot i(z_c, t - R/c) \right) \right. \\ &+ \left( \frac{r(z-z_c)^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i}{\partial t} (z_c, \tau - R/c) \right) \\ &+ \left. \left( \frac{2r(z-z_c)^2}{R^5} \cdot \int_0^t i(z_c, \tau - R/c) d\tau \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$dB(x,y,z,t) = \frac{\mu_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \left( \frac{r}{R^3} \cdot i(z_c, t - R/c) \right) + \left( \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i}{\partial t} (z_c, \tau - R/c) \right) \right] \quad (8)$$

avec

$$R = \sqrt{r^2 + (z' - z)^2} \quad (9)$$

Tableau.3 Paramètres du courant de foudre à la base du canal .  
( $\lambda = 2 \text{ km}$  et  $v = 1.5 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

$I_1$ (kA)	$\tau_{11}$ ( $\mu\text{s}$ )	$\tau_{12}$ ( $\mu\text{s}$ )	$n_1$	$I_2$ (kA)	$\tau_{21}$ ( $\mu\text{s}$ )	$\tau_{22}$ ( $\mu\text{s}$ )	$n_2$
10.5	2	4.8	2	9	20	26	2

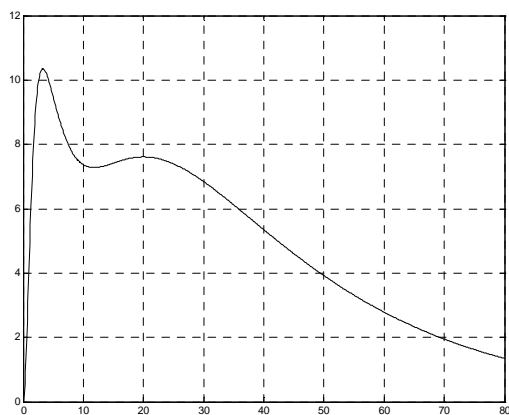


Figure 5 Courant de foudre à la base de canal

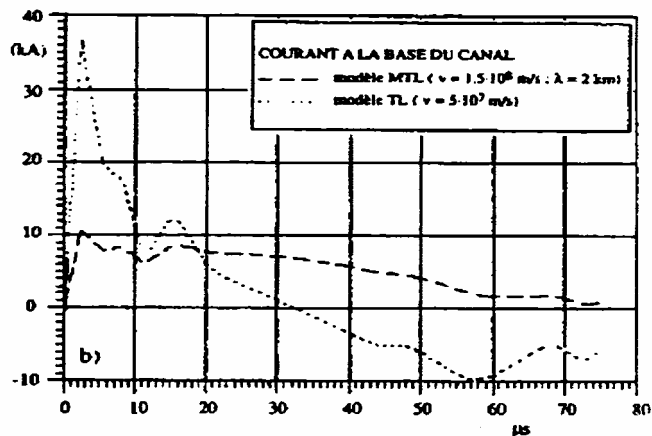
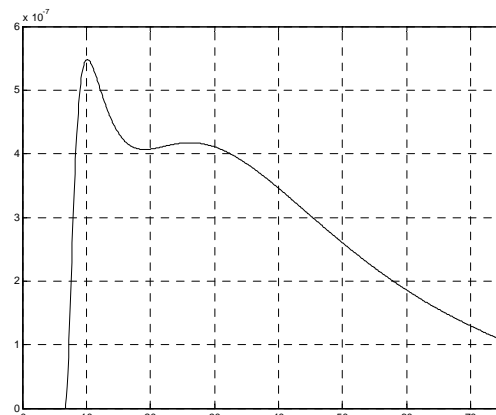
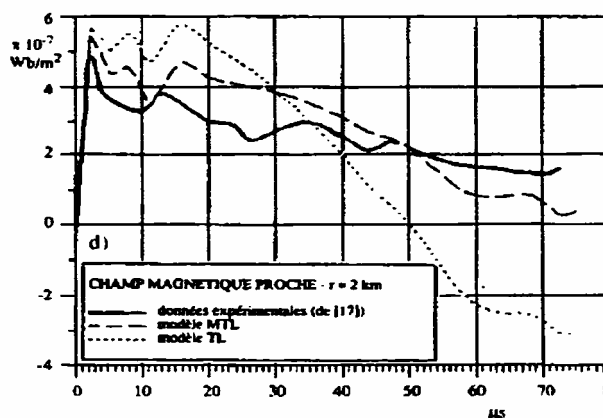


Figure 6 Courant de foudre à la base de canal issue de [2]

La comparaison de ces deux résultats montre un bon accord, ce qui permet de valider l'approche théorique a adoptée par le courant à la base du canal

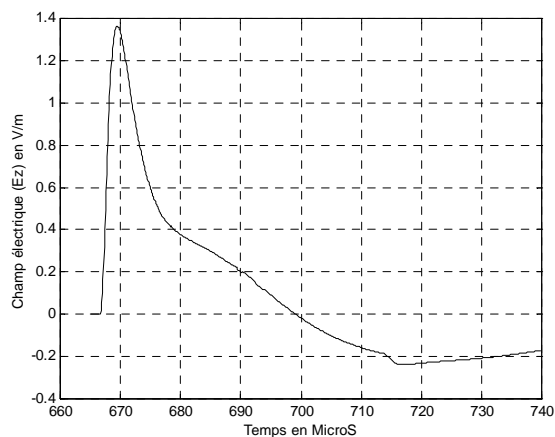


(a)

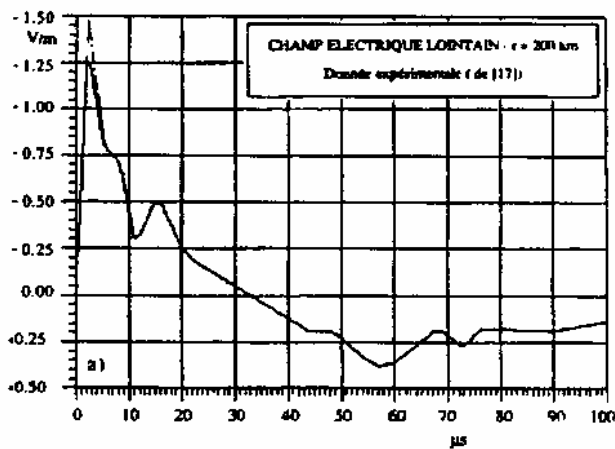


(b)

Figure 7 Champ magnétique azimuthal à 2km (a : courbe obtenue par simulation, b : courbe expérimentale)

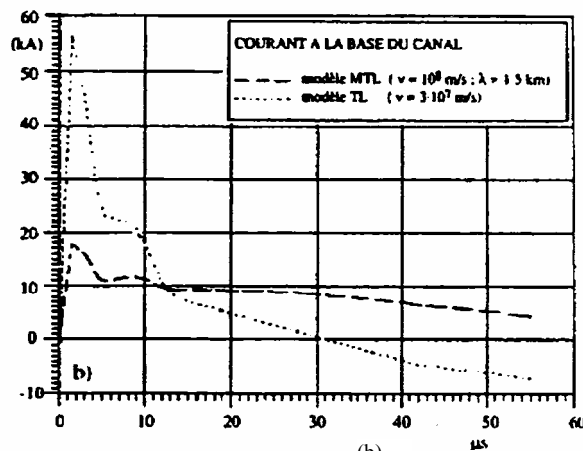


(a)



(b)

Figure 8 Champ électrique vertical lointain (a : courbe obtenue par simulation, b : courbe expérimentale)



(b)

Figure 10 Courant de foudre à la base de canal

(a)

Tableau.4 Paramètres du courant de foudre à la base du canal .

(  $\lambda = 1,5 \text{ km}$  et  $v = 110^8 \text{ m/s}$ )

$I_1(\text{kA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	$n_1$	$I_2(\text{kA})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	$n_2$
19.5	1	2	2	12	8	30	2

La comparaison de ces deux résultats montre un bon accord, ce qui permet de valider l'approche théorique adoptée par le courant à la base du canal. Dans les figures suivantes nous représentons respectivement les allures du champ magnétique azimutal calculé et mesuré pour une distance du point d'impact égale à 9Km. La comparaison des résultats présentés montre une bonne concordance notamment en ce qui concerne le premier pic.

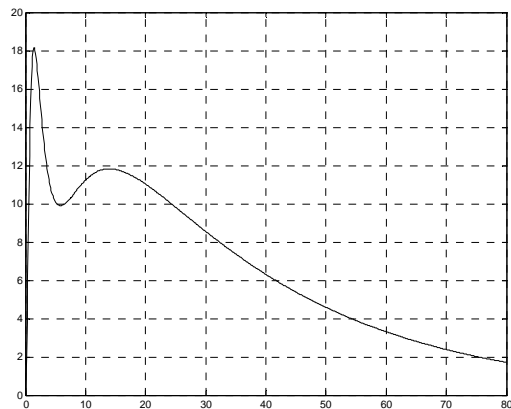
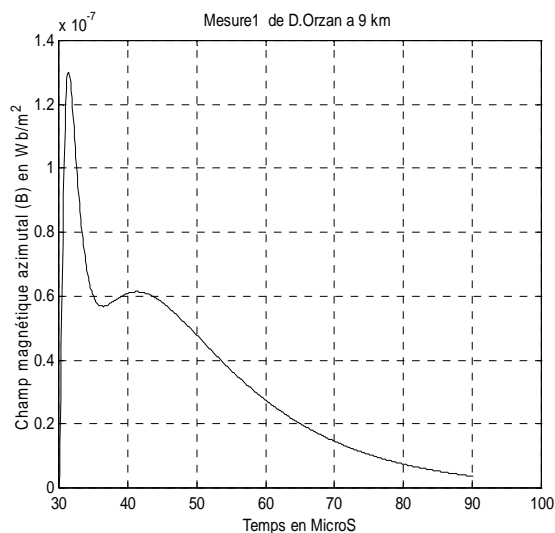
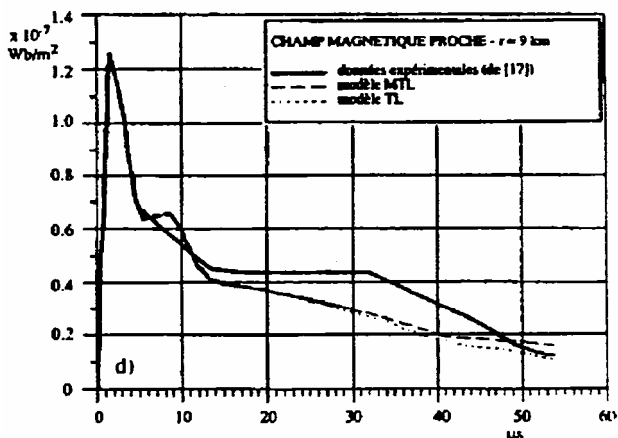


Figure 9 Courant de foudre à la base de canal

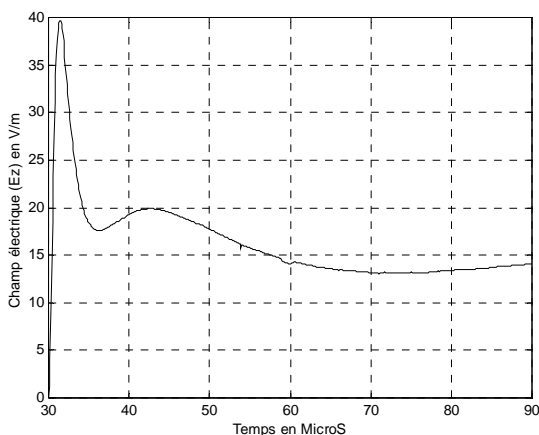


(a)

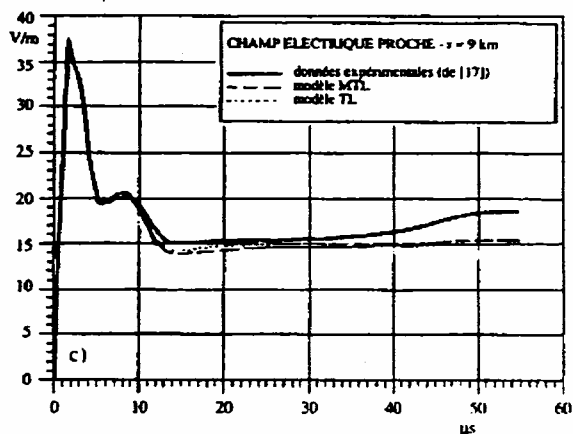


(b)

Figure 11 Champ magnétique azimuthal à 2km (a : courbe obtenue par simulation, b : courbe expérimentale)



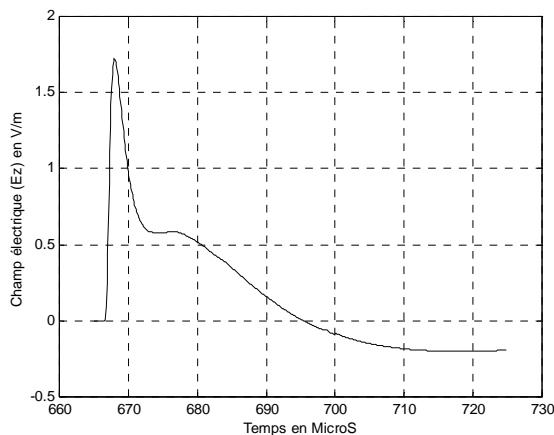
(a)



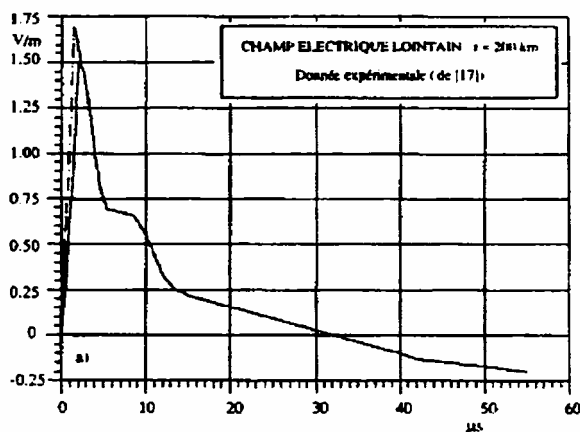
(b)

Figure 12 Champ électrique vertical à 9 km (a : courbe obtenue par simulation, b : courbe expérimentale)

Dans les figures suivantes nous représentons l'allure du champ électrique vertical calculé et mesuré à 200Km la confrontation des résultats montre que pour cette distance lointaine l'allure du champ mesuré est retrouvée par le calcul.



(a)



(b)

Figure 13 Champ électrique vertical lointain (a : courbe obtenue par simulation, b : courbe expérimentale)

## VI. CONCLUSION

Le calcul du champ électromagnétique rayonné par la phase d'arc en retour d'un coup de foudre descendant a été effectué avec succès. La mise en œuvre informatique de ce calcul a été réalisée en développant un programme de simulation sous environnement MATLAB qui offre une convivialité très intéressante. Les résultats obtenus permettent d'envisager le calcul des surtensions induites, par couplage électromagnétique, dans les lignes de transport d'énergie.

## REFERENCES

- [1] B.GHEMRI, « Etude et analyse du couplage champ électromagnétique ligne de transmission », Thèse de magister, département électrotechnique, USTO, 2004.
- [2] B.NEDJADI, « Etude de l'effet d'un champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre sur un câble enterré », Thèse de magister, département électrotechnique USTO, 2005.
- [3] Z.AZZOUZ, S.Tabbal, S.Maya, « La compatibilité électromagnétique : concepts de base », journée technique sur la compatibilité, école militaire polytechnique de bordj El bahri. Avril 2002.
- [4] R.Tajer, « Analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par logiciel FLUX2D, projet de fin d'étude, département électrotechnique, USTO, 2002.
- [5] A.CHAHMI, « Modélisation du champ électromagnétique rayonné par l'arc en retour subséquent de foudre-Approche d'analyse », Thèse de magister, USTO, 2007
- [6] P.Degauque, J.Hamelin, « Compatibilité électromagnétique », Edition Dunod, 1990.
- [7] A.Darcherif, « Contribution a la modélisation des phénomènes d'interférences électromagnétiques dans les réseaux électriques », Thèse de doctorat de L'INPG de Grenoble, 1990.
- [8] G.C.Champiot, « Compatibilité électromagnétique-présentation générale ». Technique de l'ingénieur, traité de génie électrique, D1305.