

Etude CEM sur le couplage du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre avec une ligne aérienne

K.Arzag ^{a *}, Z.Azzouz ^b, B.Ghemri ^b, A.Mimouni ^c

^a Université Tahar Moulay Saïda

^b Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, USTO-MB

^c Université Ibn Khaldoun Tiaret

ARTICLE INFO

Article history :
Received November 2013
Accepted January 2014

Keywords :
CEM ;
champ électromagnétique ;
foudre et couplage.

ABSTRACT

Dans cette communication nous présentons une étude CEM portant sur le couplage du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre avec une ligne aérienne. L'étude est basée sur la mise en œuvre des approches théoriques de S. Rusck. Pour mener à bien cette étude nous avons d'abord dû choisir des modèles de représentation du courant dans le canal de foudre et celui du courant à la base du canal. Les modèles que nous avons retenus appartiennent à la famille des modèles dits d'ingénieurs. Nous avons ensuite calculé de manière analytique les composantes du champ électromagnétique rayonné par la foudre. Enfin nous avons calculé, en s'appuyant sur la théorie de Rusck, les surtensions induites par couplage du champ électromagnétique rayonné par la foudre sur une ligne aérienne. Les calculs ont été effectués sous environnement Matlab. Les résultats obtenus par simulation ont été comparés à d'autres résultats tirés de la littérature et ont montré une assez bonne concordance.

©2014 LESI. All right reserved.

1. Introduction

Depuis de nombreuses années, la prise en compte des critères de compatibilité électromagnétique (CEM), constitue une étape essentielle dans la conception des systèmes notamment les installations et ouvrages électriques. Aussi, le développement d'outils numériques permettant le calcul et l'analyse des surtensions induites par la foudre sur les lignes de transmission d'énergie électrique est devenu une nécessité absolue afin d'assurer une bonne qualité de service au consommateur [1,2]. Par ailleurs, l'exploitation des théories décrivant le couplage entre le champ électromagnétique rayonné par la foudre et les lignes de transmission a permis le développement et l'implémentation de plusieurs codes de calcul dans des plateformes reconnues mondialement telles que EMTP/ATP et

*Email : ar_kado2006@yahoo.fr

MATLAB et ceci afin de prendre en compte toutes les complexités rencontrées dans les réseaux électriques actuels [5,7,19,20].

de transmission dans leur majorité s'expriment par des formulations différentes mais toutefois équivalentes. Ainsi, le modèle le plus populaire est celui développé par Taylor, Satterwhite et Harrison dans le cas général d'une ligne illuminée par un champ non uniforme. Les modèles proposés par Agrawal, Price et Gurbaxani ainsi que le modèle de Rachidi sont aussi très utilisés par la communauté scientifique [23]. A noter aussi qu'il existe d'autres formalismes de couplage propres au domaine des réseaux électriques.

Parmi ces derniers, on peut citer le modèle de Rusck et le modèle de Chowdhuri et Gross. Le modèle de Rusck est quant à lui basé sur un formalisme théorique simple permettant de calculer les surtensions induites à l'aide d'expressions analytiques faciles à mettre en œuvre [3]. La mise en œuvre de ce modèle fera l'objet de ce modeste travail à travers une application mettant en relief le couplage d'un champ électromagnétique rayonné par la foudre avec une ligne de transmission qui peut être une ligne de transport d'énergie électrique. Le champ électromagnétique est calculé analytiquement en utilisant les approches de Rusck aussi. Dans ce qui suit nous allons d'abord aborder la modélisation du courant de foudre à savoir le courant à la base du canal de foudre et le courant dans le canal de foudre.

2. Modélisation du courant de foudre

Depuis 1941, plusieurs modèles relatifs à la distribution spatio-temporelle du courant de foudre ont été proposés par la communauté scientifique. Il s'agit de modèles macroscopiques qui ont été développés dans le but d'évaluer le rayonnement électromagnétique d'un canal de foudre [17].

Les modèles de courant d'arc en retour proposés dans la littérature diffèrent l'un de l'autre. En général ils sont classés en quatre grandes classes [29] :

- Les modèles « physiques »
- Les modèles « électromagnétiques »
- Modèles dits « RLC ».
- Modèles dits « d'ingénieurs »,

Dans les modèles d'ingénieurs, la distribution spatio-temporelle du courant dans le canal de foudre est basée sur les caractéristiques observées de l'arc en retour, à savoir le courant à la base du canal et la vitesse de propagation de l'arc en retour le long du canal de foudre.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à cette famille de modèles, pour deux raisons essentielles à savoir :

- le nombre faible de paramètres à traiter.
- l'écriture simple du courant dans le canal de foudre qui est fonction du courant à sa base.

Les modèles d'ingénieurs comprennent les modèles suivants :

- le modèle de Bruce et Golde (BG),
- le modèle de la ligne de transmission (TL),
- le modèle de la ligne de transmission modifiée avec décroissance linéaire (MTLL),
- le modèle de la ligne de transmission modifiée avec décroissance exponentielle (MTLE),
- le modèle de la source de courant mobile (TCS : « Traveling Current Source »)

Les formulations mathématiques des modèles de courant dans le canal de foudre ainsi que ceux du courant à la base du canal, utilisées dans ce travail, seront présentées dans le paragraphe dédié au calcul du champ électromagnétique rayonné par la foudre.

3. Calcul du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre

La géométrie du problème étudié est présentée à la figure 1. Elle comprend le nuage, le canal de foudre, le sol supposé parfaitement conducteur dans une première approximation et le point d'observation noté « P » avec les différentes coordonnées qui lui sont associées par rapport au canal de foudre.

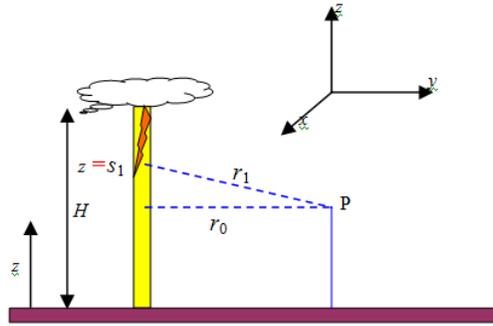


Fig. 1. Géométrie du problème étudié.

Dans ce cas là les composantes du champ électromagnétique à savoir (E_x, E_z) pour le champ électrique et B_y pour le champ magnétique peuvent être calculées analytiquement à l'aide de la formulation suivante (Fig.1) [3,10] :

$$E_x = \frac{\mu_0 \cdot \nu_0 \cdot I_0}{2 \cdot \pi \cdot \beta} \cdot x \cdot z \cdot \left[-\frac{1 - \beta^2}{\xi^3} + \frac{1}{r^3} \right] \quad (1)$$

$$E_z = \frac{\mu_0 \cdot \nu_0 \cdot I_0}{2 \cdot \pi \cdot \beta} \cdot \left[-\frac{1 - \beta^2}{\xi^3} + \frac{1}{r} \right] \quad (2)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{\nu \cdot t \cdot x}{\xi} \quad (3)$$

Avec :

$$\xi = \sqrt{(\nu \cdot t)^2 + (1 - \beta^2) \cdot r^2}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\beta = \frac{\nu}{\nu_0} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{500}{I_0}}} \text{ Coefficient de Lundholm et Rusck.}$$

$$\nu_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 300 \text{ m}/\mu\text{s} \text{ vitesse de lumière.}$$

I_0 Maximum du courant de l'arc en retour (kA).

Sur la base de la théorie présentée précédemment, nous avons développé un code de calcul, sous environnement Matlab, permettant la détermination de ces trois composantes.

L'approche utilisée ainsi que le code développé ont été validés par le biais d'une analyse comparative entre nos résultats de simulation et ceux obtenus par d'autres chercheurs notamment ceux des références [17] et [18].

3.1. Résultats obtenus

3.1.1. Composante horizontale du champ électrique : E_r

La composante horizontale E_r du champ électrique rayonné est calculée à l'aide de l'équation N°(1). Elle est fonction du courant à la base du canal de foudre et celui dans le canal de foudre.

Courant à la base du canal de foudre

Le modèle du courant à la base du canal de foudre considéré dans cette étude est représenté par une bi- exponentielle :

$$i(0, t) = I_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta_1 t)] \tag{4}$$

Les valeurs des paramètres liés à ce modèle [17], sont consignées dans le tableau I ci-dessous.

Tab. 1. Paramètres du courant à la base du canal de foudre.

I_0 (kA)	A	β_1 (s^{-1})	ν (m/s)
10	$3 \cdot 10^4$	10^7	$1.1 \cdot 10^8$

Les variations temporelles de ce courant sont représentées à la Fig. 2.

Courant dans le canal de foudre

Le courant dans le canal de foudre, correspondant à la phase d'arc en retour, est représenté par le modèle TL. Son expression mathématique s'écrit comme suit :

$$i(z, t) = i(0, t - z/\nu) \text{ si } z \leq \nu t \tag{5}$$

$$i(z, t) = 0 \text{ si } z > \nu t \tag{6}$$

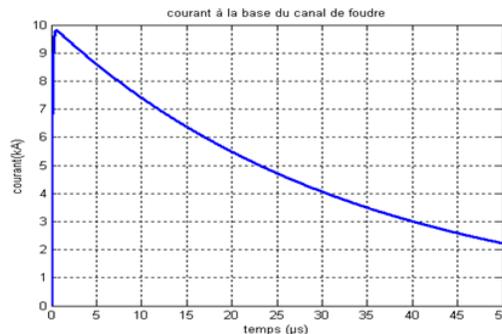


Fig. 2. Forme du courant à la base du canal de foudre.

La figure 3 reproduite à partir de la référence [17], présente les variations temporelles du champ électrique horizontal E_r obtenues par d'autres chercheurs (Zeddami et Rachidi) en mettant en œuvre différentes approches de calcul telles que :

- l'approximation de Norton (courbe N°1-Fig.3),
- la formule de Rubenstein (courbe N°2-Fig.3)
- l'approche du dipôle électrique de Uman et al pour un sol parfaitement conducteur (courbe N°3-Fig.3)
- l'approche utilisant l'expression de Wavetilt (courbe N°4-Fig.3).

Nous avons également reproduit sur cette même figure, par souci de comparaison et de validation de nos résultats, les variations temporelles du champ E_r que nous avons obtenues en mettant en œuvre les approches de Rusck (courbe N°5-Fig.3).

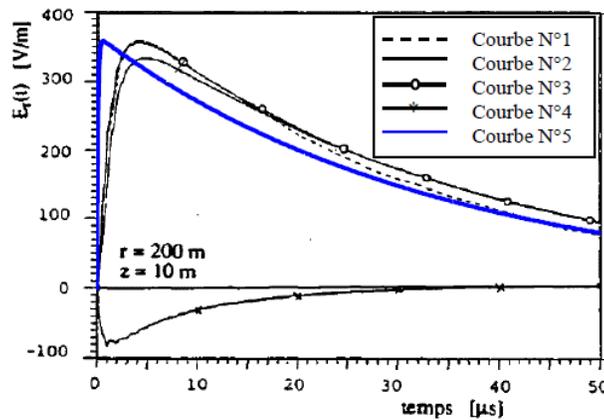


Fig. 3. Variations temporelles du champ électrique horizontal E_r ($r = 200$ m, $h = 10$ m).

Nous pouvons constater, d'après cette figure, que nous obtenons une assez bonne concordance entre nos résultats et ceux obtenus en mettant en œuvre d'autres approches notamment l'approche du dipôle électrique de Uman et al (pour un sol parfaitement conducteur). Ceci valide d'une part l'approche de Rusck qui reste une approche assez facile à mettre en œuvre et intéressante notamment du point de vue temps de calcul et d'autre part le code de calcul que nous avons développé à cet effet.

3.1.2. Composante verticale E_z du champ électrique Courant à la base du canal de foudre

Le modèle du courant à la base du canal de foudre est représenté par l'expression suivante :

$$i(0, t) = I_0 [\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)] \quad (7)$$

Les valeurs des paramètres liés à ce modèle [18], sont consignées dans le tableau II ci-dessous.

Tab. 2. Paramètres du courant à la base du canal de foudre.

I_0 (kA)	τ_1 (μs)	τ_2 (μs)	ν (m/s)
23.5	3.33	0.1	$1.1 \cdot 10^8$

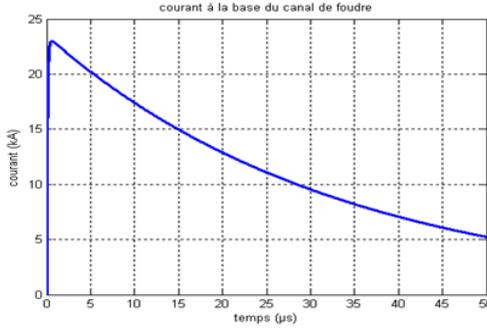


Fig. 4. Forme du courant à la base du canal de foudre.

Nous présentons à la figure 5, les variations temporelles du champ électrique vertical E_z que nous avons obtenues en mettant en œuvre l’approche de Rusck (courbe N°1-Fig.5) et que nous comparons avec celles issues de la référence [18] (courbes N°2 et N°3-Fig.5). En effet, les courbes N°2 et N°3 correspondent aux formes d’ondes du champ électrique vertical obtenues respectivement par Zeddami et al utilisant la méthode fréquentielle (intégrales de Sommerfeld)[18] et par Orzan utilisant la méthode temporelle basée sur l’échantillonnage temporel à pas variable [18].

D’après cette figure, nous constatons la bonne concordance de nos résultats avec ceux obtenus par D.Orzan [18].

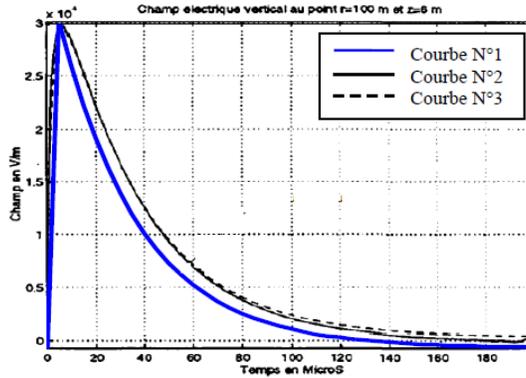


Fig. 5. Champ électrique vertical E_z ($r = 100$ m, $h = 6$ m).

3.1.3. Champ magnétique

Courant à la base du canal de foudre

Le courant à la base du canal est représenté par le modèle d’Heidler dont l’expression mathématique est donnée par la relation suivante :

$$i(0, t) = \frac{I1}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^{n_1}}{1 + (t/\tau_{11})} \exp(-t/\tau_{11}) + \frac{I1}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{11})^{n_1}}{1 + (t/\tau_{21})} \exp(-t/\tau_{22}) \quad (8)$$

Les paramètres associés à ce courant sont consignés dans le tableau (III), la forme d’onde de ce courant, basée sur ce modèle est donnée à la figure 6.

Courant dans le canal de foudre

Le courant dans le canal de foudre est représenté quant à lui par le modèle MTLE dont la représentation mathématique est donnée par les équations 9 et 10 suivantes :

$$i(z, t) = i(0, t - z/\nu) e^{-i/\lambda} \text{ si } z \leq \nu t \tag{9}$$

$$i(z, t) = 0 \text{ si } z > \nu t \tag{10}$$

Tab. 3. Paramètres du courant à la base du canal de foudre [18].

I_1	τ_{11}	τ_{12}	n_1	I_2	τ_{21}	n_2	λ	ν
10.5kA	2 μ s	4.8 μ s	2	9kA	20 μ s	26 μ s	2km	1.5 · 10 ⁸ m/s

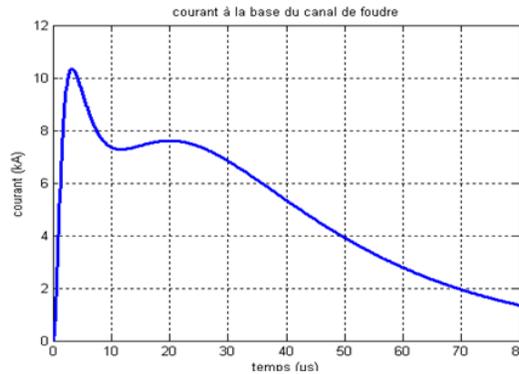


Fig. 6. Forme du courant à la base du canal de foudre.

Nous présentons à la figure 7 suivantes les variations temporelles du champ magnétique que nous avons obtenues en utilisant l'équation N°(3) et que nous comparons à celles obtenues par D. Orzan qui a utilisé la méthode temporelle [18].

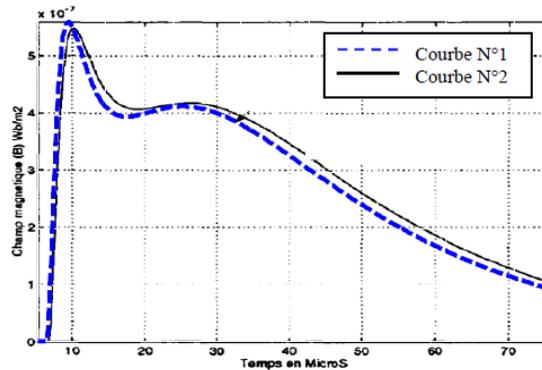


Fig. 7. Variations temporelles du champ magnétique(r =2 Km, h =10 m).

La comparaison de ces résultats montre clairement la concordance observée précédemment. De plus, l'approche que nous avons adoptée dans ce travail a permis de retrouver

les caractéristiques typiques de la forme d'onde du champ magnétique obtenue expérimentalement, à savoir le pic initial et la bosse «hump».

Enfin nous pouvons conclure que le code de calcul que nous avons développé, basé sur les approches de Rusck a été validé dans ce cas là aussi et que ces approches se montrent comme une bonne alternative au calcul du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre.

4. Modèle de couplage

Dans ce travail nous avons mis en œuvre le modèle de Rusck. Aussi avant de présenter les résultats, de simulation, obtenus sur la base de ce modèle, nous avons jugé utile de rappeler le principe général de modèle.

Ce modèle est basé sur l'approximation des lignes de transmission, ce qui veut dire que les dimensions transversales sont considérées petites par rapport à la petite longueur d'onde [11].

Nous allons considérer le cas d'un conducteur sans pertes au dessus du sol. Ce dernier est supposé être parfaitement conducteur car le modèle de Rusck a été introduit en partant de cette hypothèse. La géométrie du problème est présentée à la Figure 8.

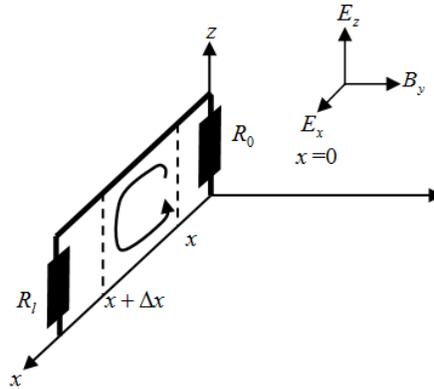


Fig. 8. Géométrie du problème étudié.

Le modèle de Rusck [3] est exprimé en fonction des tensions induites par les potentiels scalaire et vecteur :

$$\frac{\partial U_{sp}(x, t)}{\partial x} + \acute{L} \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + \acute{C} \frac{\partial}{\partial t} [u_{sp}(x, t) - u_{sp}^i(x, t)] = 0 \quad (12)$$

Où :

\acute{L} et \acute{C} désignent l'inductance et la capacité linéique de la ligne ;

$i(x, t)$ représente le courant le long de la ligne ;

$u_{sp}(x, t)$ est le potentiel scalaire induit ;

$u_{sp}^i(x, t)$ est le potentiel scalaire inducteur.

Selon ce modèle, la tension induite $u(x, t)$ s'obtient en rajoutant au potentiel scalaire induit, solution des équations (5) et (6), le potentiel vecteur induit donné par l'expression suivante :

$$u_{vp} = \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x, t)}{\partial t} dz \quad (13)$$

Où h est la hauteur du conducteur et A_z^i est la composante verticale du potentiel scalaire induit.

Les conditions aux limites pour les équations (5) et (6) sont [23] :

$$u_{sp}(0, t) = -R_0 i(0, t) - \int_0^h \frac{\partial A_z^i(0, t)}{\partial t} dz \quad (14)$$

$$u_{sp}(l, t) = -R_0 i(l, t) - \int_0^h \frac{\partial A_z^i(l, t)}{\partial t} dz \quad (15)$$

A noter enfin que le modèle de Rusck a été adopté dans plusieurs travaux dont celui de Yokoyama et al.[4,10]. En effet, ces auteurs ont utilisé ce modèle pour calculer les tensions induites partant d'un courant de foudre mesuré. Les résultats de simulation obtenus, par ces auteurs, ont montré une bonne concordance lorsqu'on les compare à des résultats expérimentaux disponibles dans la littérature.

Par ailleurs, d'autres auteurs sont arrivés aux mêmes conclusions obtenues par Yokoyama et al.[4,10], il s'agit d'Erikson et al [13].

5. Théorie de Rusck

Le modèle de Rusck est basé sur une expression analytique qui permet de calculer la tension induite $U(x, t)$ à un point x d'un conducteur d'une ligne aérienne qui se trouve à une hauteur h du sol (fig. 8). Cette expression est la somme de deux termes à savoir : $U_1(x, t)$ et $U_2(x, t)$. Le premier terme est en relation avec la contribution de la tension induite localisée à droite de x , et le deuxième terme est en relation avec contribution de la tension induite localisée à gauche de x (Eq. (16)-(17)). La décharge orageuse est modélisée selon les hypothèses simplificatrices suivantes : sol parfaitement conducteur et canal de foudre strictement vertical.

En se basant sur la géométrie illustrée sur la figure (9), l'application du modèle de Rusck permet l'écriture des expressions suivantes :

$$U(x, t) = U_1(x, t) + U_2(x, t) \quad (16)$$

$$U_1 = Z_0 I_0 h \beta \frac{\nu_0 t - x}{y^2 + \beta^2 (\nu_0 t - x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2 (\nu_0 t - x)}{\beta^2 (\nu_0 t) + (1 - \beta^2) (x^2 + y^2)} \right] \quad (17)$$

$$U_2(x, t) = U_1(-x, t) \tag{18}$$

Avec :

ν : Vitesse de l'arc en retour ($m/\mu s$).

x : Coordonnée d'un point quelconque sur la ligne.

y : La plus petite distance entre le canal de foudre et la ligne.

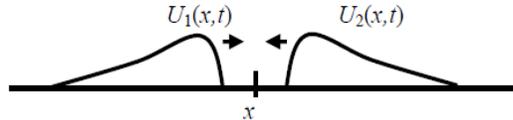


Fig. 9. Tension induite au point x.

Il est important de mentionner que Rusck a proposé une formule simplifiée qui peut être utilisée pour estimer la valeur crête : U_{max} de la surtension induite sur une ligne longue partant de la valeur crête I_0 du courant de foudre [3,8] ; cette formule s'écrit :

$$U_{max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \tag{19}$$

5.1. Application des approches de Rusck pour une ligne de longueur finie

La théorie présentée ci-dessus permet de déterminer les surtensions induites pour une ligne infinie. Cependant, le traitement du cas d'une ligne de longueur finie permet d'envisager des configurations de réseaux électriques réels. Ainsi, le traitement du cas d'une ligne finie est basé sur l'idée des sources de compensations, ces dernières sont calculées à l'aide du principe de superposition en relation avec l'effet de discontinuité.

5.1.1. Tension induite sur une ligne monofilaire

La figure (10) présente la configuration étudiée

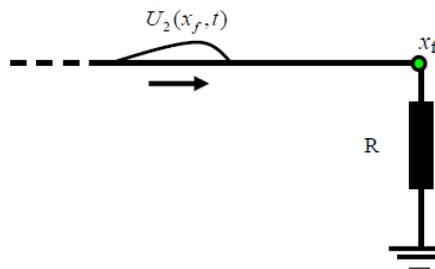


Fig. 10. Discontinuité au point x_f .

La source de compensation en ce point est donnée par la formule suivante [3], [4],[8] :

$$\Delta U = -U_1(x_f, t) + \Gamma_f U_2(x_f, t) \tag{20}$$

Le coefficient de réflexion s'exprime à l'aide de la formule suivante [3,8] :

$$\Gamma = \frac{R_f - Z}{R_f + Z} \tag{21}$$

Z , est l'impédance caractéristique du conducteur.

La tension induite en ce point est la somme des expressions (16) et (20). La même procédure peut être considérée si la discontinuité se trouve dans le coté gauche de x .

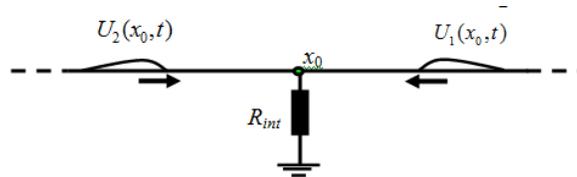


Fig. 11. Discontinuité au point x_0 .

Si la discontinuité se trouve au point d'origine x_0 (fig.11), le coefficient de réflexion s'exprime par [3],[8] :

$$\Gamma_{int} = \frac{-Z}{2R_{int} + Z} \tag{22}$$

La source de compensation s'écrit alors comme suit :

$$\Delta U = \Gamma_{int} [U_1(x_0, t) + U_2(x_0, t)] \tag{23}$$

La tension induite en ce point est donnée par [1,2,6] :

$$U(x_0, t) = U_1(x_0, t) + U_2(x_0, t) + \Gamma_{int} [U_1(x_0, t) + U_2(x_0, t)] \tag{24}$$

Pour calculer la tension induite sur un point x intermédiaire situé entre et la formule suivante est utilisée [8] :

$$U(x, t) = U_1(x, t) + U_2(x, t) + [\Gamma_f U_2(x_f, t) - U_1(x_f, t)] u(t - t_f) + [\Gamma_{int} U_1(x_0, t) + U_2(x_0, t)] u(t - t_0) \tag{25}$$

t_0 et t_f sont les temps de passage du point x_0 et x_f respectivement aux points x .
 $u(t)$ est la fonction échelon unité.

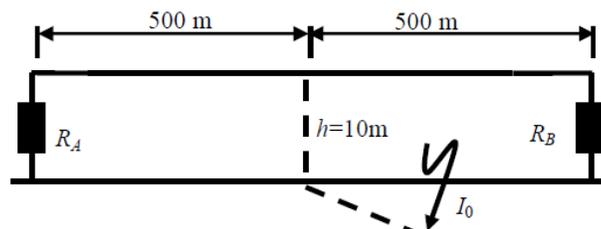


Fig. 12. Diagramme schématique de ligne.

La configuration de la ligne est illustrée sur la figure (12), avec $R_A = R_B = 480\Omega$. Dans la figure (13) nous présentons les variations temporelles de la tension induite obtenue pour l'extrémité de la ligne distante de $500m$ de l'origine $x = 0$ (Courbe N°1-Fig13). Le point d'impact se trouve à $50m$ de la ligne, la valeur maximale du courant est égale à $12kA$.

Nous constatons que cette tension induite a la forme d'une impulsion avec un retard égal au temps de passage du point $x = 0$ au point $x = 500m$. Sur cette même figure nous avons reporté le graphe de cette tension induite obtenu à l'aide du modèle d'Agrawal (Courbe N°2-Fig12) issu de la référence [30] dans un but de comparaison des résultats. Nous observons aussi qu'autant pour le modèle de Rusck que pour celui d'Agrawal, la tension totale le long de la ligne se présente sous la forme d'une onde unipolaire positive. De plus la forme d'onde de cette dernière est caractérisée par un temps de montée très court. Enfin la comparaison des formes d'ondes obtenues par le modèle de Rusck et d'Agrawal montre une assez bonne concordance, ce qui valide l'approche du modèle de Rusck et l'équivalence théorique entre les deux modèles établie par Cooray et al dans la référence [27].

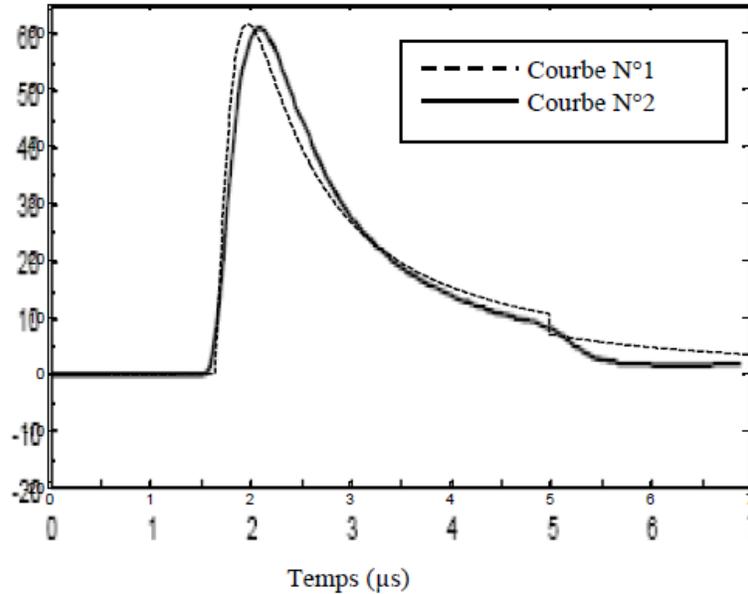


Fig. 13. Tension induite sur une ligne monofilaire finie ($I_0 = 12kA$, $v = 170m/s$, $y = 50m$, $h = 10m$, $x = 500m$).

6. Conclusion

Dans cette communication nous avons étudié le problème du couplage du champ électromagnétique (EM) rayonné par un coup de foudre avec une ligne aérienne. Le calcul de ce champ a été effectué à l'aide des approches théoriques de Rusck. Ces dernières se sont avérées tout à fait valables après comparaison des résultats de calcul avec ceux obtenus par d'autres chercheurs mettant en œuvre des approches beaucoup plus complexes. Le calcul des surtensions induites par couplage du champ EM calculé avec une ligne aérienne, mettant en œuvre le modèle de couplage de Rusck, a été effectué avec succès tout en mettant en jeu un formalisme analytique assez simple facilitant ainsi la mise en œuvre informatique.

REFERENCES

- [1] S. Bauzac, « La protection contre la foudre à France- Telecom : des kiloampères aux kilo-Francs », Journées sur la Compatibilité Electromagnétique, Installation CEM et Protection des Electroniques, Grenoble (18 - 19 Mai 1993).
- [2] R.Thottappillil " Electromagnetic Pulse Environment of Cloud-to-Ground Lightning for EMC studies", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 1, pp. 203–213, Feb.2002.
- [3] S.Rusck, "Induced lightning over voltages on power transmission lines with special reference to the over voltage protection of low voltage networks", PhD thesis, Royal Institute -Stockholm, Sweden, 1958.
- [4] Jos Paulino, JS Lopes, W. C. Boaventura, J. Pissolato Filho "Lightning induced voltages on distribution lines with shield wires" EMC'94, Roma, Italy.
- [5] J.P.Silva, A. E .A. Araujo, os Paulino "Calculation of lightning induced voltages with Rusck's méthode in EMTP :part I and part II" IPST 2001, Rio De Janeiro, Brazil.
- [6] S. Yokoyama"Calculation of lightning induced voltages on overhead multiconductors systems" IEEE Trans. On power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103 N0. 1 Jan.1984.
- [7] Sandro C.Assis, Wellace C. Boaventura "Desenvolvimento de um modelo de calculo de tensoes indizadas por descargas atmosfericas em conductors multiaterredos e incorporacao Do modelo ao EMTDC/PSCAD"1 :Eng.UFMG 2 :Prof. UFMG (Brazil).
- [8] I. N. da Silva, R. A. Flauzino, et J. A. C. Luzón "Design of expert system for optimized protection studies against Atmospheric Discharges in Distribution Systems" 2006 IEEE PES Transmission and distribution conference and exposition Latin America, Venezuela.
- [9] Hans Kristian Hoidalen, " Calculation of lightning induced overvoltages using MODELS".SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway.
- [10] Hans Kristian Hoidalen, "lightning induced voltages in low-voltage systems and its dependency on overhead line terminations". SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway.
- [11] A.Borghetti, S.Guerriere, C.A.Nucci, F.Rachidi « Modèles de calcul des surtensions induites par la foudre : Analyse comparative ». ", Proceedings of 7 éme Colloque International et Exposition Sur La Compatibilité Électromagnétique, Toulouse, 2-4 Mars 1994.
- [12] S. Yokoyama " Advanced observations of lightning induced voltages on power distribution lines " IEEE Trans. On power delivery, Vol. 4 N0. 4, Jan.1989.
- [13] A.J. Erikson et al. " lightning induced voltages on overhead distribution lines" IEEE trans. On power apparatus and systems, Vol.PAS-101 N0. Jan.1982.
- [14] Mat Davenisa " A pratical extension of Rusck's formula for maximum lightning induced voltages that a ccounts for ground resistivity " IEEE trans. On power delivery, Vol. 22 N0. 1 Jan.2007.
- [15] Yoshihiro Bada, Vladimir A.Rakov. " voltages induced on overhead wires by lightning strikes to nearby tall grounded object" IEEE Trans. On EMC , Vol.48 N0. 1 Feb.2006.
- [16] A.Borghetti, C.A.Nucci, M.Paolone" An improved procedure for the assessment of overhead line indirect lightning performance and its comparison with the IEEE Std. 1410 method" , IEEE trans. On Power Delivery, Vol. 22 N0. 1 Jan.2007.

- [17] Farhad Rachidi-Haeri “ Effet électromagnétique de foudre sur les lignes de transmission aériennes modélisation et simulation ».Thèse doctorat es science EPFL, Lausanne, Suisse, 1991 .
- [18] David Orzan « Couplage externe et interne entre un champ électromagnétique et un réseau de ligne multifilaires » Thèse de Doctorat Es Science EPFL, Lausanne, Suisse, 1998.
- [19] Hans Kristian Hoidalén, “calculation of lightning induced voltages in MODELS including lossy ground effects”.IPST 2003 New Orleans, USA.
- [20] Raul Montano « The effects of lightning on low voltage power networks » Thèse doctorat Université d’Uppsala, Suède 2005.
- [21] Ernesto Pérez Gonzalez « Avances en el modelamiento y experimentacion de tensiones inducidas en redes de distribucion » Thèse de Doctorat, Université National de Colombia, 2006.
- [22] Mario Paolone « Modeling of lightning induced voltages on distribution networks for solution of power quality problems, and relevant implementation in a transient program” Thèse PHD, Université de Bologne, Italie 2001.
- [23] C.A. Nucci “Tensions induites par la foudre sur les lignes aériennes de transport d’énergie” ELECTRA N. 162 Oct.1995.
- [24] A.K.Agrawal, H.J.Price, S.H.Gurbaxani, " Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol-22, pp : 119-129, 1980.
- [25] G.Deindorfer, "Induced voltage on overhead line due to nearby lightning", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol-32, No.4, pp : 388-399, Nov1990.
- [26] C.Nucci, F.Rachidi, M.Ianoz, C. Mazzetti," Lightning induced voltages on overhead lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol-35, No.1, pp :75-86, Feb.1993.
- [27] [V. Cooray «Calculation of lightning-induced overvoltages in power lines : A comparison of two coupling models » IEEE Trans. On EMC, Vol.36 N0. 3, Aout.1994.
- [28] V. A. Rakov, m. A. Uman, " Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application" IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, No. 4, Pp. 403–426, Nov. 1998.
- [29] L.Bermudez Arboleda « Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elvated strike objects » Thèse doctorat es science, EPFL, Lausanne, Suisse, 2003
- [30] C.A Nucci, F. Rachidi “Lightning induced overvoltages” IEEE transmiión and distribution conference, Panel session – distribution lightning protection-, new Orleáns, April 14, 1999.