



Etude numérique de l'effet de thermosiphon sur la dispersion verticale de polluants

Zeinebou Yahya

► To cite this version:

Zeinebou Yahya. Etude numérique de l'effet de thermosiphon sur la dispersion verticale de polluants. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. <hal-03444947>

HAL Id: hal-03444947

<https://hal.science/hal-03444947v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Etude numérique de l'effet de thermosiphon sur la dispersion verticale de polluants

Z. Yahya^a, Ch. Mbow^b

a. Qassim University. email : zeinebousidi2015@gmail.com

b. Laboratoire de mécanique des fluides et applications, FST, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. email : mbowy@yahoo.com

Résumé

La dispersion des polluants dans des milieux urbains constitue un problème majeur à cet fait notre étude vient pour proposer un système de prévention et de sécurité contre la dispersion des rejets et des fumées issus des cheminées industrielles. Le système étudié est modélisé par un écoulement d'interaction Panache – Thermosiphon. Les résultats du modèle numérique que nous avons mis au point nous a permis d'abord d'identifier les comportements des polluants du point de vue dynamique et thermique et puis étudier les différents emplacements du thermosiphon par rapport à la source du panache

Abstract

In this work the authors studied numerically a new system able to prevent the dispersion of releases and fumes from industrial smokestacks. The system is modeled by a Plume - Thermosiphon interaction flow confined in a vertical cylinder; this flow of natural convection is generated by the presence of a heat source at the input of the cylinder. The results of the numerical model that have been developed, help first identify the behavior of pollutants from the dynamic and thermal point of view and then explore the different locations of the Thermosiphon relative to the source of the plume

Mots clefs : interaction, modélisation numérique, panache, Polluant, thermosiphon

1 Introduction

Le panache thermique généré par la présence d'une source de chaleur dans un milieu limité par des parois peut simuler plusieurs cas dans le domaine industriel. C'est le cas par exemple des rejets d'air chaud issus des cheminées industrielles des incendies dans des cages d'escaliers ou d'ascenseurs et de vapeur des centrales thermiques, la dispersion de ces polluants dans des milieux urbains nécessite la réalisation des systèmes de prévention et de sécurité c'est dans cet optique que nous proposons de

modéliser numériquement la propagation des polluants issus des cheminées industrielles, à travers une configuration totalement nouvelle (**Figure 1**). Nous avons entouré le panache thermique induit par une source de chaleur, par un thermosiphon cylindrique afin de déterminer les caractéristiques de l'écoulement résultant. Ce système est constitué d'un cylindre vertical ouvert aux deux extrémités avec une source génératrice du panache centrée à l'entrée du cylindre. La paroi cylindrique s'échauffe sous l'effet du rayonnement thermique émis par la source génératrice, ce qui provoque un écoulement de thermosiphon autour de l'écoulement du panache thermique.

Plusieurs études numériques et expérimentales ont été menées séparément aux écoulements du panache thermique libre et illimité [1], [2], ou les écoulements de thermosiphons [3], [4], [5] représentés dans notre étude par un cylindre chauffé par l'effet du rayonnement déjà mentionné. Cependant nous remarquons le manque crucial des études numériques effectuées sur l'interaction Panache – Thermosiphon qui permet de mieux modéliser notre cas réel de la dispersion des polluants étudié dans ce travail. Ce problème reste difficile à résoudre du fait que l'écriture des conditions aux limites entrée/sortie est un problème très délicat.

Cette étude est inspirée par l'étude expérimentale d'A.O.M.Mahmoud et al. [6] qui a étudié expérimentalement les effets du thermosiphon sur la dispersion de polluants.

2 Modèle théorique

L'écoulement d'interaction Panache – Thermosiphon étudié dans ce travail est schématisé par la figure ci – dessous :

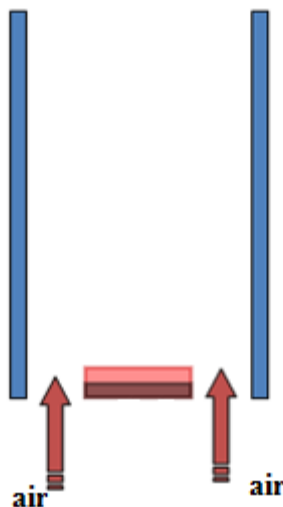


Figure 1 : Configuration géométrique du problème

Initialement le système est en équilibre thermodynamique à la température T_0 . A partir d'instant t_0 , la source génératrice est portée à une température $T_s > T_0$ et ainsi une convection naturelle prend naissance que nous proposons d'étudier. Pour se faire nous utilisons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- fluide Newtonien, visqueux et transparent
- régime laminaire
- écoulement instationnaire
- écoulement bidimensionnel et symétrique par rapport à l'axe du cylindre

- propriétés physiques constantes hormis la masse volumique dans l'équation de mouvement
- travail des forces de pression et la dissipation visqueuse sont négligeables

Le modèle théorique est formulé à partir des équations de conservation de masse, du bilan de la quantité du mouvement et de l'équation de la chaleur, ainsi par les conditions initiales et aux limites. Ensuite nous avons rendu ce modèle mathématique adimensionnel pour faire apparaître des grandeurs caractéristiques et de généraliser le problème étudié.

Les équations adimensionnelles qui régissent les transferts dans le système étudié ainsi que leurs conditions aux limites associées sont présentées dans l'article [7].

2.1 Radiosité à la paroi

Le flux radiatif émis par la source génératrice se divise en trois parties, une partie est récupérée par les parois du cylindre, et les deux autres parties sont perdues par les ouvertures supérieure et inférieure du cylindre.

La radiosité du rayonnement quittant la paroi est donnée par :

$$J_p(R, z) = \varepsilon_p \sigma T_p^4 + (1 - \varepsilon_p) \sum_{i=1}^L \int_{S_i} J_i \cdot K(\vec{r}_p, \vec{r}_i) \cdot dS_i$$

Avec : \vec{r}_p et \vec{r}_i sont les positions des surfaces élémentaires. dS_p , dS_i et $K(\vec{r}_p, \vec{r}_i)$ le noyau défini par

$$K(\vec{r}_p, \vec{r}_i) = \frac{(\vec{n}_p \cdot \vec{r}_{p,i}) \cdot (\vec{n}_i \cdot \vec{r}_{i,p})}{\pi \cdot |\vec{r}_{p,i}|^4}$$

\vec{n}_p et \vec{n}_i les normales unitaires respectivement de dS_p et dS_i .

Dans cette relation nous avons posé : $\vec{r}_{p,i} = -\vec{r}_{i,p} = \vec{r}_i - \vec{r}_p$

En considérant l'entrée et la sortie de même que la source comme des surfaces noires à la température T_a (température ambiante) et T_s (température de la source), il vient alors :

$$J_p = \varepsilon_p \sigma T_p^4 + (1 - \varepsilon_p) \left\{ T_a^4 \left[\int_{S_e} K(\vec{r}_p, \vec{r}_e) \cdot dS_e + \int_{S_o} K(\vec{r}_p, \vec{r}_o) \cdot dS_o \right] + \right. \\ \left. T_s^4 \int_{S_i} K(\vec{r}_p, \vec{r}_s) \cdot dS_s + \int_{S_{p'}} J_{p'} \cdot K(\vec{r}_p, \vec{r}_{p'}) \cdot dS_{p'} \right\}$$

Le dernier terme de cette relation traduit l'échange radiatif inter - parois. Dans les relations ci-dessus les indices (e), (o) et (s) se réfèrent respectivement à l'entrée, la sortie et la source. Les indices (p) et (p') sont relatifs à la paroi.

Pour simplifier l'écriture nous mettons notre équation intégrale inhomogène dite équation de Fredholm de deuxième espèce sous la forme condensée suivante

$$J_p(\vec{r}_p) = J_{op}(\vec{r}_p) + \lambda \int_{S'} J_{p'}(\vec{r}_{p'}) \cdot K(\vec{r}_p, \vec{r}_{p'}) \cdot dS'$$

avec

$$\lambda = -(1 - \varepsilon_p)$$

$$J_{op}(\vec{r}_p) = \varepsilon_p \sigma T_p^4 + (1 - \varepsilon_p) \left\{ T_a^4 \left[\int_{S_e} K(\vec{r}_p, \vec{r}_e) dS_e + \int_{S_o} K(\vec{r}_p, \vec{r}_o) dS_o \right] + T_s^4 \int_{S_i} K(\vec{r}_p, \vec{r}_s) dS_s \right\}$$

Pour résoudre cette équation intégrale nous approchons le terme $\int_{S'} J_p(\vec{r}_p') \cdot K(\vec{r}_p, \vec{r}_p') dS'$ à l'aide d'une quadrature Simpson et on obtient un système d'équations que nous allons résoudre par une méthode directe.

3 Modèle numérique

Comme les transferts sont plus intenses au voisinage des parois et que, à l'entrée et à la sortie du cylindre, il existe des discontinuités, il convient de discrétiser le domaine en utilisant des pas variables afin de minimiser les erreurs, la discrétisation des bilans des équations adimensionnelles et les conditions associées est donnée dans [7]. Pour résoudre le système d'équations discrétisées, nous faisons appel à des méthodes itératives qui sont basées sur l'application répétée d'un simple algorithme menant à la convergence éventuelle après un nombre fini de répétition (itérations). Nous ferons dans ce travail appel à la méthode itérative de relaxation ligne par ligne de Gauss – Seidel.

L'algorithme de calcul s'articule comme suit :

- Initier les champs de vitesse, de température et de pression
- Calculer les coefficients des équations de quantité de mouvement et les vitesses de prédiction : les pseudos – vitesses
- Calculer la pression par l'étape de projection
- Mise à jour du champ des vitesses : calculer les vitesses corrigées
- Calculer le champ des températures

Pour déterminer la radiosité du rayonnement quittant la paroi dans le cas où l'échange radiatif de surface est pris en compte, mettons la radiosité sous la forme suivante

$$J_p(R, z) - \int_0^1 J_p(R, z') \cdot K(z, z') \cdot dz' = f(z)$$

En utilisant la quadrature de Simpson nous avons :

$$\int_0^1 J_p(R, z') \cdot K(z, z') \cdot dz' \approx \sum_{k=1}^{(n_z-1)/2} I_{2k}(z)$$

avec

$$I_{2k}(z) = A_{2k} F_{2k-1}(z) + B_{2k} F_{2k}(z) + C_{2k} F_{2k+1}(z)$$

Les $F_{2k}(z)$ sont donnés par :

$$F_{2k}(z) = J_{p,2k} \cdot K_{2k}(z)$$

En posant :

$$J_p(z) = J_i, K_{2k}(z) = K_{2k,i} \text{ et } f(z) = f_i$$

nous obtenons le système matriciel de n_z équations à n_z inconnues suivant

$$J_i - A_2 J_1 \cdot K_{1,i} - \sum_{k=1}^{(n_z-3)/2} \{ B_{2k} \cdot J_{2k} \cdot K_{2k,i} + [C_{2k} + A_{2k+2}] \cdot J_{2k+1} \cdot K_{2k+1,i} \} -$$

$$B_{n_z-1} \cdot J_{n_z-1} \cdot K_{n_z-1,i} - C_{n_z-1} \cdot J_{n_z} \cdot K_{n_z,i} = f_i$$

avec $i = 1, \dots, n_z$

Ce système sera ensuite résolu grâce à la méthode d'élimination de Gauss avec un pivot dominant. Une fois le champ des radiosités déterminé nous pouvons calculer le flux radiatif net local sur la paroi du cylindre.

4 Résultats numériques et discussion

Cette partie présente les résultats issus du code de calcul que nous avons mis au point et qui simule l'effet de thermosiphon sur l'écoulement du panache thermique qui représente les polluants.

4.1 Champs dynamique et thermique en régime transitoire

Les courbes des figures (2 – 5) montrent les variations de la vitesse longitudinale et de la température en fonction de la coordonnée radiale à différentes dates pour $Ra = 10^7$ et $R^* = 0,46$ ce qui correspondant à un rayon adimensionnel de la source égal à 0,069. Aux premiers instants l'écoulement de type couche limite au voisinage de la paroi n'influe pas sur le comportement du fluide qui se trouve juste au dessus de la source chaude. Au fur et à mesure que le temps augmente, les transferts s'intensifient sauf au voisinage de la zone comprise entre la paroi et la source où la température reste pratiquement constante et par conséquent est le siège d'un écoulement « retour » qui s'accroît au cours du temps. L'épaisseur de la couche limite hydrodynamique en se développant interagit avec l'écoulement dans la zone centrale qui subit de plus en plus l'effet du thermosiphon ce qui se traduit par un déplacement latéral des maxima de la vitesse longitudinale vers le centre de l'enceinte. L'analyse des courbes montrent le régime permanent thermique s'établit plus rapidement que le régime hydrodynamique. En effet les courbes des figures 3 et 5 montrent que les champs des températures restent constants quand $t \geq 0,519$ alors que c'est au-delà de $t = 0,729$ que nous pouvons considérer que les profils de la vitesse longitudinale sont auto-similaires (voir figures 2 et 4).

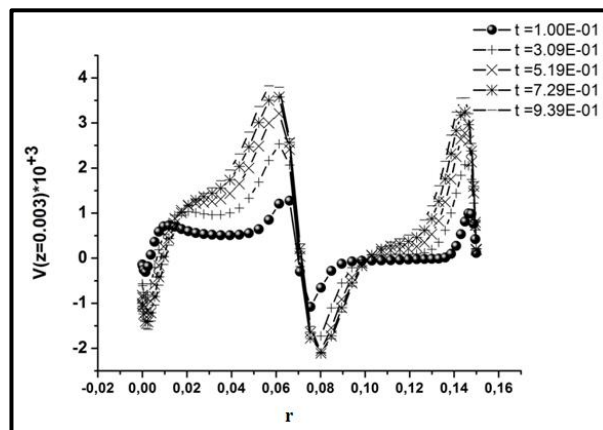


Figure 2 : Variations de la vitesse longitudinale en fonction de la coordonnée radiale adimensionnelle à $z=0.003$ pour différents temps

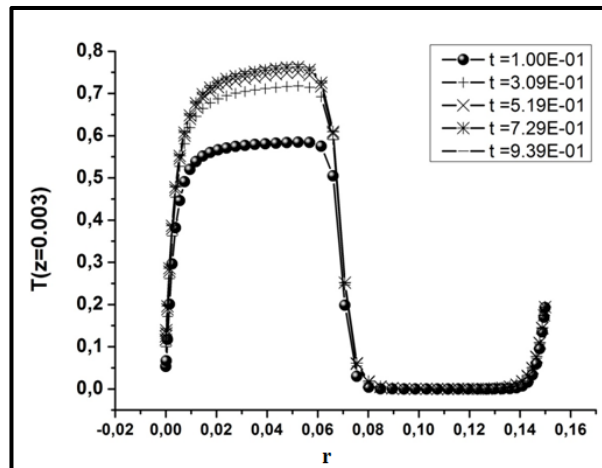


Figure 31 : Variations de la température adimensionnelle en fonction de la coordonnée radiale adimensionnelle à $z=0.003$ pour différents temps

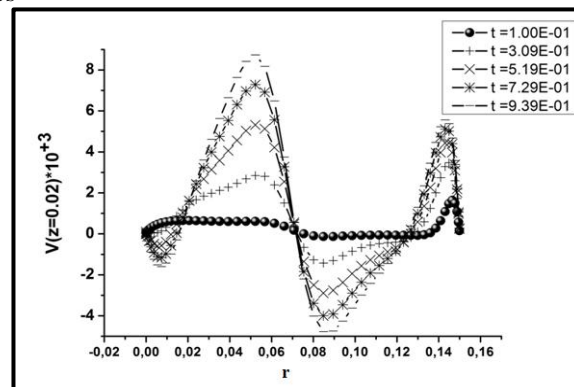


Figure 42 : Variations de la vitesse longitudinale en fonction de la coordonnée radiale adimensionnelle à $z=0.02$ pour différents temps

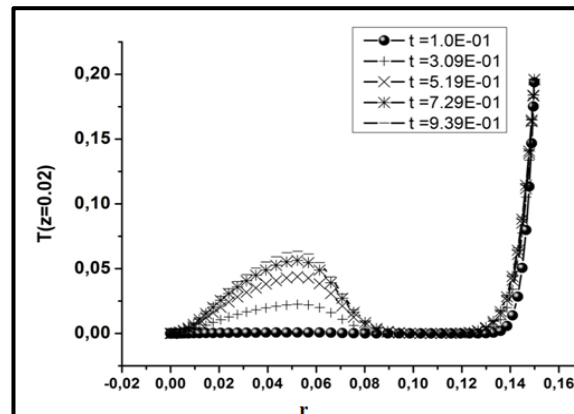


Figure 53 : Variations de la température adimensionnelle en fonction de la coordonnée radiale adimensionnelle à $z=0.02$ pour différents temps

4.2 Effet de l'emplacement du thermosiphon

Nous étudions l'influence de l'emplacement du thermosiphon par rapport à la source du panache (Figure 6).

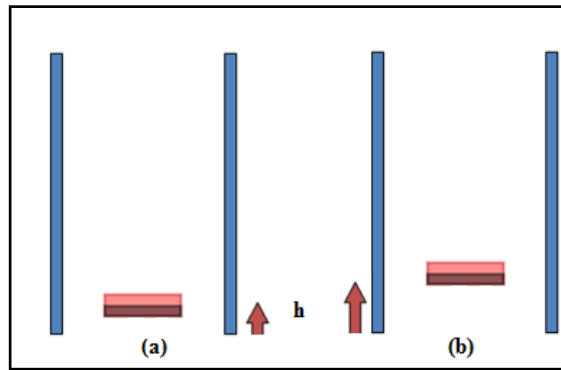
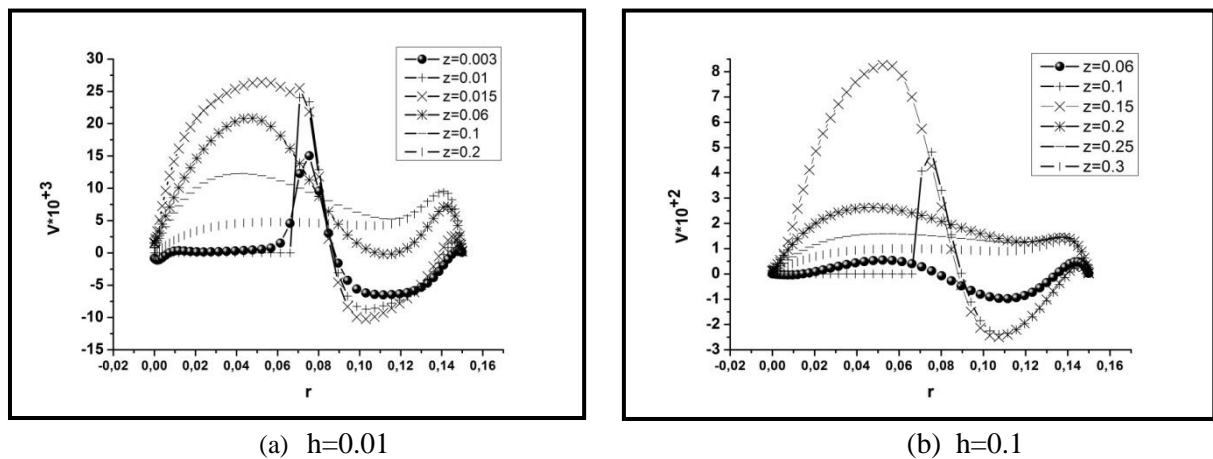


Figure 6 : l'emplacement du thermosiphon par rapport à la source chaude

Les courbes de la figure 7 montrent les variations de la vitesse longitudinale en fonction de la coordonnée radiale lorsque h (la distance verticale entre l'entrée du thermosiphon et la source de panache) égal à et 0.1 successivement. Et les courbes de la figure 8 montrent les variations de la température en fonction de la coordonnée radiale lorsque h égal à 0.01 et 0.1 successivement.

Figure 7 : profil de vitesse longitudinale en fonction de la coordonnée radiale pour $h=0.01$ et $h=0.1$

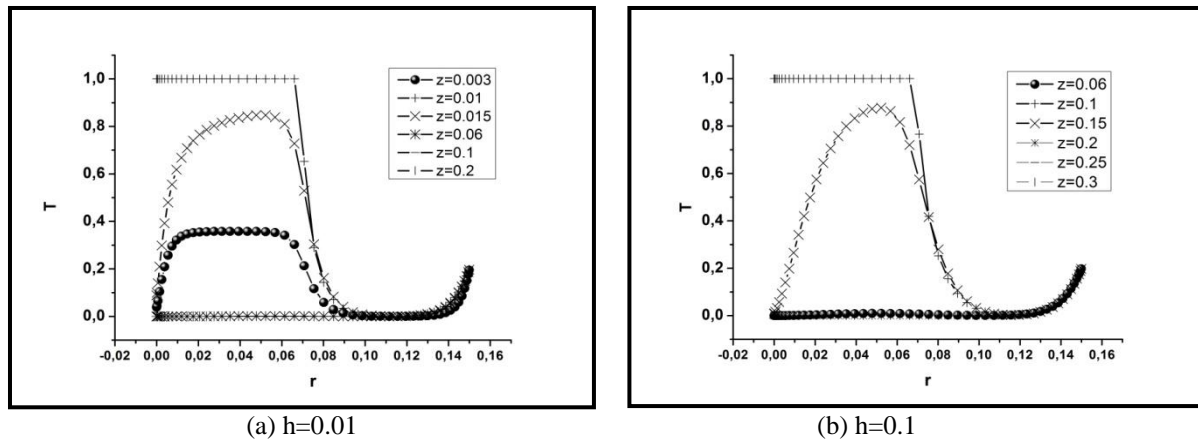


Figure 8: profil de température en fonction de la coordonnée radiale pour h égal à 0.01 et 0.1

Ces courbes montrent, que les effets du thermosiphon augmentent au fur et à mesure que la source chaude est pénétrée dans le cylindre (la cheminée industrielle), et que les maxima se déplacent vers la paroi, ce qui favorise l'écoulement suivant la direction radiale dans la zone inférieure de la source chaude. Au dessus de la source l'augmentation de la distance verticale (h) entre l'entrée du thermosiphon et la source de panache entraîne une augmentation de vitesse et une homogénéisation rapide du fluide, ce qui montre la transformation du panache en air chaud.

Conclusion

Dans ce travail nous avons simulé le problème réel de propagation des polluants par un panache thermique limité par des parois cylindrique, ce système a été représenté par un système d'équations de Navier Stokes et de l'équation de la chaleur, et par des conditions initiales et aux limites, malgré la difficulté d'écriture des conditions aux limites entrée /sortie pour les problèmes relatifs aux thermosiphons.

Les simulations numériques ont été exécutées pour différentes positions du thermosiphon par rapport à la source du panache, et pour un nombre de Rayleigh fixés $Ra=10^{+7}$, et un facteur de forme $A=0.3$, et un rayon de la source chaude correspond à $R^*=0.46$.

L'étude a bien déterminé les mécanismes d'interaction des deux écoulements de panache thermique et de thermosiphon en régime transitoire, elle a montré également que la position du thermosiphon par rapport à la source du panache a une influence majeure sur la propagation des polluants.

Références

- [1] B. Guillou. Etude Numérique et expérimentale de la structure turbulente d'un panache pur à symétrie axiale, Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 1984.
- [2] J. M. Agator, Doan-Kim-Son, Analyse spectral du champ thermique d'un panache turbulent à symétrie axiale, C. R. Acad. Sc. Paris, 1983.
- [3] C. Kettleborough, Transient laminar free convection between heated vertical plates including entrance effects, International Journal of Heat and Mass Transfer 15(1972) 883–896
- [4] R. Wirtz, R. Stutzman, Experiments on free convection between vertical plates with symmetric heating, Journal of Heat Transfer 104 (1982).
- [5] S. Ramanathan, R. Kumar, Correlations for natural convection between heated vertical plates, Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), SeriesC), United States 113(1991)
- [6] A. O. M. Mahmoud, J. Zinoubi, R. Ben Maad and A. Belghith. Improvement of the Vertical Dispersion of Pollutants Resulting From Chimneys by Thermosiphon Effect. American Journal of Environmental Sciences 2 (2006) 66-73
- [7] Z. Yahya, Ch. Mbow, A.O.M. Mahmoud, M. L. Sow, Modeling of a Natural Convection Flow Plume –Thermosiphon Interaction, Int. Rev. of Mechanical Engineering 7 (2013)140 – 146
- [8] J. Zinoubi, Etude de l'interaction d'un écoulement de thermosiphon avec un panache thermique à symétrie axiale : influences des paramètres de forme. Thèse de doctorat, Université de Tunis II, Faculté des sciences de Tunis, 2003.