



**Effet de Confinement du Panache Thermique :  
Etude de la Structure Fine**

Belgacem JOUINI<sup>1\*</sup>; Mourad BOUTERRA<sup>1</sup>; Afif EL CAFSI<sup>1</sup>; Ali BELGHITH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LETTM, Faculté Sciences de Tunis, Université Tunis El Manar Campus Universitaire, 1060 Tunis, TUNISIE.

\* [belgacem\\_jouini@yahoo.fr](mailto:belgacem_jouini@yahoo.fr)

**Résumé :** Dans ce travail, nous avons fait une étude numérique de panache thermique confiné par un canal vertical. Le panache est généré par une source chauffée à une température  $T_s$ , la source est placée à l'entrée d'un canal vertical de sa partie inférieure. La largeur de la source est égale à la moitié de l'écartement de deux plaques qui forment le canal. La première partie est consacrée pour l'étude de l'effet de la position de la source, par rapport à l'entrée du canal, sur la structure du panache. Dans la seconde partie, nous nous proposons des corrélations entre les nombres adimensionnelles : nombre de Strouhal et nombre de Grashof.

**Mots clés :** FDS, panache thermique, source chaude, fréquence d'échappement.

## 1. Introduction

De nombreux facteurs tels que l'augmentation du prix des énergies fossiles et les différents problèmes environnementaux (réchauffement de la planète) induisent un attrait croissant des usagers pour les énergies renouvelables. Dans le domaine de l'habitat, l'application la plus répandue est le chauffe eau solaire fonctionnant avec des capteurs plans, du fait de sa simplicité et de son faible coût. Il faut donc stocker la chaleur afin de continuer à chauffer le bâtiment, lorsque le soleil ne brille plus, et la rediriger vers les zones qui n'en bénéficient pas grâce à la thermocirculation mouvement naturel de l'air chaud qui monte ou des ventilateurs.

Ces systèmes, développés par Trombe, peuvent assurer le chauffage des locaux d'habitation en disposant un mur en maçonnerie lourde orienté vers le sud derrière un vitrage et muni de deux orifices [1]. J. Beziau et G. Arnaud [2] ont utilisé un système similaire au mur Trombe, à la différence près qu'ils ont disposé des sections remplies d'eau à l'intérieur du mur capteur. Et en utilisant une autre configuration Melih Tan [3], a fait une étude ayant pour but la récupération de l'énergie solaire par un capteur orienté vers le sud, et le transfert de cette énergie dans un capteur nord. Cette énergie n'est pas utilisée pour chauffer directement l'espace intérieur, mais pour réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur. Une des solutions proposées pour remédier à ces inconvénients est d'exploiter l'interaction panache thermosiphon. Ce dernier a été largement étudié pour la configuration axisymétrique [4,5] ainsi que la configuration cartésienne [6]. La performance de ces systèmes dépend de plusieurs paramètres tels que le débit d'écoulement, le flux solaire reçu ainsi que les paramètres géométriques qui sont bien étudiés pour des configurations cylindriques [7].

R. Ben Maad [8] a étudié expérimentalement et numériquement l'effet d'une grille chauffée, placée à l'entrée d'un canal vertical. Il s'est intéressé à son influence sur la structure de l'écoulement. Il a trouvé une instabilité des champs thermique et dynamique à l'entrée du canal et une intensification du coefficient moyen de transfert. A. Gammoudi et al. [9] ont travaillé sur l'amélioration de l'efficacité d'un système passif de captage de l'énergie solaire en simulant le problème au laboratoire, par l'étude d'un panache thermique généré par une source de chaleur rectangulaire placée à l'entrée d'un canal vertical à parois chauffées. Ils ont montré également que l'augmentation de la température de la source permet d'améliorer le débit d'air à l'intérieur du système. T. Naffouti et al. [10] ont étudié expérimentalement la structure fine d'un écoulement résultant de l'interaction d'un panache thermique avec un thermosiphon dans un canal vertical. Ils ont montré que cet écoulement est formé de trois zones distinctes.

B. Jouini et al. [11] ont réalisé une étude numérique sur l'effet de la position d'une source d'un panache thermique ( $T_s=300^\circ\text{C}$ ) par rapport à l'entrée d'un canal vertical. Cette étude est basée sur la méthode des volumes finis, utilisant le modèle **k-ε standard**. Ils ont trouvé un bon accord avec les résultats expérimentaux de A. Gammoudi et al. [9]. Ils ont constaté, aussi, que la taille de la zone de recirculation dépend de la position verticale de la source par rapport à l'entrée du canal. Ce qui leur a permis de prouver que la taille de cette zone augmente avec  $h$  (l'espacement source-canal).

Dans ce travail nous avons étudié numériquement, en utilisant un logiciel de calcul **FDS**, un panache thermique mis à l'entrée d'un canal vertical. Nous avons déterminé la fréquence d'échappement des rouleaux tourbillonnaires formées au dessus de la source. Ainsi que, l'effet de l'espacement source-canal sur la fréquence d'échappement en cherchant une corrélation entre le nombre Grashof et le nombre de Strouhal.

## 2. Configuration géométrique et modélisation numérique

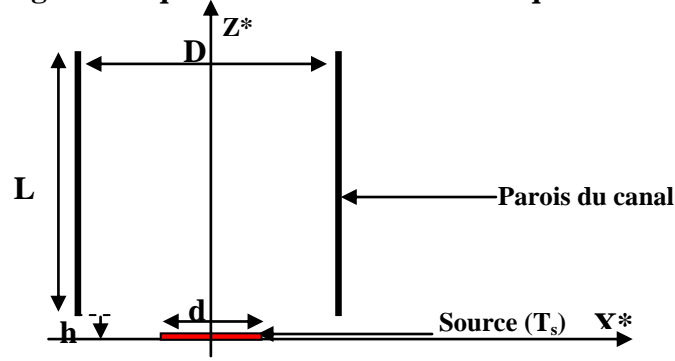


Figure 1 : configuration géométrique

Dans notre travail nous avons utilisé les grandeurs suivantes :

- La largeur de la source thermique  $d = 7.5\text{cm}$  ; cette source est placée horizontalement à l'entrée du canal et permet de générer un panache.
- Le canal est formé de deux plaques distantes de  $D = 15\text{cm}$  et de coté  $L = 50\text{cm}$ . les parois internes des plaques du canal sont chauffées uniformément à une température de  $20^\circ\text{C}$ .
- L'espace source canal :  $h$ .
- L'entrée et la sortie du canal sont mises à la pression atmosphérique et à la température ambiante  $T_a = 20^\circ\text{C}$  (initialement).

Dans notre travail nous avons utilisé un logiciel commercial **FDS**, utilisant, pour la résolution des équations de Navier-Stokes, la méthode des grandes échelles (**LES**). Ce modèle est basé sur l'utilisation des équations moyennées dans le temps après l'application de la décomposition de Reynolds.

$$\mathbf{U}_i = (\bar{U}_i + U'_i) \text{ and } p = (\bar{p} + p')$$

Le système des équations Navier-Stokes moyennées est :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}'_i \bar{U}'_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} \right)$$

Ces équations moyennées font apparaître les contraintes visqueuses  $(-\bar{U}'_i \bar{U}'_j)$ . Ce terme est appelé les tensions de Reynolds.

$$(\tau_{ij} = \bar{U}'_i \bar{U}'_j)$$

En appliquant l'hypothèse de Boussinesq :

$$(-\bar{U}'_i \bar{U}'_j) = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Les équations de Navier-Stokes deviennent :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} \right) + \nu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$p^* = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho \bar{k}$$

L'équation de l'énergie s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial U_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Aspect thermique

La structure du panache à l'intérieur du canal est sensible à toute variation des paramètres de la configuration. Le paramètre, qui sera modifié dans ce travail, est la position de la source du panache thermique par rapport à l'entrée du canal, ce qu'on appelle l'espace source canal. La figure 2 nous montre les isovalues de la température pour les différents cas étudiés.

Cette figure montre également que le gradient de température devient plus important en diminuant la distance entre la source et l'entrée du canal. La température, à l'intérieur du canal, devient plus importante, en plaçant la source dans le canal.

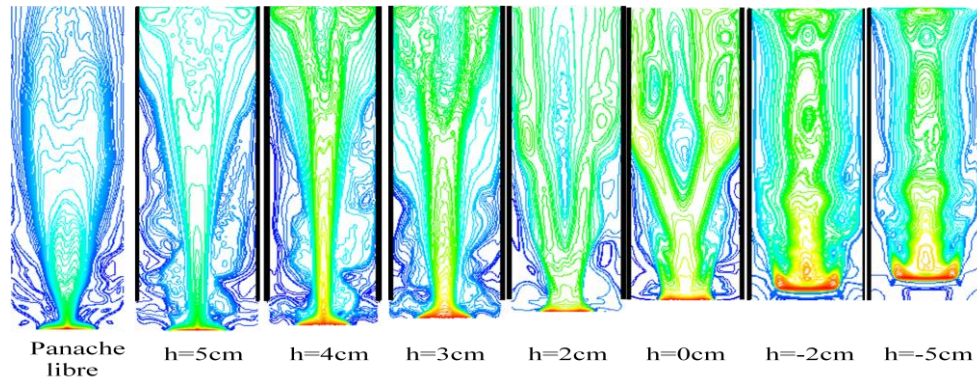


Figure 2 : Champ thermique

On constate clairement l'apparition des trois zones habituelles du panache confiné [4, 5, 6, 7, 9, 10]. La première zone près de source est la zone d'instabilité où le gradient de la température est le plus important. La deuxième zone, dans la partie centrale du canal, est la zone de développement du panache. La troisième zone, dans la partie supérieure du canal, est la zone de turbulence où le panache devient plus homogène.

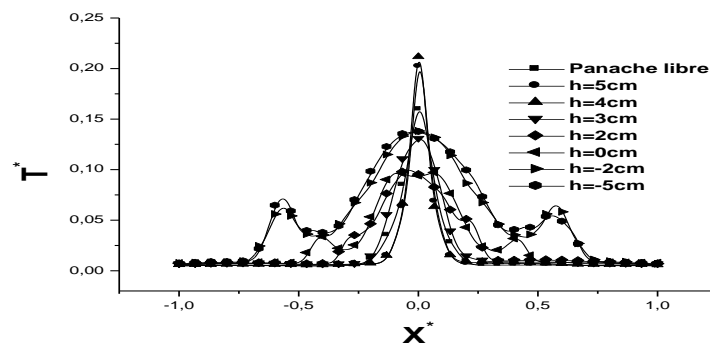


Figure 3 : Evolution longitudinale de la Température moyenne pour  $Z^*=0.1$

L'augmentation de l'espacement source-canal  $h$  aide à l'atténuation de la première zone et à partir de  $h=4\text{cm}$ , nous remarquons la disparition de cette zone. Le champ thermique montre que le panache confiné dans le canal devient semblable au panache libre à partir d'un espacement  $h=4\text{cm}$ .

La figure 3 montre les profils longitudinaux de la température pour  $Z^*=0.1$ . Ces profils justifient que le confinement aide à la propagation et le développement du panache, d'où le gradient de la température devient plus important avec la diminution de  $h$ . le profil gaussienne du panache libre apparaît à partir d'une valeur de  $h=4\text{cm}$ . L'absence de la première zone est assurée pour  $h \geq 4\text{cm}$ .

### 3.2. Aspect dynamique

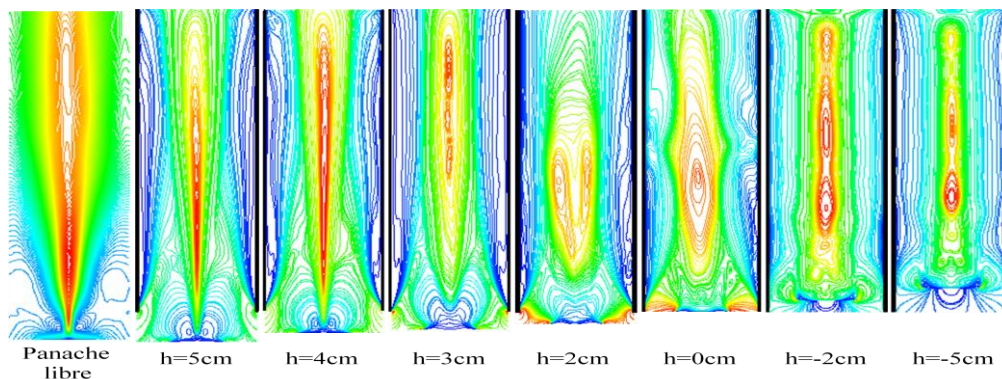


Figure 5 : Champ dynamique

D'après les isovalues du champ dynamique (figure 5), il est clair que le panache confiné dans un canal est semblable au panache libre à partir d'un espacement source-canal  $h=4\text{cm}$ . Pour les valeurs négatives de  $h$ , on remarque que la vitesse est plus intense dans la partie centrale du canal et qu'elle diminue jusqu'à la sortie du canal. Alors que pour les autres valeurs de  $h$ , la vitesse devient plus homogène à la sortie du canal. Donc l'augmentation de l'espacement source canal aide à l'homogénéisation de l'écoulement dans la partie supérieure du canal.

La figure 6 représente l'évolution longitudinale de la vitesse moyenne pour  $Z^*=0.1$ . Cette figure montre que la vitesse devient plus importante lorsque la source est située dans le canal dans sa partie inférieure ( $h \leq 0$ ).

Les profils de la vitesse montrent que le panache confiné devient semblable à un panache libre pour les espacements supérieurs ou égaux à 4 cm, d'où la présence de profil gaussien.

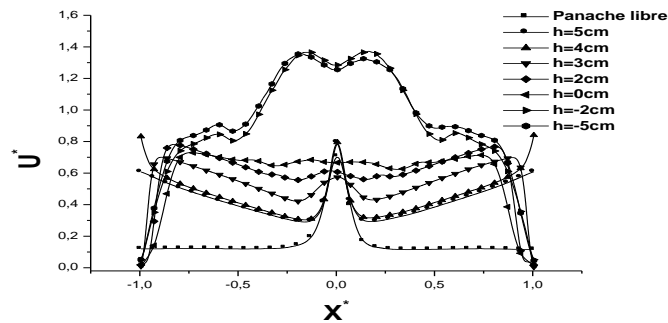


Figure 6 : Evolution longitudinale de la vitesse moyenne pour  $Z^*=0.1$

### 3.3. Etude spectrale

Les figures 7 et 8 présentent respectivement la variation temporelle de la vitesse et leur spectre de fluctuation. L'existence d'un phénomène périodique, qui est la formation et l'échappement des battements au-dessus de la source, nous permettons d'étudier l'effet de la hauteur du canal sur la fréquence de formation échappement de cette structure tourbillonnaire. Cette fréquence est déterminée en utilisant la transformation rapide du Fourier (FFT).

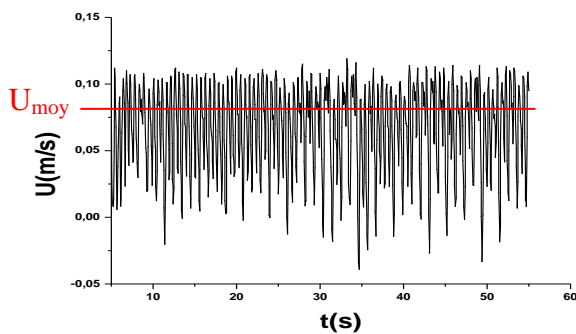


Figure 7 : variation temporelle de la vitesse

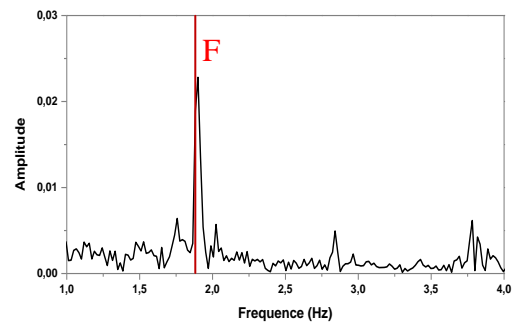


Figure 8 : spectre de fluctuation de la vitesse

$h(\text{cm})$	-5	-4	-3	-2	0	2	3	4	5
$U_{\text{moy}}(\text{m/s})$	0.497	0.5	0.509	0.448	0.256	0.239	0.221	0.309	0.309
$F(\text{Hz})$	2.04	2.07	2.115	2.15	1.925	2.07	1.63	2.00	2.05
$10^{-5} \cdot Gr$	20,593	20,145	19,717	19,306	18,534	17,821	17,484	17,161	16,849
St	1,847	1,904	1,952	2,303	3,759	4,503	3,909	3,495	3,648

Tableau 1

Dans le tableau 1, on trouve la fréquence d'échappement pour chaque espacement source-canal  $h$ , la vitesse moyenne, le nombre de Strouhal et le nombre de Grashof.

La variation du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Grashof (figure 9) montre que si  $h$  diminue (le nombre de Grashof augmente) le nombre de Strouhal tend vers une valeur constante. L'effet de la

position de la source est apparu que lorsque la source est en dehors du canal (h est positif). Pour ces positions de la source, en dehors du canal, la valeur de nombre de Strouhal est au voisinage d'une valeur qui correspond au panache libre ( $St$  (panache libre)=3.49). Donc, le panache confiné est semblable au panache libre pour des espacements supérieurs ou égal à 4cm.

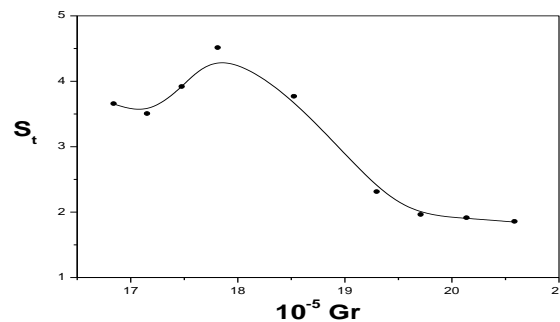


Figure 9 : variation de nombre de Strouhal en fonction de nombre de Grashof

## Conclusion

Dans ce travail, nous avons fait la comparaison de la structure d'un panache thermique confiné dans un canal vertical avec celle d'un panache libre et nous avons déterminé l'effet de l'espacement source canal h sur la structure du panache confiné. Nous avons trouvé que le panache confiné admet la même structure d'un panache libre pour les espacements  $h \geq 4cm$ . Nous avons conclu que le confinement du panache aide à le développer.

## Nomenclature

$U_j$  : la composante de la vitesse locale, m/s

$U$  : le module de la vitesse locale, m/s

$U_{ref} = (g\beta(T_s - T_a)d)^{1/2}$ , m/s

$U^* = U/U_{ref}$  : la vitesse adimensionnelle

$p$  : la pression, Pa

$T$  : la température moyenne locale, °C

$T_s$  : la température de la source, °C

$T_a$  : la température ambiante, °C

$T^* = (T - T_a) / (T_s - T_a)$  : température moyenne adimensionnelle

$g$  : Accélération de la pesanteur,  $m/s^2$

$d$  : largeur de la source, m

$D$  : largeur du canal, m

$L$  : hauteur du canal, m

$V_{moy}$  : vitesse moyenne locale, m/s

$Z^*$  : coordonnée verticale adimensionnelle

$X^*$  : coordonnée horizontale adimensionnelle

$\beta$  : coefficient de dilatation thermique du fluide,  $K^{-1}$

$\rho$  : masse volumique,  $Kg/m^3$

$\nu$  : la viscosité cinématique,  $m^2/s$

$k$  : diffusivité thermique,  $m^2/s$

$Gr = (g\beta(T_s - T_a)d^4) / (L+h)\nu^2$  : nombre de Grashof

$St = (F^*(L+h)) / V_{moy}$  : nombre de Strouhal

## Références

- [1] W. Chen and W. Lui, Numerical analysis transfers in a composite wall solar-collector system with a porous absorber, *Applied Energy* 78 (2004) 137-149.
- [2] J. J. Beziau and G. Arnaud, Application de la convection naturelle en cavité inclinée au chauffage solaire passif, *Séminaire sur l'énergie solaire*, Canne: 1982.
- [3] M. Tan, opposite sunspaces passive solar air heating system, *Solar Energy* 60, (1997) 127-134.
- [4] A. O. M. Mahmoud ; R Ben Maad et A. Belghith, interaction d'un écoulement de thermosiphon avec un panache thermique à symétrie axiale : étude expérimentale, *Rev. Gen. Therm.* 37 (1983) 385-396.
- [5] J. Zinoubi, R. Ben Maad et A. Belghith, Experimental study of the resulting flow of plume thermosiphon interaction: application to chimney problems, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 533-544.
- [6] R. Ben Maad, Etude d'un écoulement de convection naturelle dans un canal vertical chauffé, *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université de Tunis II- Faculté des Sciences de Tunis 1995.
- [7] A. O. M. Mahmoud, J. Zinoubi et R. Ben Maad, Study of hot air generator with quasi-uniform temperature using concentrated solar radiation: influence of the shape parameters, *Renewable Energy* 32 (2007) 351-364.
- [8] R. Ben Maad et A. Belghith, The use of grid-generated turbulence to improve heat transfer in passive solar systems, *Renewable Energy* vol 2, N°3 pp: 333-336; Printed in Great Britain (1992).
- [9] Gammoudi, A., Zinoubi, J., M., and Maad, R. B., Experimental study of a thermal plume evolving in a vertical heated channel: influence of the temperature of the plume source, *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 288-296, 2010.
- [10] Taoufik Naffouti; Jamil Zinoubi et Rejeb Ben Maad, Experimental characterization of a free thermal plume and in interaction with its material environment, *Applied Thermal Engineering* 30 1632-1643 (2010)
- [11] Belgacem Jouini, Mourad Bouterra, Olivier Vauquelin, Afif El Cafsi, Ali Belghith, Thermal Plume in a Vertical Channel: Effect of the Source-Channel Vertical Spacing, *Heat Transfer Research*, 2011, Vol. 42, No. 6 pp: 557-569.