



**HAL**  
open science

## **Etude analytique de la condensation laminaire de type film d'une vapeur saturée dans un canal vertical dont les parois sont recouvertes d'une couche poreuse**

Mohamed Asbik, Belkacem Zeghmati, Xavier Chesneau, Wei-Mon Yan

### ► **To cite this version:**

Mohamed Asbik, Belkacem Zeghmati, Xavier Chesneau, Wei-Mon Yan. Etude analytique de la condensation laminaire de type film d'une vapeur saturée dans un canal vertical dont les parois sont recouvertes d'une couche poreuse. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00246548

**HAL Id: hal-00246548**

**<https://hal.science/hal-00246548>**

Submitted on 7 Feb 2008

**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.

# ETUDE ANALYTIQUE DE LA CONDENSATION LAMINAIRE DE TYPE FILM D'UNE VAPEUR SATURÉE DANS UN CANAL VERTICAL DONT LES PAROIS SONT RECOUVERTES D'UNE COUCHE POREUSE

Mohamed ASBIK<sup>1</sup>, Belkacem ZEGHMATI<sup>2</sup>, Xavier CHESNEAU<sup>2</sup>, Wei-Mon YAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Equipe de Thermodynamique et Energétique, UFR de Modélisation, Optimisation et Ingénierie des Systèmes Energétiques, Faculté des Sciences et Techniques, B.P. 509 Boutalamine, Errachidia, Maroc.*

<sup>2</sup> *Laboratoire de Mathématiques et Physique des Systèmes-Groupe de Mécanique Energétique (MEPS –GME), Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66860, Perpignan Cedex, France.*

<sup>3</sup> *Department of Mechatronic Engineering, Huafan University, Shih Ting, Taipei, Taiwan 22305, Republic of China.*

[asbik\\_m@yahoo.fr](mailto:asbik_m@yahoo.fr), [zeghmati@univ-perp.fr](mailto:zeghmati@univ-perp.fr), [chesneau@univ-perp.fr](mailto:chesneau@univ-perp.fr), [wmyan@cc.hfu.edu.tw](mailto:wmyan@cc.hfu.edu.tw)

**Résumé** – Une étude analytique de la condensation en film laminaire d'une vapeur pure et saturée dans un canal vertical dont les parois sont isothermes et recouvertes d'un matériau poreux, est présentée. Dans le milieu poreux, l'écoulement est décrit par le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer tandis que les transferts dans le liquide pur sont régis par les équations classiques de la couche limite. Nous examinons plus particulièrement l'influence de la porosité du milieu  $\varepsilon$  sur les transferts thermiques dans le matériau poreux et la phase liquide.

**Mots clés :** Condensation, Matériau poreux, Darcy-Brinkman-Forchheimer, Film laminaire, Canal vertical.

## 1. INTRODUCTION

Les transferts thermiques engendrés lors de la condensation de vapeur saturée dans un milieu poreux ont reçu une attention particulière en raison de leurs diverses applications dans de nombreux domaines technologiques, notamment, les échangeurs, le refroidissement des composants électroniques, stockage de l'énergie,... Ainsi, la présence d'une couche de matériau poreux sur une paroi plane engendre un accroissement du transfert de chaleur comparé à celui observé pour une plaque plane, soumise aux mêmes conditions aérodynamique et thermique [1-4]. A ce titre, nous présentons une analyse de la condensation laminaire de type film d'une vapeur saturée dans un canal de section rectangulaire, vertical dont les parois internes sont recouvertes d'une couche de matériau poreux. Cette étude est menée en résolvant analytiquement les équations de mouvement et numériquement les équations qui régissent les transferts de chaleur dans le film liquide et le milieu poreux. Les résultats sont focalisés sur l'analyse de l'influence des caractéristiques du milieu poreux, notamment, la porosité du milieu sur les transferts thermiques.

## 2. ANALYSE

### 2.1 Modèle physique et hypothèses

Notre modèle est constitué d'un canal vertical formé de deux plaques de longueur  $L^*$ , espacées d'une distance  $2H^*$  (figure 1). Les faces internes de ces plaques, supposées de faibles épaisseur, sont recouvertes d'un matériau poreux d'épaisseur  $e^*$ , de perméabilité  $K$  et de porosité  $\varepsilon$  et maintenues à une température  $t_w^*$  inférieure à celle d'une vapeur saturée  $t_s^*$  qui entre dans le canal à une vitesse uniforme  $U_0$ . Il en résulte une condensation de cette vapeur sur le milieu poreux et la présence de trois zones : (1) le milieu poreux saturé par le liquide, (2) le film de condensât et (3) la vapeur saturante. Le condensât d'épaisseur  $\delta^*$  est soumis à l'action des forces de pesanteur, de pression et de frottement. Associés à ce canal un référentiel cartésien tel que les axes soient orientés comme il est indiqués sur la figure 1.

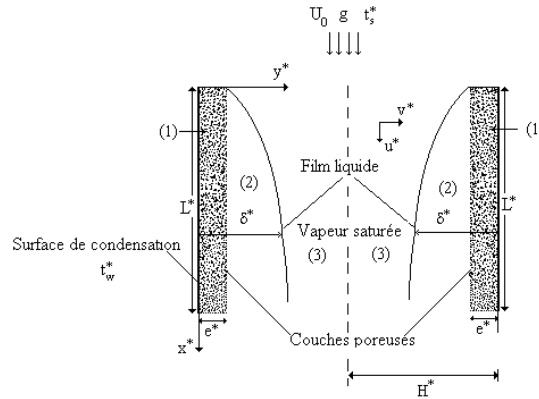


Figure 1 : Schéma du modèle

Nous supposons que :

- i. Les écoulements sont laminaires, permanents et bidimensionnels.
- ii. Les propriétés thermophysiques sont constantes et les fluides sont incompressibles.
- iii. La viscosité dynamique effective est égale à celle du film liquide.
- iv. La condensation se produit sous forme d'un film mince d'épaisseur supérieure à celle du matériau poreux.
- v. Le substrat poreux est saturé, homogène, isotrope et il est en équilibre local avec le condensât.
- vi. L'écoulement de la vapeur est considéré symétrique par rapport au plan médian.
- vii. La variation transversale de la pression n'est pas prise en compte.

## 2.2 Adimensionnalisation et transformation des équations

Les équations qui régissent les transferts dans les domaines (1) et (2) définis ci-dessus ainsi que les conditions aux limites qui leur sont associées, ont été adimensionnalisées à l'aide des variables et des paramètres suivants [2 ; 4-5]:

$$x = \frac{x^*}{L^*}, y = \frac{y^*}{H^*}, \quad u_\xi^* = \frac{u_\xi^* \mu_\ell}{GH^{*2}}, \quad G = \rho_\ell g - \frac{dP^*}{dx^*}, \quad \theta_\xi = \frac{t_\xi^* - t_w^*}{t_s^* - t_w^*} \quad (\xi = \ell \text{ ou } p).$$

Le plan  $(x, y)$  est substitué par un domaine rectangulaire  $(X, \eta)$  par les transformations suivantes [2-4]:

$$\bullet \text{ Dans la couche poreuse, } 0 \leq y \leq e: \quad X = x, \eta = y/e. \quad (1)$$

$$\bullet \text{ Dans le liquide pur, } e \leq y \leq \delta: \quad X = x, \eta = 1 + (y - e)/(\delta - e). \quad (2)$$

## 2.3 Conditions aux limites

$$\bullet \text{ A la paroi, } \eta = 0: \quad u_p = v_p = 0, \quad \theta_p = 0 \quad (3a-b)$$

- A l'interface milieu poreux/condensat,  $\eta = 1$  :

$$u_p = u_\ell, \theta_p = \theta_\ell, \left. \frac{\gamma}{e} \frac{\partial u_p}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} = \frac{1}{(\delta - e)} \left. \frac{\partial u_\ell}{\partial \eta} \right|_{\eta=1}, \left. \frac{1}{e} \frac{\partial \theta_p}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} = \frac{\lambda}{(\delta - e)} \left. \frac{\partial \theta_\ell}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} \quad (3c-f)$$

- A l'interface liquide/vapeur,  $\eta = 2$  :  $\left. \frac{\partial u_\ell}{\partial \eta} \right|_{\eta=2} = 0, \quad \theta_\ell = 1 \quad (3g-h)$

## 2.4 Bilan thermique

Le bilan thermique s'exprime, sous forme adimensionnelle, par la relation suivante:

$$F_L \frac{Ja}{(\text{Pr})_{eff}} \left. \frac{1}{e} \frac{\partial \theta_p}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = \frac{d}{dx} \left[ e \int_0^1 u_p d\eta + (\delta - e) \int_1^2 u_\ell d\eta \right] \quad \text{où } F_L = \frac{L^* c_f}{\sqrt{K} F} \quad (4)$$

## 2.5 Procédure de résolution

Dans les domaines (1) et (2), les équations de mouvement ont été résolues analytiquement [2 ; 4]. Ainsi, les profils de vitesses sont donnés par :

$$u_p = -\frac{3}{2} \chi_2 \left[ \omega^2 - \frac{2}{3} \right] - \chi_0, \quad u_\ell = -\frac{1}{2} (\delta - e)^2 \eta^2 + a_1 \eta + a_0 \quad (5a-b)$$

L'expression de la fonction  $\omega$  ainsi que celles des paramètres et coefficients  $\chi_2, \chi_0, a_1$  et  $a_0$  sont exprimées dans les références [2 ; 4]. D'autre part, les équations de la chaleur et les conditions aux limites qui leurs sont associées, discrétisées à l'aide d'un schéma implicite aux différences finies [6] conduisent à des systèmes d'équations algébriques de type tridiagonale que nous avons résolus par l'algorithme TDMA. Le maillage du domaine est considéré uniforme dans les directions transversale et longitudinale. L'épaisseur du film liquide est calculée par une procédure itérative basée sur une comparaison entre la valeur attribuée à l'épaisseur du film liquide et celle calculée à l'aide de la méthode de la sécante à partir de la densité du flux de chaleur à l'interface liquide-vapeur (4). Le critère de convergence, fixé à  $10^{-8}$ , est vérifié après quatre à cinq itérations.

## 3. PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats présentés sont relatifs à un canal de longueur 1 m, dont les parois internes sont isothermes et recouvertes d'une couche d'un matériau poreux. La température à l'interface liquide-vapeur est égale à la température de saturation ( $t_s^* = 90^\circ \text{C}$ ), et la différence de température  $\Delta t^*$  entre la paroi et l'interface liquide-vapeur est égale à  $20^\circ \text{C}$ . Les valeurs affectées aux paramètres adimensionnels  $\gamma = \frac{\mu_{eff}}{\mu_\ell}$ ,  $\lambda = \frac{k_\ell}{k_{eff}}$  et  $F = \frac{\rho_\ell c_f H^{*4}}{\sqrt{K} \mu_\ell^2} G$  sont

respectivement égales à 1.0, 1.0 et  $10^3$ . La perméabilité  $K$  est déterminée selon le modèle de la référence [6]. Sur la figure 2, nous présentons l'évolution de l'épaisseur adimensionnelle du film liquide rapportée à l'épaisseur adimensionnelle de la couche poreuse en fonction de la position adimensionnelle  $X$  le long du canal. On note que  $\delta/e$  est une fonction croissante de l'abscisse et augmente lorsque la porosité diminue. Cette évolution provoque des variations des échanges thermiques entre les parois du canal et la phase vapeur qui sont illustrées sur la figure 3 où l'on constate que les transferts thermiques (nombre de Nusselt local) augmentent généralement avec la porosité puisque l'élargissement des espaces vides dans la matrice poreuse favorise l'infiltration du liquide ce qui diminue l'épaisseur du condensât et par suite

augmente les transferts thermiques entre la vapeur et le milieu poreux. A la position  $X=0.5$  ; les profils de températures (figure 4) et ceux de la vitesse longitudinale (figure 5) sont présentés en fonction de l'ordonnée  $\eta$  pour différentes valeurs de la porosité ( $\varepsilon = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  et  $1.0$ ). Dans les deux domaines, les profils de températures sont linéaires pour tous les cas reportés dans cet article et cette linéarité est due au fait que les termes convectifs dans les équations de transferts sont négligeables (figure 4). On remarque que la température du milieu poreux et celle du liquide augmente avec la porosité et que le gradient de température à l'interface milieu poreux/liquide pur, ne subit pas de variation significative comme dans le cas des variations du paramètre  $F$  [7]. Quant à la figure 5, elle montre que l'accroissement de la porosité engendre une augmentation de la vitesse longitudinale dans les deux domaines, qui devient de plus en plus importante à l'approche de  $\eta = 2$ , valeur correspondant à la frontière entre le liquide pur et sa vapeur saturée (figure 5).

#### 4. Conclusion

Nous avons analysé la condensation d'une vapeur pure et saturée à l'intérieur d'un canal vertical de section rectangulaire dont les faces internes sont recouvertes d'une couche de matériau poreux. Dans la couche poreuse et le liquide pur, les équations de mouvement ont été résolues analytiquement tandis que les équations qui régissent les transferts de chaleur dans le film de condensât et le milieu poreux ont été résolues à l'aide d'une méthode implicite aux différences finies et l'algorithme TDMA. Les résultats montrent que les transferts thermiques augmentent avec la porosité. Cette étude peut éventuellement être appliquée à l'analyse des transferts dans un mini-canal [8].

#### Nomenclature

$C_f$	coefficient de Forchheimer
$g$	accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$
$Ja$	nombre de Jacob
$k$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$P^*$	pression
$Pr$	nombre de Prandtl
$t^*$	température, K
$\Delta t^*$	$(t_s^* - t_w^*)$ , K
$u^*$	vitesse suivant $x$ , $m.s^{-1}$
$x^*, y^*$	coordonnées cartésiennes

#### Symboles Grecs

$\delta^*$	épaisseur du film liquide, m
$\mu$	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$

$\rho$  masse volumique,  $kg.m^{-3}$

#### Indices- exposant

eff	effective
$\ell$	liquide pur
p	milieu poreux
*	quantités avec dimension
s	saturation
v	vapeur
w	paroi

#### Références

- [1] K.-J. Renken and C.-D. Mueller, Measurements of enhanced film condensation utilizing a porous metallic coating, *Journal of Thermophysics Heat Transfer*, 7 (1993) 148-152.
- [2] M. Asbik., R. Chaynane, H. Boushaba, B. Zeghmati and A. Khmou, Analytical investigation of forced convection film condensation on a vertical porous-layer coated surface, *Heat and Mass Transfer*, 40 (1-2), pp.143 – 155, 2003.
- [3] R. Chaynane, M. Asbik, H. Boushaba, B. Zeghmati et A. Khmou, Etude de la condensation en film laminaire en convection forcée d'une vapeur pure et saturée sur la paroi poreuse d'une plaque inclinée, *Revue de Mécanique et Industrie*, 5 (4), pp381-391, 2004.

[4] M. Asbik, B. Zeghmami, H. Gualous\_Louahlia and W. M. Yan, The effect of thermal dispersion on free convection film condensation on a vertical plate with a thin porous layer, *Transport in Porous Media*, Vol,67(3), pp. 335-352, 2007.

[5] A. V. Kuznetsov, Analytical study of fluid flow during forced convection in a composite channel partly filled with a Brinkman-Forchheimer porous medium, *Flow, Turbulence and Combustion*, 60, pp173-192, 1998.

[6] A. Bejan, Convective heat transfer, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley, New York, (1995) (Chapter 12).

[7] M. Asbik, O. Ansari, H. Louahlia-Gualous and M. W. Yan, Analytical study of fluid flow during convection film condensation in a vertical parallel-plate partly filled with a Brinkman-Forchheimer thin porous layer, *Actes du 8ème Congrès de Mécanique*, Vol.2 pp. 33\_35, El Jadida (Maroc), 17\_20 Avril 2007.

[8] H. Gualous\_Louahlia, M. Asbik, Numerical modelling of annular film condensation inside a miniature tube, Numerical Heat Transfer Part A, (NHT06/4160) (2006) (in press).

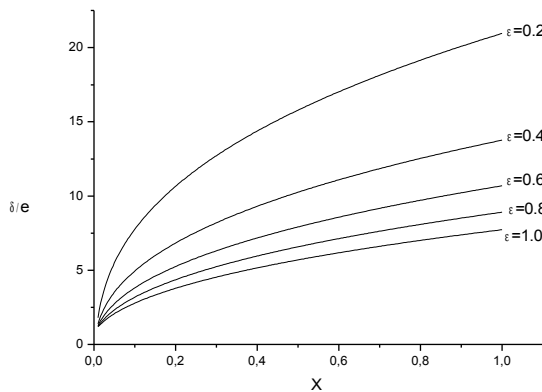


Figure 2: Influence de la porosité sur l'épaisseur adimensionnelle du film liquide.

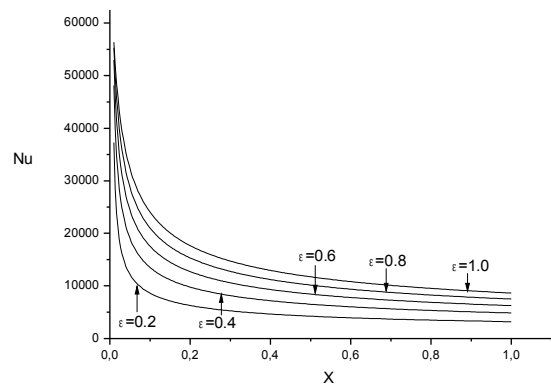


Figure 3: Evolution du nombre de Nusselt le long du canal.

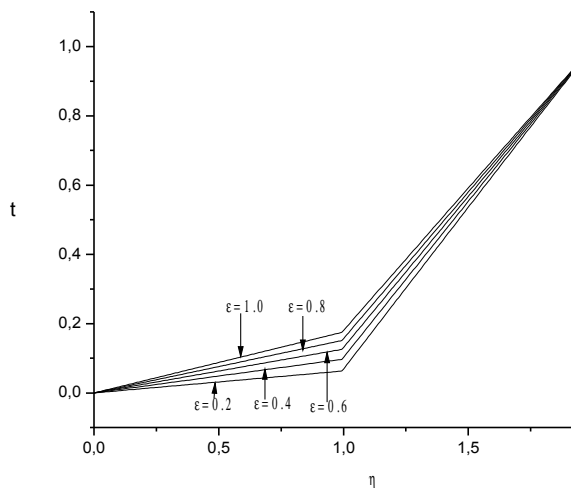


Figure 4 : Profils des températures en fonction de l'ordonnée adimensionnelle à la position X=0.5.

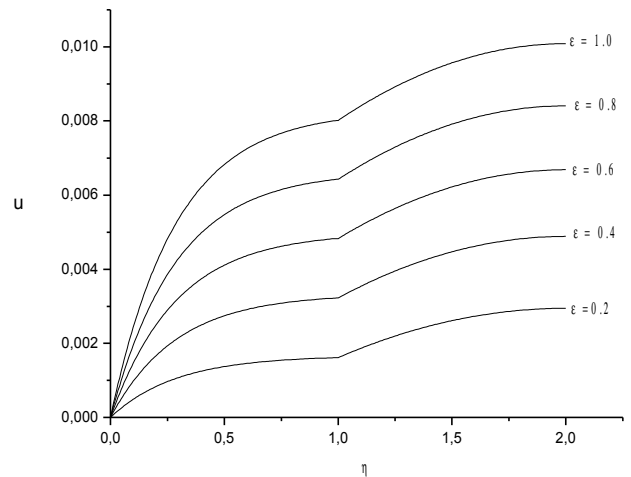


Figure 5 : Profils des vitesses longitudinales en fonction de l'ordonnée adimensionnelle à la position X=0.5