

Etude expérimentale et numérique de la convection naturelle en régime transitoire. Application : Refroidissement d'un ruban en laiton plongé horizontalement dans un bain d'azote liquide

K.BOUAZAOUI^{1*}, R.AGOUNOUN¹, K.SBAI¹, A.ZOUBIR¹, M.RAHMOUNE¹, R.SAADANI¹

¹ Laboratoire d'Etude des Matériaux Avancés et Applications (LEM2A), Faculté des sciences, École supérieure de Technologie, Université Moulay Ismail BP 11201, Meknès-Maroc

*Auteur correspondant : kenza.boazaoui@gmail.com

Résumé

Dans cette communication nous présentons l'étude de la convection naturelle en régime transitoire. Une étude expérimentale est réalisée sur un ruban de laiton en position horizontale afin de quantifier les échanges thermiques par convection naturelle. Un calcul numérique bidimensionnel permettant de modéliser la distribution de la température du ruban en régime transitoire a été développé. L'objectif de cette étude consiste à analyser et optimiser le refroidissement du ruban.

Mots clés : Convection naturelle; Etude expérimentale
Modélisation numérique; Azote liquide; Régime transitoire

Nomenclature

C_p : Chaleur spécifique, $\text{KJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 h : Coefficient de chaleur, $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
 I : Intensité, [A]
 l : Longueur, [m]
 L : Largeur, [m]
 \dot{q} : Densité de flux de chaleur, $[\text{W}/\text{cm}^2]$
 S : Surface, $[\text{m}^2]$
 T : Température, [K]
 T_{sat} : Température de saturation, °K
 t : Temps, [s]
 U : Tension, [V]

Symboles grecs

Δ : Écart
 ρ : Résistivité électrique, $[\mu\Omega \cdot \text{cm}]$
 σ : Coefficient de température, $[\text{K}^{-1}]$

Indices et exposants

e : Emissive

1. Introduction

La convection naturelle sur une plaque a fait l'objet de plusieurs études théoriques, expérimentales et numériques [1,2,3] en raison de son utilisation fréquente dans l'industrie et les applications d'ingénierie telles que le refroidissement des équipements électroniques, les industries de transformation alimentaires, la conception des réacteurs nucléaires et l'énergie solaire passive pour le chauffage. Nous présentons dans cet article une étude expérimentale et numérique de la convection naturelle transitoire sur un ruban plongé dans un bain d'azote liquide et chauffé par effet joule. Nous cherchons à déterminer la distribution de la température de la paroi en régime transitoire et à analyser les effets de la convection naturelle sur le refroidissement.

2. Prototype expérimental

Les expériences sont réalisées dans l'azote liquide avec des conditions de pression et de saturation de l'atmosphère. Un support formé de plots de maintien et d'alimentation électrique et d'un ruban en laiton (10^{-1} m de longueur, 2.10^{-3} m de largeur et 50.10^{-6} m d'épaisseur) soumis à des échelons de flux de chaleur générés par une alimentation de puissance. Ce support est plongé en permanence dans un vase Dewar rempli de LN2 dont la température est suivie au moyen de sonde de platine.

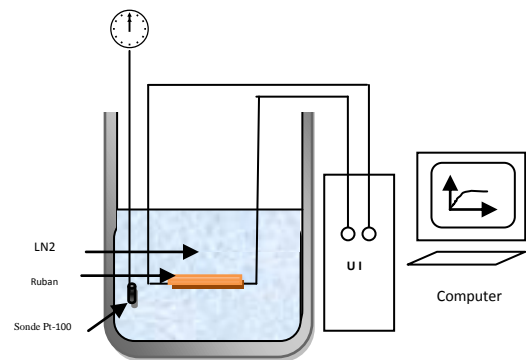


Figure 1 : Dispositif expérimental

La puissance calorifique dissipée par effet joule dans le ruban est égale au produit $U \cdot I$ et le flux de chaleur à la surface du ruban est calculé donc à partir de la formule :

$$\dot{q} = \frac{U_{\text{ruban}} \cdot I_{\text{in}}}{S_e} \quad (1)$$

La température de la surface du ruban est déterminée à partir de la mesure de la résistivité électrique.

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot (1 + \sigma_0 \cdot T) \quad (2)$$

Principalement il y a deux paramètres importants conditionnant le choix de la nature du ruban; d'une part la valeur de sa résistivité électrique à la température de l'azote liquide et d'autre part la variation de cette résistivité avec la température. En effet, la résistance électrique du ruban à 77 K doit être suffisante pour permettre la dissipation d'un flux de chaleur généré par effet Joule tout en injectant dans l'élément un courant électrique raisonnable et le coefficient de température $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ doit être suffisamment élevé pour permettre la mesure.

3. Résultats expérimentaux et analyse

Pour des faibles flux de chaleur surfaciques, l'énergie générée par effet Joule est entièrement dissipée par la convection naturelle du liquide autour du ruban chauffant. La figure (2) montre que pour les densités du flux imposées, dont la valeur est inférieure à 1,17W.cm⁻² conduisent à des états stationnaires de convection naturelle avec une durée du régime transitoire de 2 secondes environ.

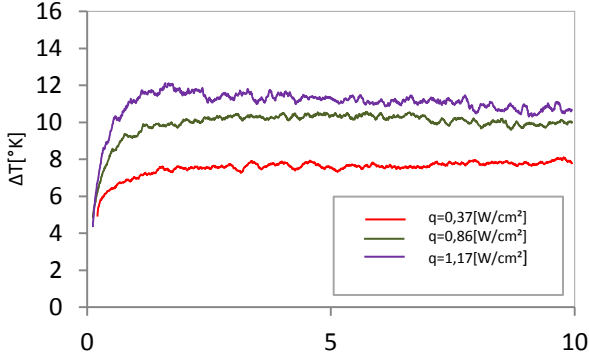


Figure 2: Surchauffe en fonction du temps dans la zone convection naturelle

4. Configuration géométrique et formulation mathématique

La configuration étudiée est schématisée sur la figure(3). Il s'agit d'un ruban en laiton de longueur l , de largeur L et de masse volumique ρ . Le ruban est immergé en permanence dans un bain d'azote liquide (LN2) à une température de -196°C. Ce dernier reçoit une densité de flux de chaleur q sur l'extrémité droite tandis que les autres extrémités sont adiabatiques. Pour une formulation simple du modèle mathématique, nous considérons que le ruban est homogène et isotrope et que sa température est uniforme sur toute sa longueur.

Dans ce qui suit, nous présentons la configuration géométrique et la formulation mathématique, la méthode numérique utilisée pour résoudre numériquement l'équation de conservation d'énergie.

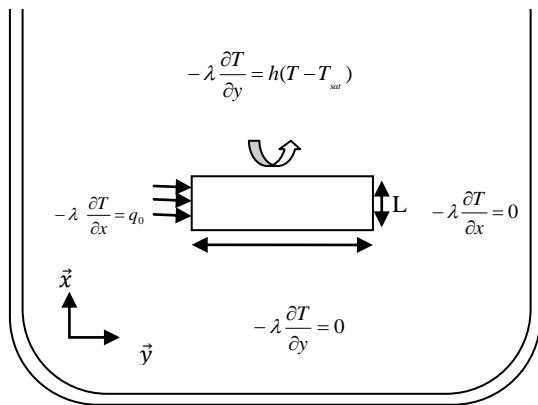


Figure 3 : Configuration géométrique

La modélisation du transfert thermique au sein du matériau en laiton revient à résoudre l'équation de la chaleur qui s'écrit

sous la forme suivante en supposant un problème bidimensionnel :

$$\rho c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

En effectuant le changement de variable $T = T_p - T_{sat}$ on obtient l'équation de problème suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Où $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ représente la diffusivité thermique du matériau.

Sur la surface de contact direct avec l'azote liquide, l'échange thermique se fait par convection naturelle. Soit h le coefficient d'échange par convection par unité de surface, la densité de flux sur cette surface s'écrit :

$$q = h(T_p - T_{sat}) = hT \quad (5)$$

4-1. Conditions initiales, conditions aux limites :

Une condition initiale ainsi que quatre conditions aux limites sont nécessaires à la résolution de l'équation de la chaleur.

Condition initiale :

Pour $t=0$ et $x > 0, y > 0$: $T(x, y, t) = T_0(x, y) = 0$

Conditions aux limites sur les surfaces :

$$\begin{aligned} x = l, 0 \leq y \leq L & : -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q \\ x = 0, 0 \leq y \leq L & : -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ 0 \leq x \leq l, y = 0 & : -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ 0 \leq x \leq l, y = L & : -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_p - T_{sat}) = hT \end{aligned}$$

5. Méthode numérique

Les équations et les conditions aux limites qui leur sont associées sont discrétisées à l'aide de la méthode des différences finies, suivant un schéma d'ordre 1 et 2 respectivement en temps et en espace [4]. Le schéma de discrétisation en temps et en espace et de type explicite.

Les valeurs des pas de temps et d'espace : $\Delta x = 0.002m$, $\Delta y = 0.0002m$, $\Delta t = 0.0005s$, sont issues d'un compromis entre la précision des résultats et un temps de calcul du programme convenables. Le programme est implémenté sous Matlab.

Après discrétisation en temps et en espace, nous obtenons la formulation discrétisée de l'équation de la chaleur instationnaire sous la forme :

$$T_{ij}^{n+1} = T_{ij}^n (1 - 2\alpha_1 - 2\alpha_2) + \alpha_1 (T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n) + \alpha_2 (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n) \quad (6)$$

Avec

$$\alpha_1 = \frac{k\Delta t}{\Delta x^2} \text{ et } \alpha_2 = \frac{k\Delta t}{\Delta y^2}$$

Les indices i, j permettent de positionner chaque point situé au sein d'un volume élémentaire et l'indice n sera utilisé pour le temps.

Le tableau suivant récapitule les paramètres d'entrée utilisés dans le modèle numérique développé.

Tableau 1 : Valeurs numériques utilisées dans le modèle

Paramètres	Valeurs	Unités
C_p	377	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
λ	121	$W.m^{-1}.K^{-1}$
L	0.002	m
l	0.1	m
T_{sat}	77.15	K
ρ	8386	$Kg.m^3$

6. Résultats numériques et analyse

La figure(4) présente l'évolution numérique de la surchauffe ΔT en zone de convection naturelle sur la surface de contact entre l'azote liquide et le ruban pour différentes densités de flux imposées en expérience. On retrouve la même allure du profil de température que celle obtenue expérimentalement. En effet, l'évolution de la température se fait bien en deux temps. Tout d'abord la température croît pendant les 2 premières secondes, puis elle prend une valeur constante, on remarque de plus une augmentation de la température du fait de l'augmentation de la densité de flux.

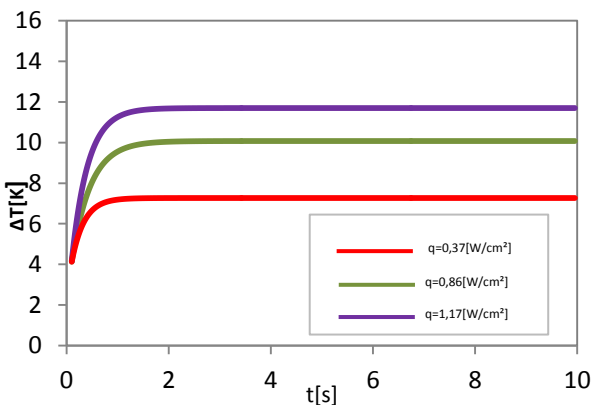


Figure 4: Distribution numérique de la Surchauffe en fonction du temps dans la zone de convection naturelle

7. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques

La figure(5) illustre une comparaison qualitative entre l'évolution de la surchauffe ΔT mesurée expérimentalement (trait continu) en zone de convection naturelle et celle obtenue numériquement. Les profils numériques sont en excellent accord avec ceux expérimentaux, des erreurs relatives sont présentées pour les différentes densités de flux (cf. Tab2). On observe de plus que les discordances croissent avec l'augmentation du flux de chaleur. En effet, l'augmentation des échanges thermiques permet d'abaisser la température du ruban. Le tableau 2 fournit une comparaison de la simulation avec l'expérience basée sur des paramètres globaux et les erreurs relatives pour les différentes densités de flux.

Tableau 2 : Comparaison entre la température simulée et la valeur expérimentale

$q[W/m^2]$	$h_{moy}[W/m^2.K]$	$\Delta T_{moy}[K]$		ϵ
		$\Delta T[K]_{Exp}$	$\Delta T[K]_{Num}$	
11700	1046,89	10,71	11,68	9%
8670	874,19	9,76	10,07	3 %
3780	518,78	7,30	7,26	0,5%

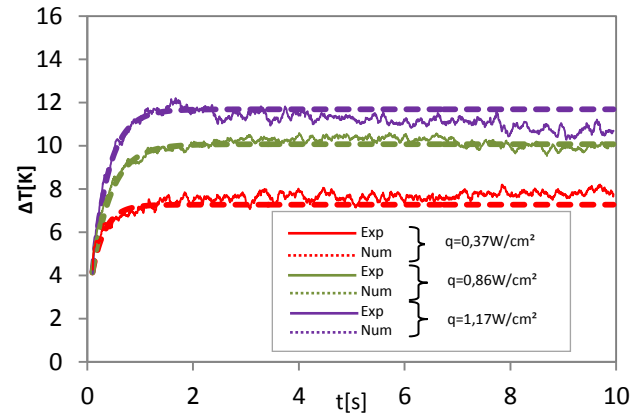


Figure 5: Comparaison du modèle aux mesures expérimentales

8. Conclusion

Les travaux décrits dans cette communication s'articulent autour de deux axes. D'abord, une expérience capable de donner des mesures précises a été réalisée dans l'azote liquide avec un ruban en laiton afin de pouvoir étudier la distribution de la température dans la zone de convection naturelle en régime transitoire. Ensuite, nous avons élaboré un modèle mathématique afin d'améliorer la connaissance des mécanismes de transfert thermique dans cette zone. Les résultats montrent une augmentation de la surchauffe ΔT lors de l'augmentation de la densité de flux pendant les deux premières secondes, celle-ci est due à une augmentation de l'énergie transmise. L'état stationnaire qui suit cette augmentation montre l'équilibre thermique réalisé entre l'azote liquide et le ruban chauffant.

Pour des applications industrielles, l'étude présente un procédé de refroidissement des matériaux électroniques plus fins. Cependant on remarque que pour des densités de flux imposées au ruban la surchauffe demeure faible.

9. Références

- [1] M. Havet, D. Bay, Natural convection over a non-isothermal vertical plate, Int. J. Heat Mass Transfer 42 (1999) 3103-3112
- [2] Y. Tamene, S. Abboudi, C. Bougriou, Simulation des transferts thermiques transitoires à travers un mur multicouche soumis à des conditions de flux solaire et de convection, Energies Renouvelables Vol.12 (2009) 117-124
- [3] L. Lambert, Etude expérimentale et numérique des transferts de chaleur en convection naturelle le long de paroi verticale épaisses rayonnantes fortement chauffées, Congrès français de Thermique, SFT 2000, Lyon, 15-17 mai, (2000).
- [4] E. Goncalves, Méthodes, analyse et calculs, Institut national polytechnique de Grenoble, septembre 2005.