

2. J. N. Koster and U. Müller, Free convection in vertical gaps. (to appear in *J. Fluid Mech.*).
3. C. M. Vest, *Holographic Interferometry*. John Wiley, New York (1979).
4. W. Hauf and U. Grigull, Optical methods in heat transfer. In *Advances in Heat Transfer* (edited by J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr.) Vol. 6, pp. 133–366. Academic Press, New York (1970).
5. R. J. Goldstein, Optical techniques for temperature measurement. In *Measurements in Heat Transfer* (edited by E. R. G. Eckert and R. J. Goldstein) pp. 241–293. McGraw-Hill, New York (1976).
6. J. Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier, New York (1972).
7. H. Frick, Zellularkonvektion in Fluidschichten mit zwei festen seitlichen Berandungen. Dissertation (KfK Report 3109), University of Karlsruhe (1981).
8. R. Farhadieh and R. S. Tankin, Interferometric study of two-dimensional Bénard convection cells, *J. Fluid Mech.* **66**, 739–752 (1974).
9. O. Kvernfold, On the stability of non-linear convection in a Hele–Shaw cell, *Int. J. Heat Mass Transfer* **22**, 395–400 (1979).

Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 25, No. 3, pp. 428–430, 1982
Printed in Great Britain

0017 9310/82/030428-03 \$03.00/0
Pergamon Press Ltd.

CONVECTION NATURELLE EN MUR PLAN A DES NOMBRES DE PRANDTL ELEVES

R. BEN MAAD

Faculté des Sciences de Tunis, Département de Physique, Belvédère, Tunis

et

A. FORTIER

Laboratoire de Mécanique Expérimentale des Fluides, Bat. 502, Campus d'Orsay, 91400 Orsay, France

(Reçu le 15 mai 1980 et sous forme révisée le 25 juin 1981)

NOMENCLATURE

c_p ,	chaleur spécifique à pression constante [$J/kg^{\circ}C$];
g ,	accélération de la pesanteur [m/s^2];
Gr_x^* ,	$= g\beta x^4 \phi / \lambda v^2$, nombre de Grashof modifié;
h ,	$\phi / (T_p - T_{\infty})$, coefficient de transfert de chaleur [$W/m^2^{\circ}C$];
l ,	longueur de la plaque [m];
Nu_x ,	hx/λ , nombre de Nusselt;
Nu_x^* ,	$= Nu_x \cdot (v_m/v_{\infty})^{0.17}$, nombre de Nusselt modifié (zone laminaire turbulente);
Nu_x^{**} ,	$= Nu_x \cdot (v_p/v_{\infty})^{0.17}$, nombre de Nusselt modifié (zone de transition);
Pr ,	$= \mu c_p / \lambda$, nombre de Prandtl;
Ra_x^* ,	$= Gr_x^* \times Pr$, nombre de Rayleigh modifié;
β ,	coefficient de dilatation du fluide [K^{-1}];
ρ ,	masse volumique [kg/m^3];
μ ,	viscosité dynamique [kg/ms];
ν ,	$= \mu / \rho$, viscosité cinématique [m^2/s];
ϕ ,	densité de flux [W/m^2].

Indices

DT,	les conditions à la limite inférieure du régime transition;
p,	les conditions à la température de paroi;
∞ ,	les conditions à la température du fluide loin de la paroi;
m,	les conditions à la température du film, $T_m = (T_p + T_{\infty})/2$;
x ,	la valeur locale en abscisse x ;
() $_{\infty}$,	propriétés physiques calculées à la température de fluide loin de la paroi;
() $_m$,	propriétés physiques calculées à la température du film.

INTRODUCTION

LES ETUDES de convection naturelle sur une plaque plane chauffée à flux ou à température constante à des nombres de Prandtl élevés sont rares. A notre connaissance il y a l'étude de Fujii [1, 2] pour les huiles minérales et l'éthylène glycol.

Notre travail [3] sur une plaque plane immergée dans un mélange glicérine-eau à 70% en volume de glycérine vient compléter ces études antérieures. Ainsi l'utilisation des fluides visqueux ($Pr > 70$) nous a permis une meilleure connaissance du phénomène de transfert dans les 3 zones (laminaire-transition et turbulence).

PRINCIPE ET ETUDE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Nous avons utilisé une installation expérimentale (Fig. 1) qui comprend essentiellement une cuve rectangulaire de 2,40 m de haut, 1,60 m de longueur et 1,10 m de largeur, une plaque plane de 2 m de haut et de 0,90 m de large chauffée par effet Joule, immergée dans le liquide de la cuve et un circuit d'aspiration de la couche limite thermique à la partie supérieure de la plaque. Ce circuit réinjecte après refroidissement le liquide dans la cuve afin de maintenir une température sensiblement constante loin de la plaque et des vitesses aussi faibles que possible. La plaque chauffante est constituée de 3 bandes de clinquant d'acier inoxydable de 0,1 mm d'épaisseur placée côte à côte, tendues verticalement et dans lesquelles circule le courant continu (basse tension) de chauffage. Les températures de la plaque sont mesurées à l'aide de 75 thermocouples chromel-alumel répartis convenablement sur toute la hauteur de la plaque et les températures du fluide loin de la plaque sont mesurées à l'aide de 6 thermocouples eux-même répartis sur la hauteur de la cuve. La puissance électrique dissipée est déterminée à partir de la mesure de la

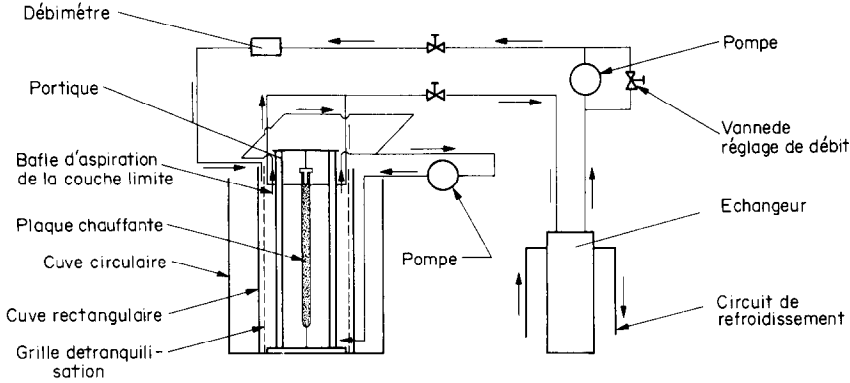


FIG. 1.

tension et de l'intensité du courant électrique de chauffage. Un système de relèvement séquentiel et un centralisateur de 100 voies de mesure associé à un voltmètre numérique permettent de rassembler les données et les résultats sur bande perforée pour traitement ultérieur sur ordinateur.

Après une étude critique des fluides utilisables pratiquement pour obtenir des nombres de Prandtl de l'ordre de 100, nous avons choisi le mélange glycérine-eau (70% en volume de glycérine) dont nous avons étudié avec soin les propriétés physiques : masse volumique, viscosité dynamique, conductivité thermique et enthalpie en fonction de la température. Nous avons complété cette étude par des essais portant sur les variations au cours du temps de la viscosité, de la densité et de la résistivité du mélange porté à 70°C pendant 26 jours.

Après une longue période d'établissement du régime, nous avons effectué par prélèvement des mesures de viscosité et des séquences de mesures des températures.

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous avons effectué des essais en convection naturelle sur une plaque plane chauffée à flux constant pour des densités de flux variant de 3900 à 8100 W/m².

Le fluide utilisé a une viscosité qui varie beaucoup avec la température. Pour tenir compte de ce problème nous avons calculé un paramètre adimensionnel de la forme $(\nu_m/\nu_x)^{0,17}$. Avec ce coefficient nous avons calculé un nombre de Nusselt modifié de la forme :

$$Nu_x^* = Nu_x \left(\frac{\nu_m}{\nu_x} \right)^{0,17}$$

Sur la Fig. 2, nous avons représenté la variation du nombre de Nusselt modifié : (Nu_x^*) en fonction du nombre de Rayleigh modifié $(Ra_x^*)_m$. L'indice m indiquant que les propriétés physiques sont calculées à la température du film $T_m = (T_p + T_x)/2$.

L'ensemble de nos résultats, pour la zone laminaire, est en bon accord avec la loi de puissance 1/5 de $(Ra_x^*)_m$:

$$Nu_x^* = 0,62 (Ra_x^*)_m^{0,2}$$

Nous notons que la constante 0,62 est en bon accord avec celle proposée par Fujii [4], Lefevre [5] et Churchill et Ozoe [6].

Dans la zone de turbulence, où la grande dimension de la plaque a permis d'atteindre un nombre de Rayleigh supérieur à 10¹⁵, nous avons établi une loi de la forme (Fig. 2) :

$$Nu_x^* = 0,175 (Ra_x^*)_m^{0,25}$$

Pour la zone de transition nous avons cherché un autre coefficient tenant compte également de la variation de la viscosité. Ce coefficient est $(\nu_p/\nu_x)^{0,17}$. Celui-ci a été défini théoriquement par Akagi [7] et vérifié expérimentalement par Fujii [2]. Avec ce paramètre adimensionnel nous avons calculé un autre nombre de Nusselt modifié de la forme :

$$Nu_x^{**} = Nu_x \left(\frac{\nu_p}{\nu_x} \right)^{0,17}$$

Dans cette zone, nous avons constaté que le nombre de Nusselt n'est plus fonction uniquement du nombre de Rayleigh, il dépend aussi de la densité de flux (Fig. 3) :

$$Nu_x^{**} = A(\phi) \cdot (Ra_x^*)^{0,458}$$

Les résultats expérimentaux montrent par ailleurs qu'il est possible d'exprimer le nombre de Nusselt à l'altitude x, dans la zone de transition, sous la forme du produit d'une fonction puissance du nombre de Rayleigh du début de transition $(Ra_x^*)_{DT}$ par une fonction puissance du nombre de Rayleigh à l'altitude x :

$$Nu_x^{**} = 2,187 \cdot (Ra_x^*)_{DT}^{-0,295} \cdot (Ra_x^*)^{0,458}$$

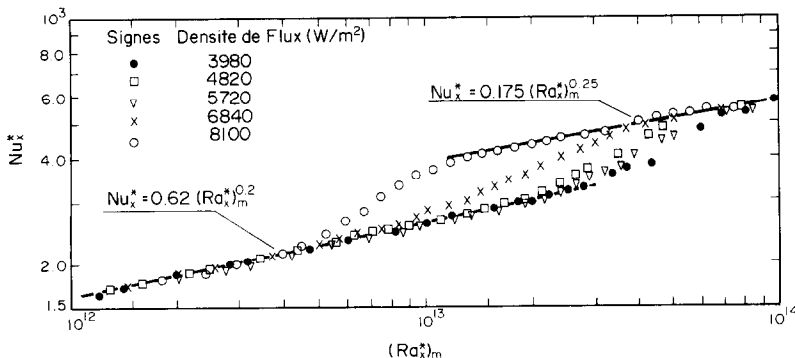


FIG. 2.

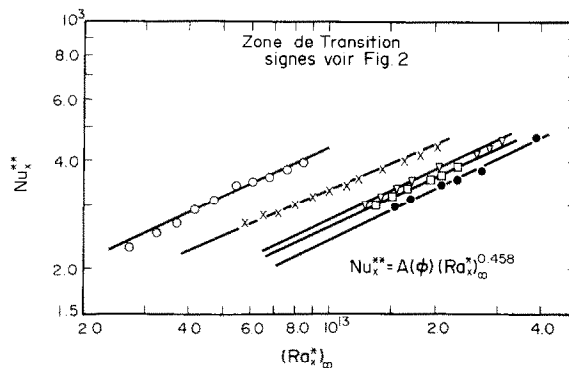


FIG. 3.

Cette représentation ne permet pas de prévoir les variations du nombre de Rayleigh du début de transition $(Ra_x^*)_{DT}$ en fonction d'un ou plusieurs paramètres adimensionnels faisant intervenir les variations des propriétés physiques du fluide avec la température et la densité de flux.

Nous avons constaté, Fig. 2, que lorsque la densité de flux augmente, la transition se déclenche pour des nombres de Rayleigh de plus en plus faibles soit une évolution inverse à celle observée pour l'eau [2, 8, 9]; Fujii [2] a obtenu le même résultat pour les huiles.

CONCLUSION

La variation de la viscosité avec la température de fluide utilisé nous a conduit à définir deux paramètres adimensionnel :

- l'un pour la zone laminaire et turbulente, $(\nu_m/\nu_\infty)^{0.17}$,
- l'autre pour la zone de transition, $(\nu_p/\nu_\infty)^{0.17}$.

Dans la zone laminaire l'utilisation du premier paramètre nous a permis de trouver un bon accord avec les lois théoriques connues, alors que l'application de la loi d'échange établie avec des propriétés physiques considérés comme constantes [10] nous a donné un écart de 5% à 15%.

Dans la zone de transition, nous avons constaté avec Fujii [3], que le déclenchement de la transition s'opère à des nombres de Rayleigh critiques décroissant en fonction de flux. D'autre part on a constaté que les lois d'échanges dépendent des conditions de déclenchement de la transition $(Ra_x^*)_{DT}$.

Pour la zone de turbulence nous avons constaté l'inexistence de la zone intermédiaire : développement de la turbulence.

REFERENCES

1. T. Fujii, Experiment of free-convection heat transfer from a vertical cylinder submerged in liquids, *Trans. Japan. Soc. mech. Engrs* **25**, 280–286 (1959).
2. T. Fujii, Experiments on natural-convection heat transfer from the outer surface of a vertical cylinder to liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer* **13**, 753–787 (1970).
3. R. Ben Maad, Convection naturelle en mur plan à des nombres de Prandtl élevés. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle à l'Université de Paris VI (1979).
4. T. Fujii, The dependence of local nusselt number on Prandtl number in the case of free convection along a vertical surface with uniform heat flux. *Int. J. Heat Mass Transfer* **19**, 121–122 (1976).
5. E. J. Le Fevre, Laminar free convection from a vertical plane surface. *Proc. 9th Int Cong. appl. Mech., Brussels* **4**, 168–174 (1956).
6. S. W. Churchill and H. Ozoe, A correlation for laminar free convection from a vertical plate, *Trans. ASME* **95c**, 540–541 (1973).
7. S. Akagi, Free convection heat transfer in viscous oil, *Trans. Japan. Soc. mech Engrs* **30**, 624–635 (1967).
8. H. Chokouhmand, Convection naturelle en mur plan. Thèse de Doct. Ing. Paris VI (1976).
9. G. C. Vliet and C. K. Liu, An experimental study of turbulent natural convection boundary layers, *J. Heat Transfer* **91C**, 517 (1969).
10. A. Fortier, Cours de certificat d'hydrodynamique supérieure, Faculté de Sciences, Paris (1961).