

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS DES CELLULES RECTANGULAIRES VERTICALES

M. JANNOT et C. MAZEAS

La Société Bertin et Cie, B.P. n° 3, (78) Plaisir, France

(Reçu le 9 Mars 1972)

Résumé—On fait la synthèse des mesures expérimentales réalisées pour la délimitation des régimes d'écoulement, en convection naturelle laminaire et turbulente dans des cellules verticales de section rectangulaire. On propose également des corrélations pour déterminer le nombre de Nusselt moyen dans le domaine des nombres de Rayleigh élevés.

1. NOTATIONS

A ,	allongement des cellules (rapport hauteur sur écartement $(1/d)$;	λ_e ,	conductivité thermique équivalente de la cellule $[MLt^{-3}T^{-1}]$;
C_p ,	chaleur spécifique du fluide à pression constante $[L^2t^{-2}T^{-1}]$;	λ_f ,	conductivité thermique du fluide $[MLt^{-3}T^{-1}]$;
d ,	écartement entre les parois isothermes d'une cellule = épaisseur $[L]$;	μ ,	viscosité dynamique du fluide $[ML^{-1}t^{-1}]$;
Gr_L ,	nombre de Grashof, $g.L^3.\beta.\Delta T/\nu^2$;	ν ,	viscosité cinématique du fluide $[L^2t^{-1}]$;
Gr_L^* ,	nombre de Grashof dans le cas d'un mur seul = $g.L^3.\beta.(T_p - T_a)/\nu^2$;	ρ ,	masse volumique $[ML^{-3}]$.
g	accélération de la pesanteur $[Lt^{-2}]$;		
L ,	Longueur caractéristique précisée dans les cas particuliers $[L]$;		
l ,	hauteur des cellules, $[L]$;		
NJ_L ,	nombre égal à $g.L/C_p.\Delta T$;		
NJ_L^* ,	$(g.L)/[C_p(T_p - T_a)]$;		
P ,	pression, $[ML^{-1}t^{-2}]$;		
Pr ,	nombre de Prandtl = $\mu.C_p/\lambda_f$;		
Ra_L ,	nombre de Rayleigh = $Gr_L.Pr$;		
T_1 ,	température de la paroi chaude $[T]$;		
T_0 ,	température de la paroi froide $[T]$;		
T_m ,	température moyenne $T_0 + T_1/2$ $[T]$;		
T_p ,	température à la paroi;		
T_a ,	température ambiante;		
x, y ,	coordonnées;		
β ,	coefficient de dilatation cubique du fluide à pression constante $[T^{-1}]$;		
ΔT ,	Ecart de température entre les parois chaude et froide, $(T_1 - T_0)$ $[T]$;		

2. INTRODUCTION

LES TRAVAUX décrits dans cette note ont été réalisés dans le cadre d'un contrat de recherche EURATOM, en vue d'étudier le problème de l'isolation thermique de caissons en béton de réacteurs nucléaires. Des résultats partiels ont fait l'objet de publications antérieures, notamment dans la référence [15a] orientées vers les applications. On propose ici une présentation des résultats, sous une forme plus fondamentale, de l'étude de la convection naturelle dans des espaces confinés et en atmosphère dense. On se limite dans le présent article aux essais relatifs aux cellules à parois étanches en position verticale. Les principales caractéristiques des autres essais effectués, avec des cellules en position horizontale, inclinée ou verticale à très grands

allongements ou très petits allongements, sont rassemblées dans la référence [15a].

3. GENERALITES

On se propose de préciser la structure des écoulements convectifs dans une cellule remplie d'un gaz dont la pression est comprise entre 1 et 60 bars. La cellule étudiée, Fig. 1, est parallélépipédique; elle est limitée, d'une part par deux

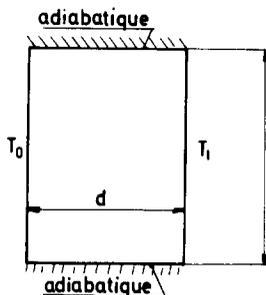


FIG. 1. Modèle physique.

parois planes verticales, métalliques et isothermes, l'une à la température T_1 constituant la paroi chaude, l'autre à la température T_0 , la paroi froide et, d'autre part, par quatre parois planes adiabatiques.

La distance entre les deux parois isothermes à T_0 et T_1 est d ; la hauteur des ces parois est l .

Les variations de température créent, au sein du fluide, des variations de densité qui provoquent la mise en mouvement du fluide: un écoulement ascendant dans lequel le gaz se réchauffe, se développe le long de la paroi chaude; un écoulement descendant dans lequel le gaz se refroidit, se développe le long de la paroi froide. La nature des écoulements peut être très différente selon les dimensions géométriques des cellules et les conditions de pression et de température. Il faut en particulier distinguer:

- les écoulements laminaires stationnaires, où localement, à chaque instant, les composantes de la vitesse et de la température sont constantes;
- les écoulements laminaires instationnaires, où l'on observe des oscillations périodiques des

composantes de la vitesse et de la température mais où chaque filet fluide conserve son individualité;

—les écoulements turbulents caractérisés par les fluctuations des vitesses et des températures et où la notion d'individualité des filets fluides perd sa signification.

Lorsque les écoulements convectifs sont localisés au voisinage immédiat des parois, ils sont appelés "écoulements à couches limites séparées". Lorsque les couches limites interfèrent entre elles, on dit que les écoulements sont à "couches limites jointives"; suivant qu'elles sont plus ou moins imbriquées, on distingue encore les écoulements "asymptotique" et "intermédiaire". Ces divers types d'écoulement peuvent exister en régime laminaire et turbulent.

Autres travaux sur le sujet

On disposait au début de la recherche de l'analyse d'Eckert et Carlson [5], de l'analyse théorique de Batchelor [3] qui fut le premier à qualifier les différents régimes que l'on peut rencontrer, des travaux expérimentaux de Mull et Reiher [1], de Graaf et Van der Held [2]. Depuis cette époque des calculs théoriques sur ordinateur notamment par G. de Vahl Davis [13], par Newell et Schmidt [17], Aranovich *et al.* [18], ont permis d'apporter des précisions dans le domaine des écoulements laminaires. Sur le plan expérimental, il faut aussi mentionner les travaux de Schmidt [6] pour les cellules à très faibles allongements et les travaux de Elder [9] pour des allongements de 1 à 60, avec des cellules remplies de liquide et qui ont mis en évidence l'existence d'écoulements secondaires dont certains ne contournent pas l'ensemble de la cellule. Le tableau suivant rassemble les corrélations proposées par ces divers auteurs; elles permettent d'obtenir les valeurs de la conductivité thermique apparente des cellules.

4. ORIENTATION DE LA RECHERCHE

Après avoir défini le domaine d'applications aux calorifuges pour caissons de réacteurs

Tableau 1

Auteurs	Corrélations proposées	Domaine de validité	Commentaires
Mull et Reither [1]	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1$ $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,18 (A)^{-\frac{1}{3}} Gr_d^{\frac{1}{3}}$ $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,065 (A)^{-\frac{1}{3}} Gr_d^{\frac{1}{3}}$	$Gr_d < 2 \cdot 10^3$ $2 \cdot 10^4 < Gr_d < 2 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5 < Gr_d < 11 \cdot 10^6$	Travaux expérimentaux. D'après l'interprétation de Jakob contestée par de Graaf et Van der Held
de Graaf et Van der Held [2]	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1$ $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,0384 Gr_d^{0,37}$ $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,0317 Gr_d^{0,37}$	$Gr_d < 7 \cdot 10^3$ $10^4 < Gr_d < 8 \cdot 10^4$ $Gr_d > 2 \cdot 10^5$	Travaux expérimentaux
Eckert et Carlson [5]	<p>Ecoulement laminaire asymptotique:</p> $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1 + \frac{1}{A} (0,00292 Gr_d^{0,857} - 0,00144 Gr_d^{0,75})$ <p>Ecoulement laminaire à couches limites séparées:</p> $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,119 Gr_d^{0,3} (A)^{-0,1}$	$A > \frac{Gr_d^{2,75}}{5,6 \cdot 10^8}; Pr = 0,71; 2 < A < 40$ $A < \frac{Gr_d^{2,75}}{1,6 \cdot 10^{12}}; Pr = 0,71; 2 < A < 40$ $Gr_d < 105$	Travaux expérimentaux
Newell et Schmidt [17]	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,0547 Gr_d^{0,307}$ $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,155 Gr_d^{0,315} (A)^{-0,265}$	$4 \cdot 10^3 < Gr_d < 1,4 \cdot 10^5; A = 1; Pr = 0,733$ $4 \cdot 10^3 < Gr_d < 1,4 \cdot 10^5; 2,5 < A < 20;$ sauf pour $A = 20$ où $8 \cdot 10^3 < Gr_d < 4 \cdot 10^4; Pr = 0,733$	Travaux expérimentaux
Aranovich et al [18]	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1 + 1,89 \cdot 10^{-4} \cdot (A)^{-\frac{1}{3}} \cdot Gr_d$ et $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,114 (A)^{-\frac{1}{3}} \cdot Gr_d^{\frac{1}{3}}$	Pour: $Gr_d < 1,32 \cdot 10^3 (A)^{\frac{1}{3}}; Pr = 0,733$ $Gr_d > 1,32 \cdot 10^3 (A)^{\frac{1}{3}}; 2 < A < 50$	Travaux théoriques Les corrélations recourent à mieux de 5% les résultats numériques Assez bon accord avec les travaux expérimentaux ci-dessus

nucléaires, on s'est efforcé de compléter et de préciser les informations disponibles pour :

—déterminer la conductivité thermique des cellules pour des nombres de Rayleigh allant de 10^5 à 10^{10} ;

—préciser les frontières entre les écoulements laminaire stationnaire et instationnaire;

—préciser la frontière au-delà de laquelle l'écoulement turbulent est pleinement développé.

Pour les objectifs de l'étude, on s'est aperçu que les écoulements étaient généralement turbulents ou instationnaires. C'est pourquoi la recherche a été essentiellement expérimentale. Sur le plan théorique on s'est limité à une analyse dimensionnelle menée à partir des équations du problème de façon à bien saisir la signification physique des différents paramètres.

5. ETUDE EXPERIMENTALE

5.1 Conditions d'essais

Avec les dispositifs expérimentaux utilisés, l'allongement de la cellule (rapport hauteur sur écartement des plaques) était compris entre 3,5 et 500.

Les fluides utilisés étaient l'azote et le gaz carbonique sous des pressions allant de 1 à 60 bars.

Enfin les différences de température entre les parois chaude et froide pouvaient aller de 1 à 250°C .

5.2 Dispositifs expérimentaux

5.2.1 Banc de visualisation optique (Fig. 2). La méthode utilisée est l'interférométrie différentielle selon le procédé développé en France par l'O.N.E.R.A. Le dispositif expérimental com-

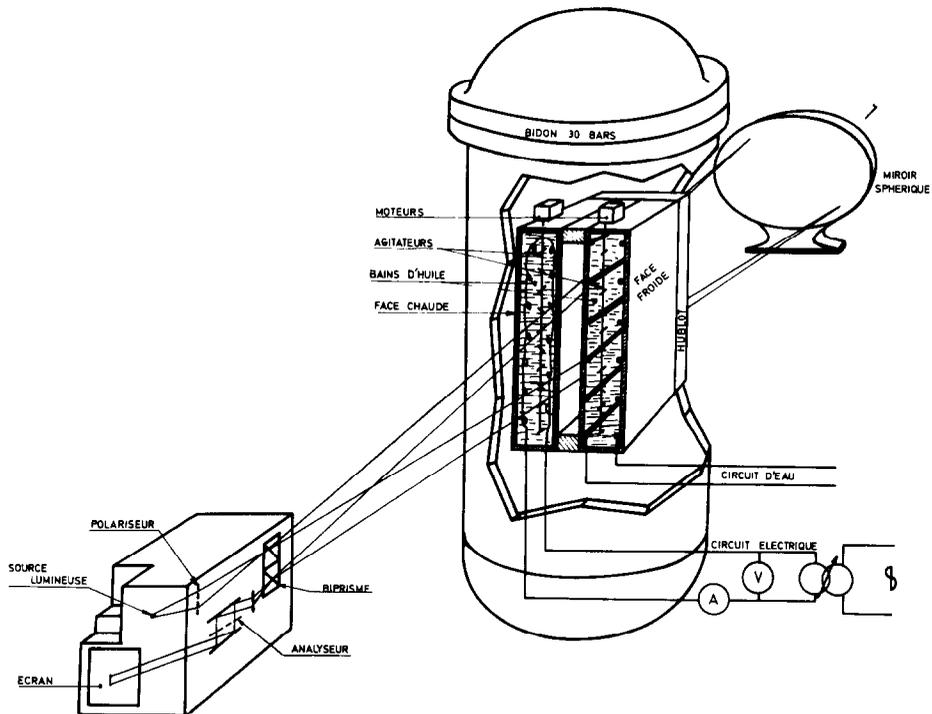


FIG. 2. Schéma du banc d'essais optiques.

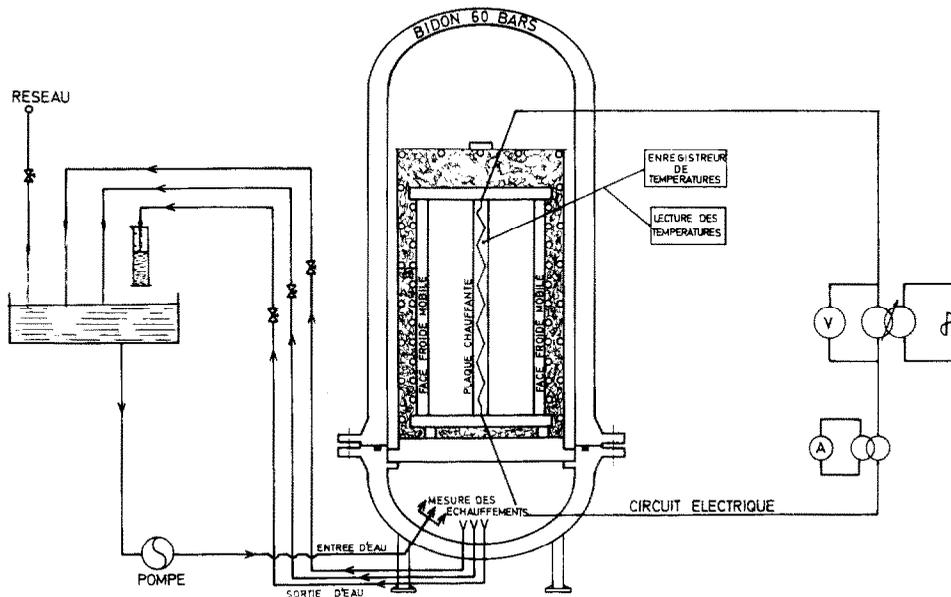


FIG. 3. Schéma du banc d'essais thermiques.

prend une enceinte sous pression, la maquette et les appareils de mesures.

L'enceinte peut supporter des pressions de 30 bars, elle comprend un couvercle, une partie intermédiaire avec deux paires de hublots permettant la visualisation, une partie inférieure avec seulement deux hublots face à face. Cette partie inférieure seule a pu être utilisée pour réaliser des cellules inclinées.

5.2.2 *Banc d'essais thermiques* (Fig. 3). Il est constitué de trois principaux éléments: la maquette, un pupitre de commande et de régulation qui comprend les appareillages de mesure, et un ensemble extérieur au pupitre où furent effectuées les mesures des débits d'eau des circuits de refroidissement. La maquette comporte deux cellules symétriques situées de part et d'autre d'une plaque chauffante. Cette disposition permet de diminuer les pertes, que se réduisant aux pertes latérales et de comparer les résultats obtenus sur les deux cellules. Les maquettes sont situées à l'intérieur d'une enceinte sous pression qui peut résister à 60 bars.

5.3 Déroulement des essais

5.3.1 *Essais optiques*. Les paramètres fixés au début de chaque expérience étaient: la hauteur l des cellules, leur épaisseur d , la nature du fluide, la pression, la température de la paroi froide. Ensuite, la température de la paroi chaude était augmentée progressivement mais suffisamment lentement pour que l'on soit pratiquement toujours en régime établi, jusqu'à ce que l'on observe la fin du mode d'écoulement laminaire stationnaire, puis la turbulence pleinement établie. La photographie suivante montre quelques clichés obtenus par visualisation et illustre les divers types d'écoulement.

5.3.2 *Essais thermiques*. En fonction des paramètres relatifs à chaque essai: dimensions, nature du fluide, pression, température des parois chaude et froide, les flux de chaleur transmis ont été mesurés après une longue durée de stabilisation. Pour atteindre les conductivités thermiques équivalentes, il a fallu déduire des grandeurs mesurées les flux transmis par conduction pure dans les structures et par rayonne-

ment entre les parois. Lors des essais avec azote, le fluide était transparent au rayonnement thermique et la part du rayonnement a pu être déterminée à l'aide d'essais sous vide. Lors des essais avec gaz carbonique le rayonnement était partiellement absorbé par le fluide, mais des calculs non développés ici et faits à partir d'informations recueillies dans la littérature [4], ont montré que les modifications introduites étaient mineures vis-à-vis des grandeurs mesurées.

6. RECHERCHE DES CRITERES DE TRANSITION ENTRE LES DIVERS REGIMES

Cette recherche a été faite en interprétant les essais de visualisation. D'après les travaux antérieurs, il ressortait clairement que les principaux paramètres de la transition étaient: (pour nos essais où Pr est quasi-constant)

- Le nombre de Grashof Gr_l ,
- L'allongement A des cellules.

Or, dès les premières mesures, (voir [15a]), il est apparu que ces paramètres étaient insuffisants pour déterminer la frontière entre les régimes laminaire et turbulent. Pour bien saisir le problème considérons au préalable la configuration géométrique plus simple constituée par un mur plan vertical.

Cas du mur plan vertical

Pour ce cas simple et pour nos conditions d'expérience, [12, 16]:

$$1 < P < 30 \text{ bars}$$

$$280 < T_{\text{moyen}} < 320^\circ \text{K}$$

$$0 < (T_{\text{paroi}} - T_{\text{ambiance}}) < 80$$

$$0 < l < 1 \text{ m}$$

la condition d'apparition des premières instabilités, établie à partir de ces paramètres bruts, est:

$$l \cdot (T_p - T_a) \cdot P^{\frac{1}{2}} > 45$$

avec l en mètres, $(T_p - T_a)$ en $^\circ\text{C}$, P en bars.

Or, avec nos conditions d'expériences, le nombre de Grashof rapporté à la hauteur de la cellule, peut s'écrire:

$$Gr_l \approx (T_p - T_a) \cdot P^2 \cdot l^3 \cdot \text{Cte.}$$

Il est clair que la condition ci-dessus n'est pas fonction uniquement du paramètre Gr_l .

Cette raison nous amenés à rechercher par l'analyse dimensionnelle un autre paramètre permettant d'obtenir une corrélation des résultats. Une analyse faite à partir de l'inventaire des grandeurs intervenant dans le problème conduit à retenir quatre groupements adimensionnels. Plusieurs combinaisons de ces groupements sont possibles, mais en retenant les paramètres déjà usuels, ceci conduit à:

$$Gr_l; Pr; \beta(T_p - T_a); \frac{g \cdot l}{C_p(T_p - T_a)}$$

l'adjonction de ces deux derniers paramètres permettant de mieux interpréter les résultats expérimentaux. L'intervention du paramètre $\beta(T_p - T_a)$ peut s'expliquer par la variation des propriétés physiques du fluide avec la température; il reste à préciser la signification physique du paramètre:

$$NJ_l = \frac{g \cdot l}{C_p(T_p - T_a)}$$

En multipliant le numérateur et le dénominateur par la masse volumique ρ :

$$NJ_l = \frac{\rho \cdot g \cdot l}{\rho C_p(T_p - T_a)}$$

le nombre NJ_l traduit le rapport entre deux énergies: l'énergie potentielle due au champ de pesanteur, et l'énergie véhiculée par la convection naturelle. Cependant ce paramètre n'apparaît pas dans les équations simplifiées habituellement retenues dans les études de convection naturelle. En faisant l'analyse dimensionnelle à partir des équations du problème, le paramètre NJ_l ne se manifeste que par des termes qui en régime permanent stationnaire sont du second ordre.

CELLULES VERTICALES



AZOTE

$$\frac{L}{d} = 8$$

$$d = 0,02$$

3BARS
ABS



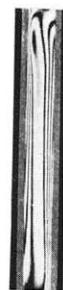
Δt 0°
Tm 291°



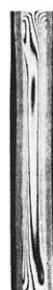
Δt 1°75
Tm 291°40



Δt 3°
Tm 291°70



Δt 6°25
Tm 293°40



Δt 13°25
Tm 297°10



Δt 32°50
Tm 307°70



Δt 67°75
Tm 330°90

7BARS
ABS



Δt 0°
Tm 301°



Δt 1°50
Tm 301°20



Δt 2°
Tm 301°50



Δt 2°50
Tm 301°70



Δt 9°25
Tm 304°90



Δt 64°50
Tm 338°50

Nous pensons que contrairement à ce qui a été fait jusqu'ici, les recherches théoriques des conditions de transition devraient être faites sans négliger ces termes d'ordre supérieur.

La corrélation expérimentale que nous proposons pour l'apparition du régime instationnaire sur un mur vertical est [12, 16]

$$Gr_l^* \geq 9,6 \cdot 10^{16} \cdot (NJ_l^*)^{\frac{1}{3}} [\beta(T_p - T_a)]^{\frac{1}{3}}$$

groupes de résultats, selon que, d'après les critères établis par Eckert et Carlson [5], les valeurs des paramètres Gr_d et l/d permettent de situer l'apparition du régime instationnaire à partir de l'un des trois modes; à couches limites séparées, intermédiaires, ou asymptotique.

Pour le groupe correspondant à une transition à partir d'un mode d'écoulement à couches limites séparées, on trouve comme il fallait s'y

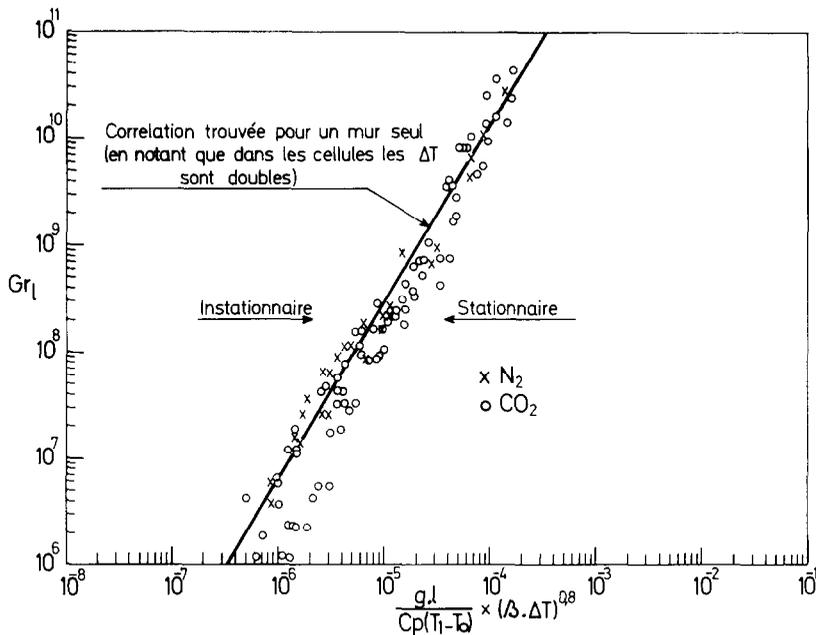


FIG. 4. Limite du mode d'écoulement laminaire stationnaire. Transition à partir du régime d'écoulement à couches limites séparées.

Retour au cas des cellules

Pour le début de la transition à la turbulence dans les cellules, il y a tout lieu de s'attendre à ce que le paramètre NJ_L y joue également un rôle; plusieurs cas sont alors à considérer selon que le mode d'écoulement instationnaire apparaît à partir d'un mode d'écoulement laminaire stationnaire à couches limites jointives ou séparées. Ceci nous a conduit à considérer trois

attendre une corrélation semblable à celle obtenue pour le mur isolé. Les caractéristiques de ces essais sont donnés dans les Tableaux 2 et 3 de l'annexe. Les résultats sont portés sur la Fig. 4 et présentés sous la forme d'une relation entre le nombre de Grashof et le produit $NJ_L \cdot (\beta\Delta T)^{0,8}$.

A titre de comparaison nous avons porté sur cette figure la corrélation obtenue [12] et [16]

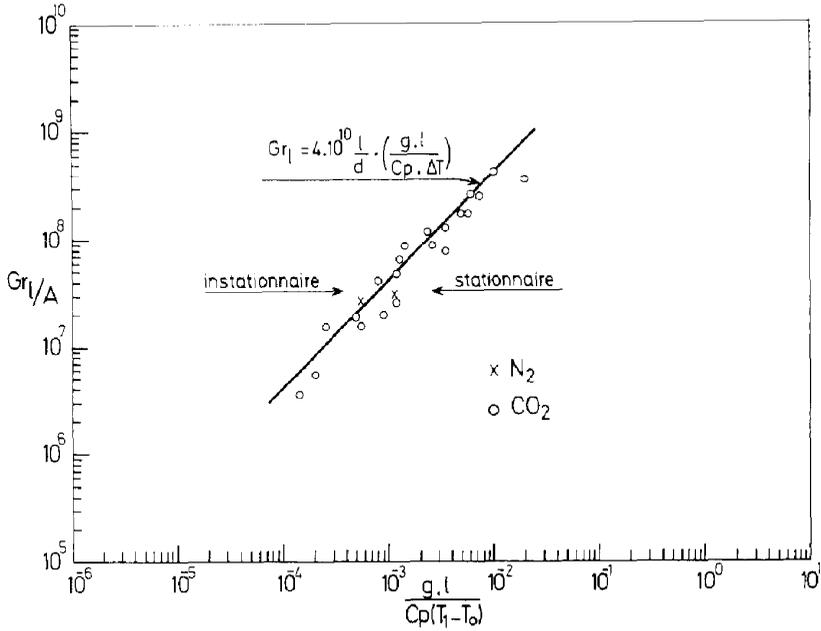


FIG. 5. Limite du mode d'écoulement laminaire stationnaire. Transition à partir du régime laminaire asymptotique.

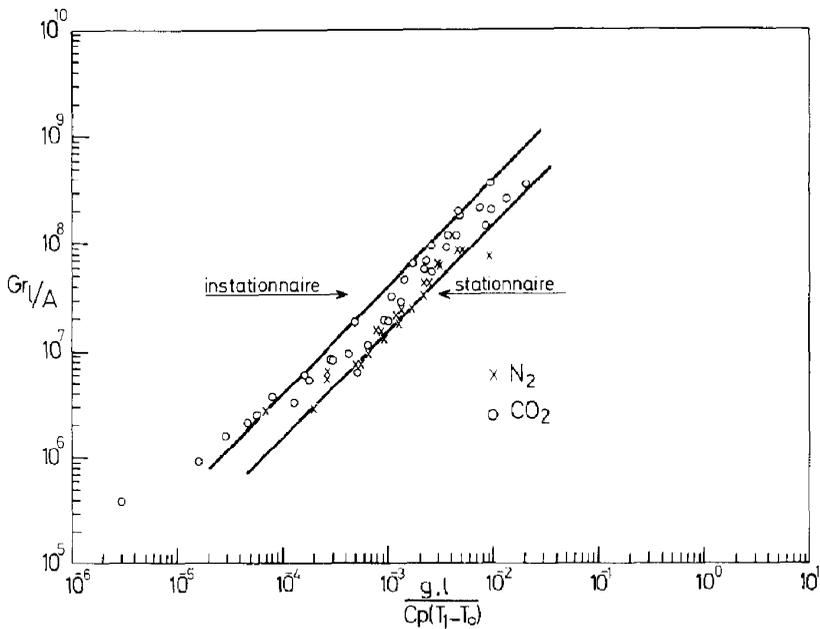


FIG. 6. Limite du mode d'écoulement laminaire stationnaire. Transition à partir du régime d'écoulement intermédiaire.

pour le mur isolé en tenant compte toutefois de ce que dans les cellules c'est l'écart de température ($T_1 - T_0$) qui intervient, ce qui équivaut à $2(T_p - T_0)$. L'accord entre les deux corrélations est très satisfaisant.

Avec le groupe correspondant au mode asymptotique (Tableau 3 de l'annexe) une corrélation du type précédent ne convient pas, mais les mesures sont assez bien regroupées lorsque l'on a adopté la présentation de la Fig. 5 entre le quotient du nombre de Grashof par l'allongement et NJ_1 .

Enfin pour le groupe correspondant au mode intermédiaire, (Tableau 4 de l'annexe), les résultats sont très proches de ceux obtenus pour le premier groupe. On peut s'en rendre compte sur la Fig. 6.

En résumé, les critères pour définir la fin du mode d'écoulement laminaire stationnaire sont les suivants:

(a) Transition à partir du mode à couches limites séparées:

$$Gr_l \geq 6 \cdot 10^{16} \cdot NJ_1^{\frac{1}{3}} [\beta(T_1 - T_0)]^{\frac{1}{3}}$$

avec Pr voisin de 0,71 et la condition:

$$A < \frac{Gr_a^{2,75}}{1,60 \cdot 10^{12}} \text{ (établie par Eckert et Carlson).}$$

(b) Transition à partir du mode asymptotique:

$$Gr_l \geq 4 \cdot 10^{10} \cdot A \cdot (NJ_1)$$

pour Pr voisin de 0,71 avec la condition:

$$A > \frac{Gr_a^{2,75}}{5,6 \cdot 10^8} \text{ (établie par Eckert et Carlson).}$$

(c) Transition à partir du mode intermédiaire:

les points de la figure 6 peuvent être représentés par

$$Gr_l > B \cdot A \cdot (NJ_1)$$

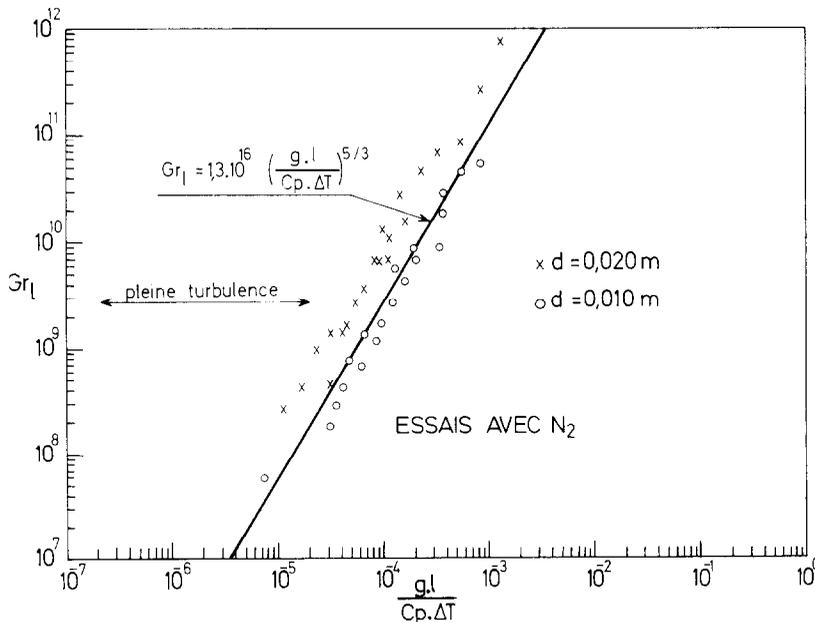


FIG. 7. Détermination du domaine où la turbulence est pleinement établie. Essais avec azote.

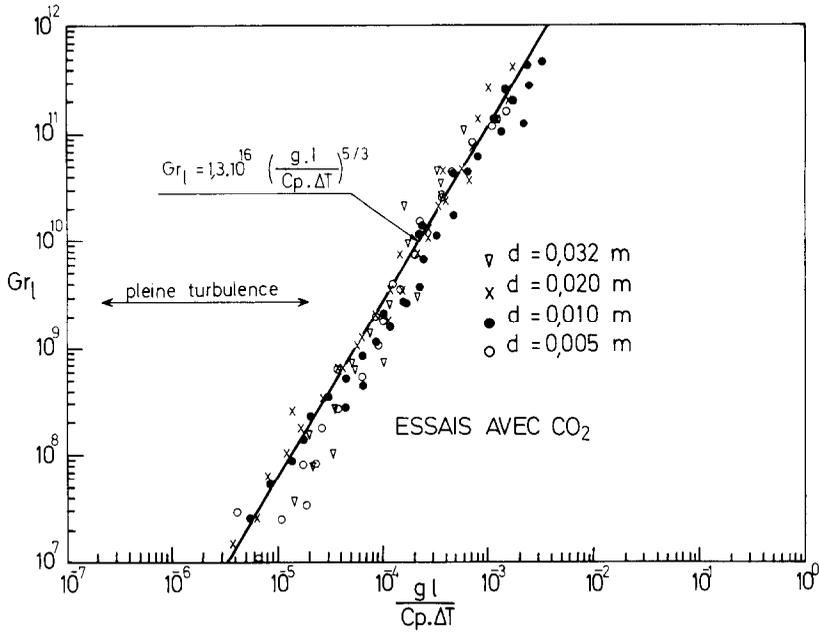


FIG. 8. Détermination du domaine où la turbulence est pleinement établie. Essais avec gaz carbonique.

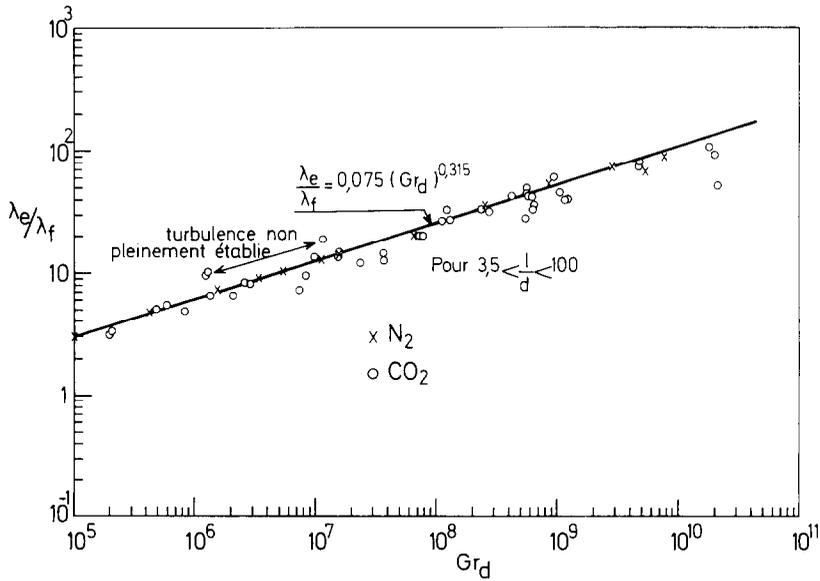


FIG. 9. Conductivité thermique des cellules en régime turbulent pleinement établi.

avec Pr voisin de 0,71; $1,5 \cdot 10^{10} < B < 4 \cdot 10^{10}$
 et la condition:

$$\frac{Gr_d^{2,75}}{1,60 \cdot 10^{12}} < A < \frac{Gr_d^{2,75}}{5,6 \cdot 10^8}$$

(établie par Eckert et Carlson).

A partir du mode d'écoulement laminaire instationnaire jusqu'aux écoulements pleinement turbulents, divers régimes peuvent être observés tels que ceux décrits par Elder [9] et une exploration fine reste encore à faire. Nous avons, pour notre part, tenté de préciser les conditions à partir desquelles la turbulence devrait être pleinement établie. Ceci n'est pas aisé car ce passage est beaucoup plus difficile à apprécier que la fin du mode d'écoulement stationnaire. Cependant les écarts de température correspondant à cette transition sont beaucoup plus grands que ceux correspondant à la fin du mode stationnaire; l'erreur relative sur cet écart est donc plus faible. Une corrélation satisfaisante a pu être obtenue et rassemble assez bien nos mesures, les valeurs caractéristiques sont données dans le Tableau 5 de l'annexe et sont portées sur les Figs. 7 et 8.

Le critère retenu ne dépend pas de l'allongement bien qu'avec les essais avec de l'azote, il y ait un petit écart systématique entre les points à $d = 0,01$ et $d = 0,02$ m. Le critère retenu pour définir le domaine où la turbulence est pleinement établie est le suivant:

$$Gr_l > 1,3 \cdot 10^{16} (NJ_1)^{\frac{1}{3}}$$

Il est à noter que nos conditions d'essais ne nous ont pas permis d'obtenir des écoulements turbulents à couches limites séparées.

7. RECHERCHE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPARENTE DES CELLULES

La procédure suivie au cours des essais et les indications sur le dépouillement ont été évoqués au paragraphe 5.

Tous les points correspondant à un régime de turbulence pleinement établie peuvent être interprétés par des corrélations fonction uniquement du nombre de Grashof Gr_d , Fig. 9. La corrélation proposée est la suivante:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 0,075 Gr_d^{0,315} \quad \text{pour} \quad \begin{matrix} 10^5 < Gr_d < 10^{11} \\ 3,5 < A < 100 \end{matrix}$$

8. CONCLUSION

Au terme de ce travail, il est intéressant de rassembler les diverses corrélations permettant d'atteindre la conductivité thermique apparente des cellules. Dans le domaine laminaire des calculs numériques ont été effectués par divers auteurs; il existe un bon recoupement entre ces travaux, les travaux expérimentaux antérieurs et les nôtres. Dans le domaine des écoulements pleinement turbulents, nous proposons une corrélation déduite de nos mesures expérimentales qui permet d'atteindre des nombres de

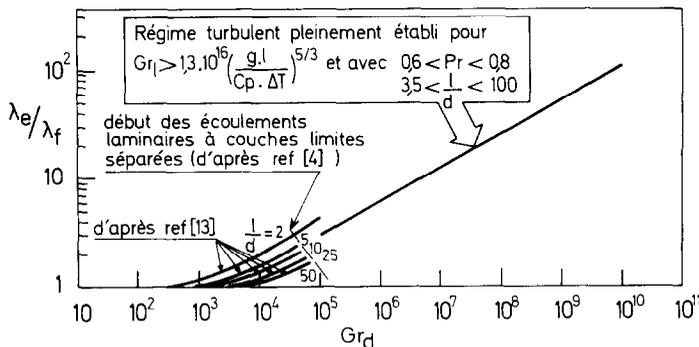


FIG. 10. Conductivité thermique des cellules.

Grashof Gr_d un peu supérieurs à 10^{10} . Dans ce domaine, il n'y a plus d'influence de l'allongement. La Fig. 10 rassemble ces divers résultats.

Il demeure un domaine correspondant aux nombres de Grashof voisins de 10^5 où divers types d'écoulement laminaire stationnaire, instationnaire et turbulent peuvent se rencontrer. A partir des essais optiques, nous avons pu proposer ici quelques critères permettant de mieux préciser les conditions d'apparition des régimes instationnaires et l'étendue du domaine de transition avant d'atteindre la turbulence pleinement établie. Ces critères font intervenir des paramètres: $\beta\Delta T$ et $g.l/C_p.\Delta T$ habituellement négligés et qui apparaissent dans les équations fondamentales par des termes du second ordre. Les tentatives d'interprétation théorique de ces critères n'ont donc de chance d'aboutir qu'en prenant en compte ces termes d'ordre supérieur, ce qui n'a pas été le cas jusqu'ici.

Il reste aussi à préciser les valeurs des conductivités thermiques dans cette région. Il sera probablement difficile d'y parvenir autrement que par des méthodes expérimentales, tout au moins dans le proche avenir.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier l'EURATOM qui a financé le contrat de recherche dont est tiré ce travail et a bien voulu nous accorder l'autorisation d'en publier les principaux résultats.

BIBLIOGRAPHIE

1. W. MULL and M. REIHER, *Gesundh Ing. Beihefte-Reithe 1* (28), 1-28 (1930).
2. DE GRAAF et VAN DER HELD, The relation between the heat transfer and the convection phenomena in enclosed plane air layer, *Appl. Sci. Res.* **3**, 393-409 (1953).
3. G. K. BATCHELOR, Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperatures, *Q. Appl. Math.* **XII**, 209 (1954).
4. D. K. EDWARDS, Absorption by infrared bands of CO_2 at elevated pressure and temperature, *J. Chem. Phys.* **50**, 617 (1960).
5. E. R. G. ECKERT et W. D. CARLSON, Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperatures, *Int. J. Heat Mass Transfer* **2**, 106-120 (1961).
6. ERNST SCHMIDT, Heat transfer by natural convection, Proceedings of the 1961-1962 Heat Transfer Conference Boulder, Colorado.
7. G. MORDCHELLES-REGNIER et G. KAPLAN, Visualisation of natural convection on a plane wall and a vertical gap by differential interferometry. Transitional and turbulent regimes, *Proceedings of the 1963 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*. Stanford University Press.
8. G. DE VAHL DAVIS et C. F. KETTLEBOROUGH, Natural convection in an enclosed rectangular cavity, *Trans. Inst. Engrs Australia MCI*, 43-49 (1965).
9. J. W. ELDER, Turbulent free convection in a vertical slot, *J. Fluid Mech.* **23**, 77-78, 99-111 (1965).
10. J. O. WILKES et S. W. CHURCHILL, The finite difference computation of natural convection in a rectangular enclosure, *A.I.Ch.E. JI* **12**, 161-166 (1966).
11. J. W. ELDER, Numerical experiments with free convection in a vertical slot, *J. Fluid Mech.* **24**, 823-843 (1966).
12. M. JANNOT, G. MORDCHELLES-REGNIER et J. TERPSTRA, Critère de stabilité d'une couche limite de convection naturelle sur une paroi verticale et isotherme, *C.R. Acad. Sci., Paris* **267A**, 617-620 (1968).
13. G. DE VAHL DAVIS, Laminar natural convection in an enclosed rectangular cavity, *Int. J. Heat Mass Transfer* **11**, 1675-1693 (1968).
14. R. K. MACGREGOR et A. F. EMERY, Free convection through vertical plane layer. Moderate and high Prandtl number fluids, *J. Heat Transfer* **91**, 391-403 (1969).
- 15a. M. JANNOT et G. MORDCHELLES-REGNIER, Convection naturelle en espaces confinés, Rapport EUR 4280 d/f/i/n/e, Vol. 2 (1969, Réunion d'information sur les travaux afférents aux caissons en béton précontraint et à leur isolation—Bruxelles 7 et 8 Novembre 67).
- 15b. M. JANNOT, A. PIROVANO et S. VIANNAY, Convection naturelle sur un mur plan, Rapport EUR 4280 d/f/i/n/e, Vol. 2 (1969).
16. M. JANNOT, J. TERPSTRA et S. VIANNAY, Critère de stabilité d'une couche limite de convection naturelle sur une paroi plane verticale isotherme ou soumise à une répartition linéaire de température. *C.R. Acad. Sci., Paris* **271B**, 177-179 (1970).
17. M. E. NEWELL et F. W. SCHMIDT, Heat transfer laminar natural convection with in rectangular enclosures, *J. Heat Transfer* **92**, 159 (1970).
18. E. ARANOVICH, S. CRUTZEN, J. DUFRESNE et F. FARFALETTI-CASALI (Euratom Ispra) Study and development of thermal insulation systems for prestressed concrete vessels for HTGRS, First International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Berlin, Germany (1971).

ANNEXE

Tableau 2. Fin du mode d'écoulement laminaire stationnaire essais avec de l'azote

P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)
2	303,1	21,3	0,16	0,01	5	324,9	53,6	0,08	0,02
2	293,3	11,2	0,32	0,01	5	299,9	12,5	0,16	0,02
2	293,3	10,7	0,64	0,01	5	290,9	2,6	0,32	0,02
3	291,6	7,3	0,16	0,01	5	291,0	2,1	0,64	0,02
3	290,2	5,5	0,32	0,01	7	346,5	75,0	0,04	0,02
3	290,2	5,0	0,64	0,01	7	322,8	38,5	0,08	0,02
5	293,4	5,8	0,16	0,01	7	304,9	9,3	0,16	0,02
5	288,9	3,3	0,32	0,01	7	288,4	1,8	0,32	0,02
5	291,4	2,8	0,64	0,01	7	289,2	1,3	0,64	0,02
7	317,7	44,8	0,04	0,01	10	319,8	47,0	0,02	0,02
7	292,5	4,5	0,16	0,01	10	313,1	37,3	0,04	0,02
7	289,4	2,3	0,32	0,01	10	310,4	17,8	0,08	0,02
7	291,0	2,1	0,64	0,01	10	299,9	3,8	0,16	0,02
10	308,3	36,3	0,04	0,01	10	288,9	1,3	0,32	0,02
10	288,1	2,3	0,16	0,01	10	288,5	1,0	0,64	0,02
10	289,9	1,8	0,32	0,01	14	312,8	35,5	0,02	0,02
10	288,9	1,3	0,064	0,01	14	305,6	24,3	0,04	0,02
14	296,1	14,3	0,04	0,01	14	300,9	9,3	0,08	0,02
14	290,0	5,6	0,08	0,01	14	298,0	2,5	0,16	0,02
14	291,8	2,0	0,16	0,01	14	292,3	1,0	0,32	0,02
14	287,4	1,3	0,32	0,01	14	291,1	0,8	0,64	0,02
14	290,1	0,6	0,64	0,01	31	294,6	7,3	0,04	0,02
2	322,3	52,6	0,16	0,02	31	296,1	2,8	0,08	0,02
2	290,4	5,8	0,32	0,02	31	296,8	1,5	0,16	0,02
2	292,4	4,8	0,64	0,02	31	290,9	0,3	0,64	0,02
3	307,8	33,0	0,16	0,02	31	291,6	0,2	1	0,02
3	292,0	3,9	0,32	0,02					
3	287,5	2,9	0,64	0,02					

Tableau 3. Fin du mode d'écoulement laminaire stationnaire essais avec du gaz carbonique

P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)
14	290,4	0,5	1	0,005	5	315,3	47,7	0,02	0,005
11	289,3	1,0	1	0,005	3	331,2	71,5	0,02	0,005
7	284,0	1,5	1	0,005	14	290,4	0,2	1	0,010
5	289,6	2,3	1	0,005	10	291,1	0,5	1	0,010
3	291,0	4,7	1	0,005	7	290,2	1,2	1	0,010
2	292,6	8,0	1	0,005	5	289,8	1,5	1	0,010
14	286,7	1,1	0,64	0,005	3	295,0	2,5	1	0,010
11	288,6	1,3	0,64	0,005	2	288,4	3,2	1	0,010
7	286,0	1,9	0,64	0,005	14	289,6	0,2	0,64	0,010
5	289,0	2,7	0,64	0,005	10	286,7	0,8	0,64	0,010
3	288,7	5,9	0,64	0,005	7	291,3	1,5	0,64	0,010
2	292,6	9,1	0,64	0,005	5	288,9	1,9	0,64	0,010
14	288,4	1,25	0,32	0,005	3	295,0	2,7	0,64	0,010
11	287,5	1,40	0,32	0,005	2	290,7	5,2	0,64	0,010
7	287,5	2,40	0,32	0,005	14	290,9	0,9	0,32	0,010
5	289,1	3,0	0,32	0,005	10	289,8	1,6	0,32	0,010
3	291,7	7,4	0,32	0,005	7	291,6	2,2	0,32	0,010
2	294,3	14,9	0,32	0,005	5	288,5	2,9	0,32	0,010
14	288,4	1,6	0,16	0,005	3	295,0	4,0	0,32	0,010
11	287,4	1,8	0,16	0,005	2	291,4	6,9	0,32	0,010
7	285,9	2,8	0,16	0,005	14	291,1	1,2	0,16	0,010
5	289,5	3,4	0,16	0,005	10	289,7	2,3	0,16	0,010
3	292,7	8,9	0,16	0,005	7	291,6	3,6	0,16	0,010
2	293,0	13	0,16	0,005	5	288,3	4,6	0,16	0,010
14	288,0	2,0	0,08	0,005	3	294,2	6,5	0,16	0,010
11	288,6	2,9	0,08	0,005	2	292,4	10,9	0,16	0,010
7	286,8	5,1	0,08	0,005	14	292,5	3,9	0,08	0,010
5	290,8	6,9	0,08	0,005	10	294,0	2,7	0,08	0,010
3	295,7	17,0	0,08	0,005	7	294,9	11	0,08	0,010
14	289,2	3,9	0,04	0,005	5	294,7	17	0,08	0,010
11	289,1	5,7	0,04	0,005	3	308,9	40,1	0,08	0,010
7	290,4	9,6	0,04	0,005	14	291,9	4,8	0,04	0,010
5	295,6	15,7	0,04	0,005	10	295,5	11	0,04	0,010
3	301,1	27,8	0,04	0,005	7	306,2	28,7	0,04	0,010
14	297,8	19,3	0,02	0,005	14	297,0	12,6	0,02	0,010
7	303,8	30,2	0,02	0,005	10	308,0	31,2	0,02	0,010

Tableau 3 (suite). Fin du mode d'écoulement laminaire stationnaire essais avec du gaz carbonique

P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)
14	289,4	0,3	1	0,02	10	294,7	1	0,832	0,032
10	290,2	0,4	1	0,02	7	293,0	1,5	0,832	0,032
7	292,0	0,5	1	0,02	7	295,5	1,7	0,832	0,032
5	289,2	0,8	1	0,02	3	310,9	3	0,832	0,032
3	288,8	1,4	1	0,02	10	293,5	1,1	0,544	0,032
2	287,3	4,5	1	0,02	7	294,4	1,8	0,544	0,032
14	289,0	0,4	0,64	0,02	7	295,8	4,0	0,544	0,032
10	291,3	0,5	0,64	0,02	3	293,2	4,6	0,544	0,032
7	290,3	0,7	0,64	0,02	2	293,9	5,5	0,544	0,032
5	290,2	1,3	0,64	0,02	10	294,2	1,5	0,224	0,032
3	287,6	2,1	0,64	0,02	7	296,2	2,5	0,224	0,032
2	290,1	3,2	0,64	0,02	5	295,0	5	0,224	0,032
14	288,8	0,6	0,32	0,02	3	297,1	6,4	0,224	0,032
10	291,9	0,7	0,32	0,02	2	294,0	7,6	0,224	0,032
7	290,9	0,8	0,32	0,02	14	291,2	0,6	0,128	0,032
5	291,5	1,5	0,32	0,02	10	294,5	1,9	0,128	0,032
3	289,8	2,5	0,32	0,02	7	293,1	3,9	0,128	0,032
2	289,7	4	0,32	0,02	5	294,7	6,3	0,128	0,032
14	289,4	0,9	0,16	0,02	3	299,0	10,5	0,128	0,032
10	290,2	1,4	0,16	0,02	2	307,2	22,5	0,128	0,032
7	291,2	2	0,16	0,02	10	294,8	2,3	0,064	0,032
5	292,7	5,2	0,16	0,02	7	300,0	5,1	0,064	0,032
3	292,0	10,7	0,16	0,02	5	297,9	8,7	0,064	0,032
2	294,9	13,6	0,16	0,02	3	303,0	17,4	0,064	0,032
14	287,7	2,2	0,08	0,02	2	320,7	49,1	0,064	0,032
10	292,9	5,3	0,08	0,02	10	294,5	2,7	0,032	0,032
7	296,7	9,9	0,08	0,02	7	297,1	6,5	0,032	0,032
5	299,8	22,9	0,08	0,02	5	299,7	11,0	0,032	0,032
3	326,9	64,7	0,08	0,02	3	301,5	18,5	0,032	0,032
14	290,0	6,3	0,04	0,02	2	325,7	56,0	0,032	0,032
10	297,3	12,4	0,04	0,02	14	289,0	3,8	0,016	0,032
7	304,4	26,8	0,04	0,02	10	295,3	5,3	0,016	0,032
14	292,0	10,3	0,02	0,02	7	300,5	11,7	0,016	0,032
10	301,0	18,5	0,02	0,02	5	302,2	16,1	0,016	0,032
7	313,6	42,2	0,02	0,02	3	305,1	24,3	0,016	0,032
14	294,2	14	0,01	0,02	2	332,7	67,0	0,016	0,032
10	302,3	24	0,01	0,02					

Tableau 4. Condition pour que l'on ait la turbulence pleinement établie essais à l'azote

P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)
2	317,9	49,4	0,32	0,01	2	330,1	72,8	0,64	0,02
2	310,8	45,2	0,64	0,01	3	327,7	64,7	0,32	0,02
3	316,4	48,6	0,16	0,01	3	320,9	60,3	0,64	0,02
3	306,3	33,5	0,32	0,01	5	325,1	48,2	0,16	0,02
3	304,7	31,5	0,64	0,01	5	316,1	45,1	0,32	0,02
5	313,3	37,5	0,16	0,01	5	312,5	42,1	0,64	0,02
5	300,5	24,1	0,32	0,01	7	338,5	64,5	0,16	0,02
5	300,7	21,9	0,64	0,01	7	308,5	35,6	0,32	0,02
7	309,1	31,8	0,16	0,01	7	303,5	26,8	0,64	0,02
7	297,7	18,8	0,32	0,01	10	339,3	67,5	0,08	0,02
7	298,1	17,1	0,64	0,01	10	320,5	36,5	0,16	0,02
10	299,9	24,3	0,16	0,01	10	303,5	26,2	0,32	0,02
10	297,1	14,9	0,32	0,01	10	297,1	18,1	0,64	0,02
10	290,9	11,4	0,64	0,01	14	326,6	48,8	0,08	0,02
14	319,1	49,1	0,04	0,01	14	313,0	28,9	0,16	0,02
14	298,1	20,7	0,08	0,01	14	301,4	19,2	0,32	0,02
14	299,0	15,5	0,16	0,01	14	296,3	11,6	0,64	0,02
14	291,0	8,5	0,32	0,01	31	308,9	22,8	0,08	0,02
14	292,9	6,9	0,64	0,01	31	302,6	13,7	0,16	0,02
					31	293,3	7,0	0,64	0,02
					31	293,3	5,3	1,00	0,02

Tableau 5. Condition pour que l'on ait la turbulence pleinement etablie essais avec gaz carbonique

$P_{abs.}$ (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	$P_{abs.}$ (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)
5	305,9	16,1	0,832	0,032	10	293,1	6,5	1	0,02
3	325,9	28,4	0,832	0,032	7	295,3	7,5	1	0,02
2	305,3	26,0	0,832	0,032	5	293,9	9,9	1	0,02
7	298,6	9,3	0,544	0,032	3	295,1	14,4	1	0,02
5	303,5	18,0	0,544	0,032	2	295,2	18,1	1	0,02
3	313,2	39,6	0,544	0,032	14	291,2	6,8	0,64	0,02
2	308,9	35,4	0,544	0,032	10	295,3	8,8	0,64	0,02
7	300,5	10,9	0,224	0,032	7	295,2	10,6	0,64	0,02
7	302,3	20,1	0,224	0,032	5	296,7	14,1	0,64	0,02
3	310,7	34,5	0,224	0,032	3	295,9	19,0	0,64	0,02
2	312,8	44,7	0,224	0,032	2	301,1	26,5	0,64	0,02
7	297,5	13,7	0,128	0,032	14	293,4	10,0	0,32	0,02
5	304,2	24,9	0,128	0,032	10	296,8	10,9	0,32	0,02
3	313,9	39,6	0,128	0,032	7	298,1	13,3	0,32	0,02
2	332,8	68,1	0,128	0,032	5	299,0	17,6	0,32	0,02
7	307,1	19,6	0,064	0,032	3	299,5	23,4	0,32	0,02
5	308,5	30,0	0,064	0,032	2	303,7	32,4	0,32	0,02
3	319,3	47,3	0,064	0,032	14	294,8	13,3	0,16	0,02
5	311,5	34,3	0,032	0,032	10	297,3	14,8	0,16	0,02
3	318,1	49,8	0,032	0,032	7	300,2	20,6	0,16	0,02
7	309,6	29,8	0,016	0,032	5	304,0	27,9	0,16	0,02
5	315,9	41,5	0,016	0,032	3	309,4	41,9	0,16	0,02
3	323,5	58,7	0,016	0,032	2	325,8	65,7	0,16	0,02
14	291,7	5,5	1	0,032	14	294,5	16,1	0,08	0,02
					10	301,5	22,5	0,08	0,02
					7	308,6	31,9	0,08	0,02
					5	326,7	65,1	0,08	0,02
					14	299,2	23,5	0,04	0,02
					10	310,8	35,3	0,04	0,02
					7	322,2	53,8	0,04	0,02
					14	303,1	31,0	0,02	0,02
					10	322,9	54,8	0,02	0,02

Tableau 5 (suite). Condition pour que l'on ait la turbulence plainement établie essais avec gaz carbonique

P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	P abs. (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)
14	297,0	1,8	1	0,01	5	292,8	10,0	1	0,005
10	292,7	4,6	1	0,01	3	297,6	18,0	1	0,005
7	293,4	7,3	1	0,01	2	301,4	24,2	1	0,005
5	294,0	10,2	1	0,01	14	288,3	4,1	0,64	0,005
3	301,1	14,3	1	0,01	11	297,3	6,8	0,64	0,005
2	301,3	23,6	1	0,01	7	289,5	9,9	0,64	0,005
14	291,0	3,1	0,64	0,01	5	293,4	11,9	0,64	0,005
10	289,7	5,7	0,64	0,01	3	295,9	20,9	0,64	0,005
7	294,8	9,0	0,64	0,01	2	305,2	32,8	0,64	0,005
5	293,9	11,8	0,64	0,01	11	291,2	9,2	0,32	0,005
3	301,5	15,7	0,64	0,01	7	293,4	14,4	0,32	0,005
2	304,8	31,8	0,64	0,01	5	295,9	17,7	0,32	0,005
7	296,3	11,8	0,32	0,01	3	302,6	29,2	0,32	0,005
7	294,5	14,9	0,32	0,01	2	308,7	39,3	0,32	0,005
3	304,0	20,4	0,32	0,01	11	292,1	11,1	0,16	0,005
2	308,9	40,0	0,32	0,01	7	293,0	16,3	0,16	0,005
14	293,9	7,1	0,16	0,01	5	296,4	19,1	0,16	0,005
10	294,1	11,2	0,16	0,01	3	313,6	47,4	0,16	0,005
7	297,9	16,2	0,16	0,01	2	314,4	47,9	0,16	0,005
5	296,8	21,4	0,16	0,01	11	293,9	13,1	0,08	0,005
3	306,3	29,0	0,16	0,01	7	294,6	19,8	0,08	0,005
2	311,5	44,8	0,16	0,01	5	304,5	31,2	0,08	0,005
14	297,9	13,0	0,08	0,01	3	313,6	47,4	0,08	0,005
10	300,3	18,6	0,08	0,01	11	295,6	16,9	0,04	0,005
7	305,3	30,0	0,08	0,01	7	296,7	20,9	0,04	0,005
5	309,4	42,9	0,08	0,01	5	308,0	36,4	0,04	0,005
14	301,4	21,4	0,04	0,01	3	324,7	63,0	0,04	0,005
10	306,4	30,3	0,04	0,01	14	320,6	51,1	0,02	0,005
7	321,0	49,7	0,04	0,01	7	320,9	53,8	0,02	0,005
14	311,2	35,5	0,02	0,01	5	335,0	73,5	0,02	0,005
14	291,4	3,2	1	0,01					
11	290,9	5,2	1	0,01					
7	287,5	7,8	1	0,01					

Tableau 6. Mesure de la conductivite thermique apparente des cellules

Essais avec de l'azote						Essais avec du gaz carbonique					
$P_{abs.}$ (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f}$	$P_{abs.}$ (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f}$
49	359,5	63,5	1	0,085	69,5	30	404,8	146,6	1	0,032	28,8
61	381,8	82,3	1	0,085	92,5	30	389,7	125,2	1	0,032	34,0
33,7	377,5	93,2	1	0,085	74,5	30	350,6	71,6	1	0,032	36,8
17,4	372,6	97,4	1	0,085	54,5	30	356,8	79,7	1	0,032	34,1
8,5	367,3	109,1	1	0,085	37,0	20	410,0	158,1	1	0,032	34,8
4,1	347,7	94,7	1	0,085	20,5	20	344,5	68,5	1	0,032	31,4
1	360,3	99,9	1	0,085	9,1	20	314,5	18,6	1	0,032	28,5
53	376,5	91,2	1	0,01	13,3	11	431,8	201,5	1	0,032	20,7
63,5	378,3	90,3	1	0,01	14,2	10	346,3	86,3	1	0,032	20,8
34,5	373,3	98,1	1	0,01	10,9	10	303,1	21,8	1	0,032	14,0
17,5	372,0	106,1	1	0,01	7,5	2,0	304,1	23,5	1	0,032	6,6
8,5	360,7	103,5	1	0,01	4,9	2,0	303,4	23,4	1	0,032	9,8
4,1	354,6	97,8	1	0,01	3,0	2,0	304,1	23,7	1	0,032	10,8
1	353,7	95,9	1	0,01	1,3	2,0	396,1	180,9	1	0,032	8,3
						5,0	417,3	182,8	1	0,032	14,2
						4,0	419,8	188,3	1	0,032	14,3
						1,0	409,5	172,9	1	0,032	5,6
						40	362,0	79,3	1	0,010	12,4
						20,3	365,8	93,9	1	0,010	9,6
						10,5	372,5	106,0	1	0,010	6,6
						5,0	362,9	99,3	1	0,010	5,1
						3,1	355,9	108,6	1	0,010	3,3
						1,0	356,8	108,5	1	0,010	1,3
						40,9	372,3	88,4	0,300	0,085	96,8
						20,5	371,5	94,0	0,300	0,085	83,1
						7,0	367,3	97,6	0,300	0,085	51,7
						3,5	361,0	85,5	0,300	0,085	34,4
						1,0	351,3	84,4	0,300	0,085	18,9
						41,0	387,0	75,0	0,150	0,010	12,2
						20,0	366,5	86,6	0,150	0,010	7,4
						7,0	359,0	84,6	0,150	0,010	4,9
						3,2	357,9	86,4	0,150	0,010	3,0
						1,0	366,3	92,9	0,150	0,010	1,0

Essais avec gaz carbonique					
$P_{abs.}$ (bar)	T_m (°K)	ΔT (°C)	l (m)	d (m)	$\frac{\lambda_e}{\lambda_f}$
1,2	362,0	89,6	1	0,085	13,6
3,1	358,9	101,3	1	0,085	26,8
7,0	359,8	100,5	1	0,085	42,1
20,3	364,5	85,8	1	0,085	74,2
38,3	367,4	82,4	1	0,085	101,4
42,7	355,3	61,5	1	0,085	50,5
2	418,0	190,2	1	0,032	8,6
37,5	336,8	44,9	1	0,032	62,5
30,0	354,2	69,0	1	0,032	44,5
30,0	324,7	37,4	1	0,032	43,4
29,0	311,8	22,0	1	0,032	43,9
41,0	365,0	88,0	1	0,032	40,2
41,0	370,1	92,6	1	0,032	39,8
39,0	308,3	21,9	1	0,032	46,0

EXPERIMENTAL STUDY OF NATURAL CONVECTION IN VERTICAL CELLS
OF RECTANGULAR CROSS SECTION

Abstract—The authors present the synthesis of experimental measurements achieved in order to delimit the type of flow in laminar and turbulent free convection in vertical cells of rectangular cross section. Some correlations are proposed to determine the mean Nusselt number in the high Rayleigh number region.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER NATÜRLICHEN KONVEKTION
IN RECHTECKIGEN SENKRECHTEN HOHLRÄUMEN.

Zusammenfassung—Zur Abgrenzung des Strömungsbereiches in laminare und turbulente natürliche Konvektion in vertikalen Hohlräumen mit Rechteckquerschnitt wird eine Synthese von Versuchsmessungen angegeben.

Man schlägt ebenfalls Korrelationen vor, um die mittlere Nusselt-Zahl im Bereich der erhöhten Rayleigh-Zahlen festzustellen.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЯЧЕЙКАХ

Аннотация—Проводится обобщение экспериментальных измерений по определению границ режима течения при ламинарной и турбулентной свободной конвекции в вертикальных ячейках прямоугольного сечения. Предложены некоторые соотношения для определения среднего числа Нуссельта в области высоких чисел Рейли.