

## CONVECTION MIXTE EN MILIEU POREUX

M. JANNOT, P. NAUDIN et S. VIANNAY

Département des Transferts de Chaleur et de Masse, Société Berlin et Cie, B.P. No. 3, 78 Plaisir, France

(Reçu le 25 Mai 1972)

**Résumé**—Des travaux théoriques et expérimentaux sur la convection mixte en milieu poreux ont été effectués en vue de la prévision du comportement de l'isolation thermique de certains calorifuges pour réacteurs nucléaires. On décrit les principaux résultats obtenus notamment le modèle de calcul retenu, les confrontations théoriques et expérimentales, et les résultats d'une exploitation systématique du code de calcul.

### I. NOTATIONS

$A$ ,	Allongement du milieu poreux = $l/d$ ;	$P$ ,	pression réduite définie par (1);
$a$ ,	épaisseur de la paroi perméable;	$Pe^*$ ,	nombre de Péclet de filtration, défini par (10);
$b$ ,	largeur du canal situé le long du milieu poreux;	$Pr$ ,	nombre de Prandtl du fluide;
$C_p$ ,	chaleur spécifique du fluide;	$Pr^*$ ,	nombre de Prandtl relatif à l'ensemble milieu poreux et fluide, défini par (5);
$C_f$ ,	coefficient de frottement avec soufflage ou aspiration;	$p$ ,	pression statique;
$C_{f_0}$ ,	coefficient de frottement sans soufflage ni aspiration;	$Ra_d$ ,	nombre de Rayleigh de filtration, défini par (4);
$d$ ,	largeur du milieu poreux;	$Re_{ah}$ ,	nombre de Reynolds pour le fluide circulant à l'extérieur du milieu poreux;
$dh$ ,	diamètre hydraulique;	$Re_d^*$ ,	nombre de Reynolds de filtration, défini par (10);
$g$ ,	accélération de la pesanteur;	$S$ ,	$V_p(x)/U_e(x)$ = Taux de soufflage (positif lorsque le fluide quitte le milieu poreux);
$h$ ,	coefficient d'échange de chaleur;	$T$ ,	température absolue;
$K_x, K_y, K_{y_p}$ ,	perméabilités;	$t$ ,	temps;
$l$ ,	hauteur du milieu poreux;	$U, V$ ,	composantes de la vitesse réduite, définies par (3);
$M$ ,	nombre de Margoulis = $h/(\rho C_p  Ue )$ ;	$u, v$ ,	composantes de la vitesse fictive dans le milieu poreux. (Vitesse que l'on aurait dans le milieu poreux en l'absence de matrice solide et pour le même débit de fluide.);
$NG$ ,	paramètre lié aux perturbations de pression le long de la paroi perméable, défini par (11);	$X, Y$ ,	coordonnées réduites, définies par (1);
$NP$ ,	paramètre déterminant l'importance relative de la convection forcée vis-à-vis de la convection naturelle, défini par (9);	$x, y$ ,	coordonnées.
$Nu_p$ ,	nombre de Nusselt rapporté à la longueur $l$ ;		

## Lettres grecques

$\beta$ ,	coefficient de dilatation cubique du fluide à pression constante;
$\Delta T$ ,	$(T_e(0) - T_0)$ ;
$\delta p$ ,	ecart de pression;
$\theta$ ,	température réduite, définie par (1);
$\lambda$ ,	conductivité thermique du fluide;
$\lambda^*$ ,	conductivité thermique de l'ensemble matrice thermique et fluide au repos;
$\lambda_e$ ,	conductivité thermique équivalente;
$\mu$ ,	viscosité dynamique du fluide;
$\nu$ ,	viscosité cinématique du fluide;
$\rho$ ,	masse volumique du fluide;
$\tau$ ,	temps réduit, défini par (1);
$\varphi$ ,	densité surfacique du flux de chaleur;
$\psi$ ,	fonction de courant.

## Indices

$E$ ,	relatif au fluide circulant dans le canal extérieur;
$e$ ,	relatif à $x = 0$ et au canal extérieur;
$m$ ,	valeur moyenne dans le temps;
$p$ ,	relatif à la paroi perméable;
$r$ ,	valeur de référence;
$x$ ,	relatif à la direction $x$ ;
$(x)$ ,	relatif à l'abscisse $x$ ;
$y$ ,	relatif à la direction $y$ ;
$0$ ,	relatif à la paroi étanche;
$(0)$ ,	relatif à $x = 0$ ;
$\bar{z}$ ,	les valeurs surmontées d'une barre sont des moyennes spatiales.

## 2. INTRODUCTION

L'ÉTUDE a été entreprise en vue de déterminer le comportement des isolations thermiques utilisées pour protéger les caissons en béton des réacteurs

nucléaires. Les calorifuges, souvent placés contre la paroi étanche du caisson, constituent une résistance thermique entre l'ambiance chaude et le caisson refroidi. L'isolant peut généralement être considéré comme un milieu poreux le long duquel peut circuler le fluide caloporteur. Afin de suivre les variations de pression de ce fluide, la frontière du calorifuge, opposée à la cloison continue sur laquelle il est fixé, n'est pas étanche; au sein du milieu poreux on peut alors constater une interaction entre les mouvements du fluide dus à la convection naturelle d'une part et les mouvements induits par l'écoulement extérieur d'autre part.

Le but de cette recherche, effectuée pour le compte de l'Electricité de France, du Commissariat à l'Energie Atomique et de la Société d'Etudes des Caissons Nucléaires, est d'étudier cette interaction.

## 3. LE MODELE DE CALCUL

3.1 *Comportement du fluide dans le milieu poreux*

Le milieu poreux est constitué d'une matrice solide indéformable et d'un fluide interstitiel sous une seule phase qui circule sous l'action combinée de la convection naturelle due au champ de température et des différences de pression à l'extérieur du milieu (convection forcée).

Des équations décrivent les transferts de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Elles traduisent le comportement macroscopique du fluide et de la matrice solide. La Fig. 1 schématise une configuration étudiée, mais le modèle retenu est plus général et peut être utilisé pour des configurations plus compliquées.

Les équations retenues ont fait l'objet d'un travail de réflexion préliminaire décrit plus longuement dans [3, 5] et s'inspirant des travaux des références [6-9]. Dans les applications visées, le milieu poreux est constitué d'une matrice solide indéformable à porosité ouverte élevée (supérieure à 0,93) et d'un fluide sous une seule phase remplissant com-

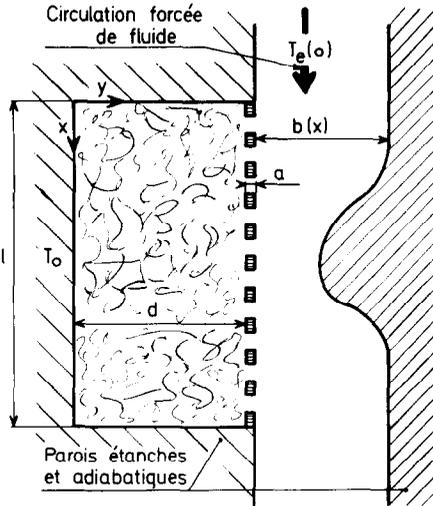


FIG. 1. Modèle physique.

plètement les pores de la matrice solide. Comme il n'est guère possible de définir "microscopiquement" (à l'échelle des pores) la matrice solide et l'écoulement dans cette matrice, un modèle simplifié est recherché. On choisit des grandeurs moyennes pour caractériser "le milieu à une échelle qui puisse être considérée comme infinitésimale (quelques pores) et on écrit les équations aux dérivés partielles auxquelles elles obéissent.

Le modèle retenu s'appuie sur des mesures expérimentales faites avec les matériaux dont l'emploi est envisagé. Ces mesures sont de deux types: d'une part des mesures de débit en écoulement isotherme; d'autre part des mesures de transferts de chaleur dans des configurations où le fluide est immobile.

Les mesures de débit en écoulement isotherme permettent de s'assurer que la loi de Darcy est applicable. Toutefois, les matériaux utilisés présentent parfois une anisotropie importante, et nous avons été amenés à introduire non plus un coefficient scalaire de perméabilité mais un tenseur de perméabilité. On se limite cependant aux cas rencontrés en pratique où les directions principales du tenseur de perméabilité peuvent coïncider avec les axes de coordonnées.

Les mesures de transfert de chaleur avec fluide

immobile sont effectuées avec des configurations où le milieu poreux est délimité par des parois horizontales isothermes, étanches, et avec la paroi chaude au dessus. Ces mesures permettent de définir une conductivité thermique  $\lambda^*$  moyennée dans l'espace pour l'ensemble matrice solide et fluide. Cette notion incorpore également les échanges par rayonnement. Cela se justifie parce que l'inverse du coefficient d'absorption du rayonnement infrarouge (pour les matériaux utilisés) est nettement inférieur à l'épaisseur du matériau poreux. Lorsque le fluide est en mouvement nous pensons que cette notion reste valable pour nos problèmes parce que l'on ne s'intéresse qu'aux régimes permanents stationnaires, et que compte tenu de la très forte porosité des matériaux, les températures locales du fluide et de la matrice solide sont toujours très voisines l'une de l'autre. Comme pour les perméabilités, l'anisotropie du matériau est prise en compte et les axes principaux du tenseur de conductivité thermique  $\lambda^{*ij}$  sont supposés coïncider avec les axes de coordonnées.

Afin de tester la validité du modèle de calcul développé à partir des notions précédentes, des vérifications expérimentales ont été effectuées d'une part à petite échelle avec des visualisations optiques, et d'autre part avec des mesures sur maquette à plus grande échelle. Nous verrons que ces expériences confirment la validité du modèle choisi.

Pour les besoins de la résolution numérique et afin de mettre en évidence les paramètres du problème, les équations sont mises sous forme adimensionnelle à l'aide de l'introduction des variables réduites suivantes:

$$\left. \begin{aligned} X = \frac{x}{d}; \quad Y = \frac{y}{d}; \quad \theta = \frac{T - T_r}{T_e(0) - T_0} \\ P = \frac{P - P_r - \rho_r \cdot g \cdot (x - x_r)}{\rho_r \cdot \beta_r (T_e(0) - T_0) \cdot g \cdot l} \\ \tau = \frac{\mu_r \cdot t \cdot \overline{\lambda x_r}}{\rho_r \cdot d^2 \cdot \mu_r \cdot C_p} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

l'indice  $r$  se rapporte à des valeurs constantes de référence). Dans ce qui suit les grandeurs de référence sont prises pour les conditions moyennes et à la température:

$$T_r = \frac{T_e(0) + T_0}{2}$$

Sous forme réduite, les équations à résoudre pour décrire les écoulements bidimensionnels dans le milieu poreux sont:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\overline{Ky}}{\overline{Kx}} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} + \frac{v_r}{v} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{v}{v_r} \right) \cdot \left[ \frac{\partial \theta}{\partial X} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial X} + \frac{\partial \theta}{\partial Y} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial Y} \right] + \left( \frac{v_r}{v} \right) \cdot Ra_d^* \cdot \frac{\overline{Ky}}{\overline{Kx}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\overline{\lambda y^*}}{\overline{\lambda x^*}} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\overline{\lambda x^*}}{\overline{\lambda x^*}} \right) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial Y} \right] \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\overline{\lambda x^*}}{\overline{\lambda x^*}} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\overline{\lambda x^*}}{\overline{\lambda x^*}} \right) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Y} + \frac{\partial \psi}{\partial X} \right] \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{v}{v_r} = f_1 \cdot [\beta_r \cdot (T_e(0) - T_0); \theta]$$

$$\frac{\overline{\lambda x^*}}{\overline{\lambda x^*}} = f_2 \cdot [\beta_r \cdot (T_e(0) - T_0); \theta]$$

avec:

$\psi(x, y) =$  fonction de courant définie par:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho}{\rho_r} \cdot U &= \frac{\partial \psi}{\partial Y}; \quad U = \frac{u \cdot d}{v_r} \cdot Pr^* \\ \frac{\rho}{\rho_r} \cdot V &= -\frac{\partial \psi}{\partial X}; \quad V = \frac{v \cdot d}{v_r} \cdot Pr^* \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$Ra_d^* = g \cdot \beta_r \cdot \frac{(T_e(0) - T_0)}{v_r^2} \cdot \overline{Kx} \cdot d \cdot Pr^* \quad (4)$$

= Nombre de Rayleigh de filtration calculé à la température de référence.

$$Pr^* = \frac{\mu \cdot C_p}{\overline{\lambda x^*}} \quad (5)$$

= Nombre de Prandtl du milieu poreux calculé à la température de référence.

### 3.2 Comportement du fluide dans un canal extérieur

Le comportement du fluide extérieur est caractérisé par des relations empiriques provenant de travaux expérimentaux [1, 2], sur les écoulements forcés avec soufflage ou aspiration. Cela permet d'explicitier les conditions aux limites le long de la paroi perméable du milieu poreux, en tenant compte d'équations monodimensionnelles pour les bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie du fluide en circulation forcée à l'extérieur du milieu poreux.

Avec les variables réduites, les équations traduisant le comportement du fluide circulant à l'extérieur du milieu poreux sont les suivantes:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_E}{dX} &= \frac{-d}{b} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial X} (X, 1) = \frac{d}{b} \cdot S(X) \cdot |U_E(X)| \\ \frac{d\theta_E}{dX} &= \frac{|U_E|}{U_E} \cdot \frac{d}{b} \\ &\cdot \frac{[M(X) + S(X)] \cdot [\theta(X, 1) - \theta_E(X)]}{[1 + (|U_E|/U_E) \cdot S(X) \cdot (d/b) \cdot dX]} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 3.3 Influence de la paroi perméable

Deux situations bien distinctes peuvent se présenter selon que la paroi perméable est assimilable à un second milieu poreux adjacent ou bien que les porosités doivent être considérées comme des ouvertures distribuées de façon discrète. Cet aspect du problème est examiné avec un peu plus de détails dans l'annexe.

Dans la première situation la paroi perméable est supposée équivalente à un milieu poreux anisotrope tel que:

$$\overline{Kx}_p = 0; \quad \frac{\overline{\lambda x^*}_p}{1} \ll \frac{\overline{\lambda y^*}_p}{a} \quad (7)$$

Ce qui conduit à:

$$\left. \begin{aligned} v_p &= \frac{\overline{Ky}_p}{\mu} \cdot \frac{p(x, d+a) - p(x, d)}{a} = v(x, d) \\ &\text{du milieu poreux} \\ T_p &= T(x, d) \text{ du milieu poreux.} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$





portant un milieu fibreux. Une face verticale étanche est maintenue à un certain niveau de température et la face opposée perméable est en contact avec le gaz en circulation forcée et à une température différente.

Un ensemble de moyens de mesure répartis sur la boucle de soufflage et dans la veine fournit des informations sur les flux calorifiques transmis et la répartition des températures. Les figures suivantes montrent l'installation expérimentale et quelques comparaisons entre les résultats des essais et des calculs.

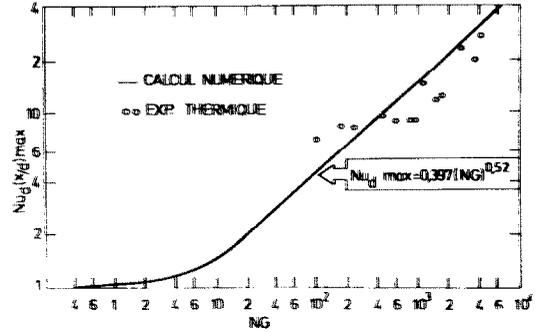


FIG. 4. Convection forcée. Echelon de pression le long de la paroi perméable. Densité maximale de flux.

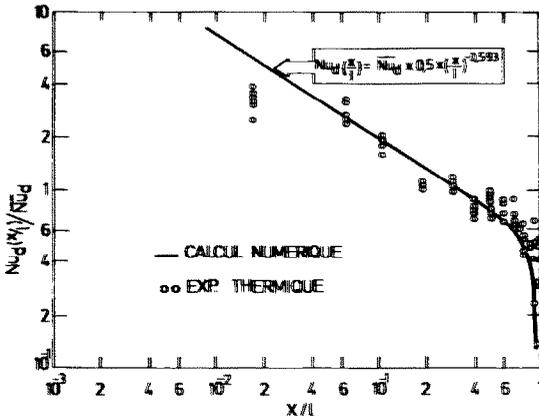


FIG. 2. Convection naturelle. Face chaude perméable. Densité de flux locale.

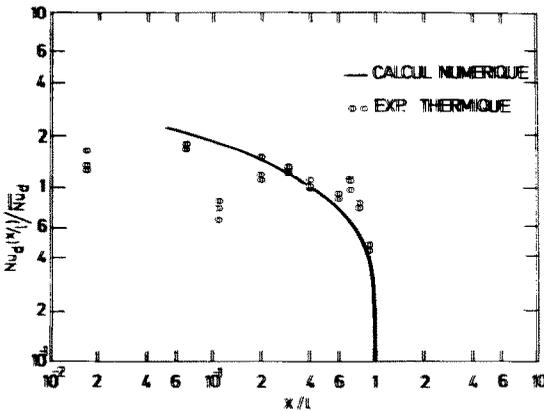
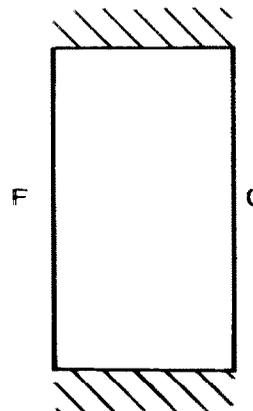


FIG. 3. Convection forcée avec grad P=Cte la long de la paroi perméable. Densité de flux locale.

6. EXPLOITATION DU CODE DE CALCUL

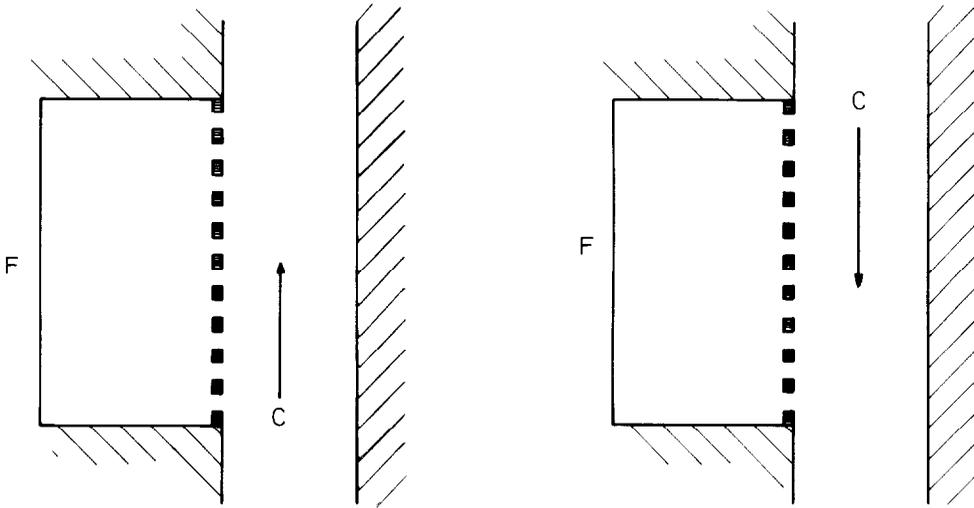
La validité du modèle étant bien vérifiée par l'expérimentation, une exploitation systématique du programme a été effectuée pour quelques configurations typiques. Les configurations choisies sont les suivantes: (La configuration A a fait l'objet d'une étude antérieure [5]. Elle est rappelée ici pour bien faire ressortir les différences entre la convection naturelle et la convection mixte.) L'exploitation systématique du programme de calcul a été faite dans l'hypothèse où il est légitime de négliger les variations des pro-

Configuration A



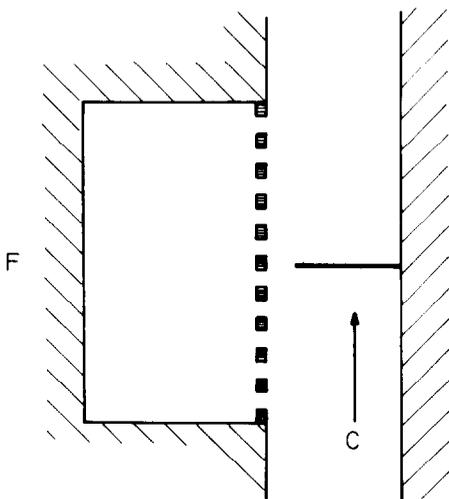
Toutes les parois sont étanches. Les parois verticales sont isothermes, l'une froide, l'autre chaude. Les parois horizontales sont adiabatiques.

Configuration B



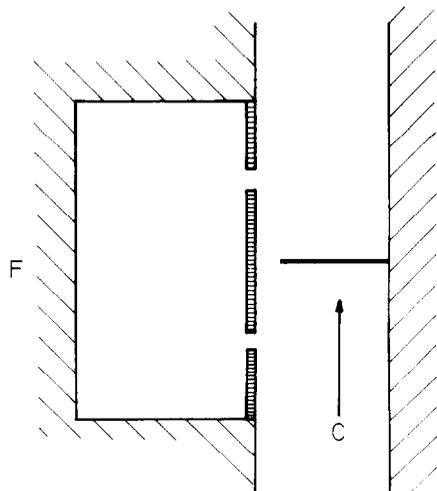
Le gradient de pression dans le fluide en circulation forcée le long de la paroi perméable est uniforme.

Configuration C



Il y a un échelon de pression à mi hauteur de la cellule le long de la paroi perméable.

Configuration D



Echelon de pression à mi-hauteur mais les ouvertures sur la paroi perméable sont localisées au  $\frac{1}{4}$  et au  $\frac{3}{4}$  de la hauteur.

priétés physiques du fluide en fonction de la température. Bien entendu, le code fonctionne également lorsque ces propriétés sont variables; on constate d'ailleurs que l'influence de ces variations est faible notamment pour les gaz.

*Résultats obtenus*

*Configuration A.* Ces résultats sont déjà décrits dans les réf. [3, 5]. Les conductivités thermiques apparentes de la cellule poreuse dépendent de deux paramètres: le nombre de Reynolds de filtration et l'allongement A de la cellule. Le milieu poreux est supposé isotrope.

L'ensemble des points de calcul peut être rassemblé à mieux de 5 pour cent à l'aide de la corrélation suivante:

$$Nu_d = 0,55(Ra_d^*/A)^{0,5} \cdot th(0,575 A)$$

avec toutefois  $Nu_d$  toujours supérieur à 1, et:

$$0,125 < A < 100$$

$$10^{-1} < Ra_d^*/A < 10^3$$

*Configuration B.* Les paramètres susceptibles d'intervenir sont plus nombreux, aussi on s'est volontairement limité à ne faire varier que les plus importants. Les paramètres figés sont les suivants:

$$\overline{K_y}/\overline{K_x} = 1; \quad \overline{\lambda y^*}/\overline{\lambda x^*} = 1; \quad Pr^* = 1;$$

$$(\overline{K_x} \cdot a)/(\overline{K_y} \cdot d) = 0; \quad b/d = 0,2;$$

$$\overline{K_x}/(b \cdot d) = 10^{-6}.$$

Lorsque le fluide extérieur est en circulation forcée, l'influence de cette circulation sera d'autant plus importante que le nombre de Reynolds de filtration sera élevé. Pour les valeurs très élevées de ce paramètre on s'attend à trouver une corrélation semblable à celle obtenue dans le cas de la convection forcée seule, c'est à dire que  $\lambda e/\lambda y^*$ , ne dépend plus que de  $|Re_d^* \cdot Pr^*|/A$  lorsque l'allongement A

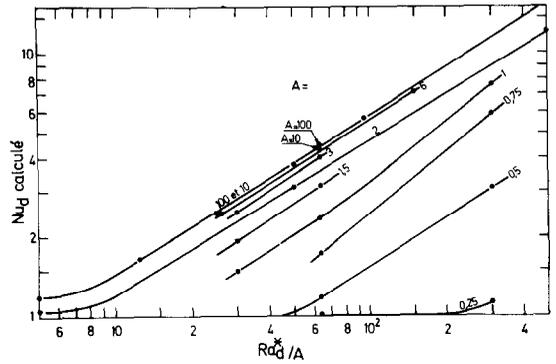


FIG. 5. Convection naturelle avec paroi chaude étanche (calculs).

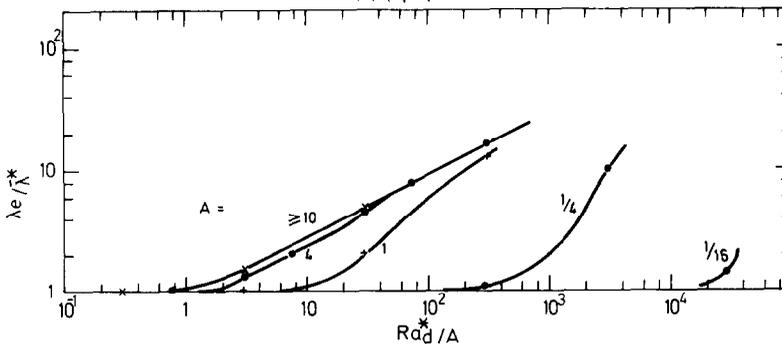
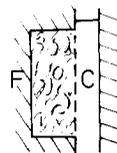


FIG. 6. Convection naturelle avec paroi chaude perméable (calculs).

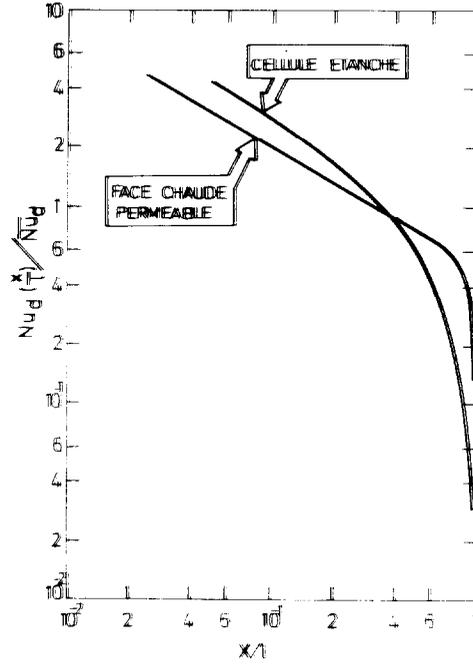


FIG. 7. Convection naturelle. Densité de flux locale (calculs).

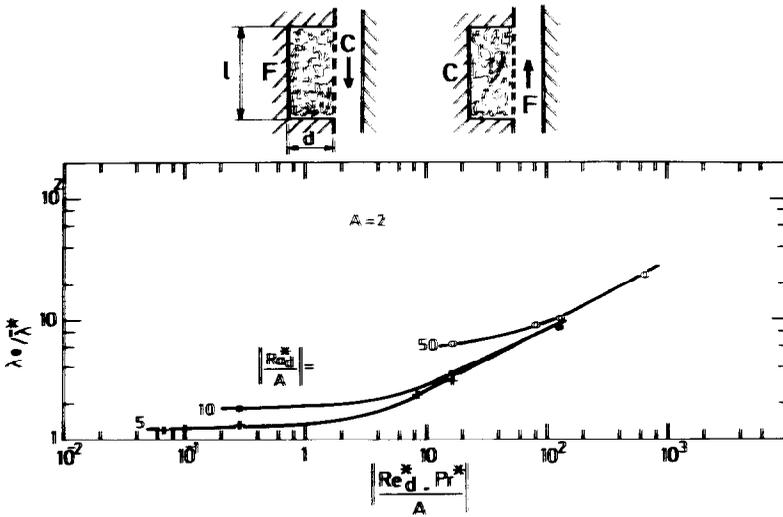


FIG. 8. Convection naturelle et forcée agissant dans le même sens. Petits allongements (calculs).

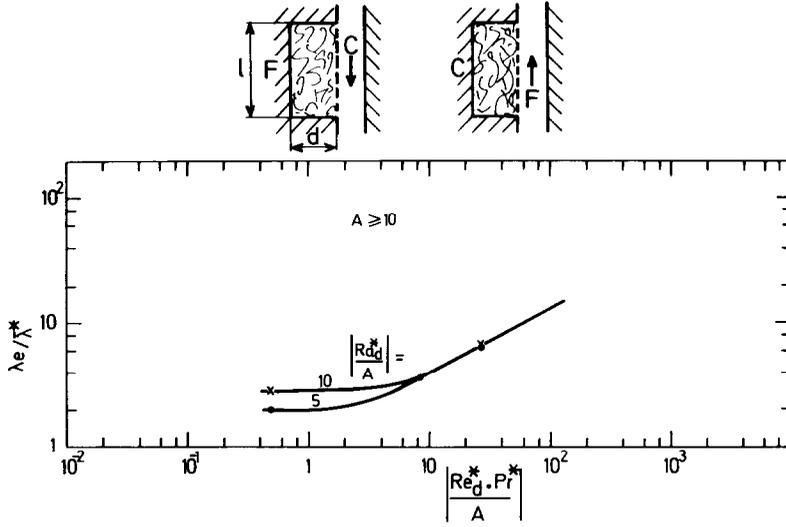


FIG. 9. Convection naturelle et forcée agissant dans le même sens. Grands allongements (calculs).

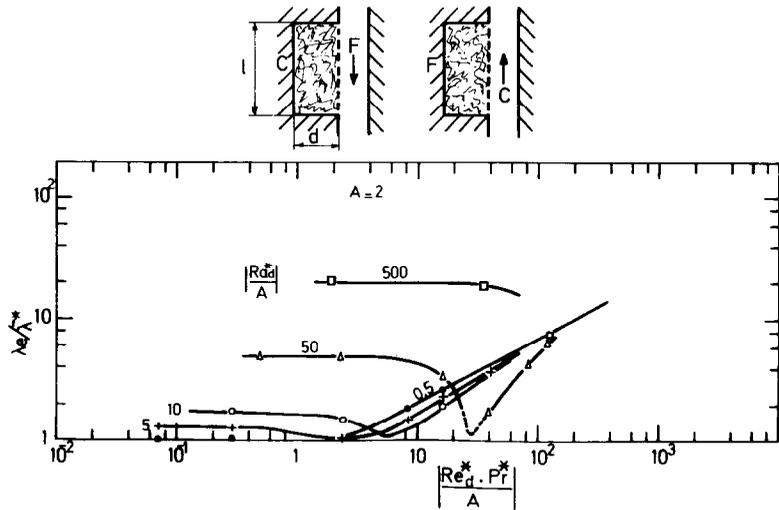


FIG. 10. Convection naturelle et forcée agissant dans des sens opposés. Petits allongements (calculs).

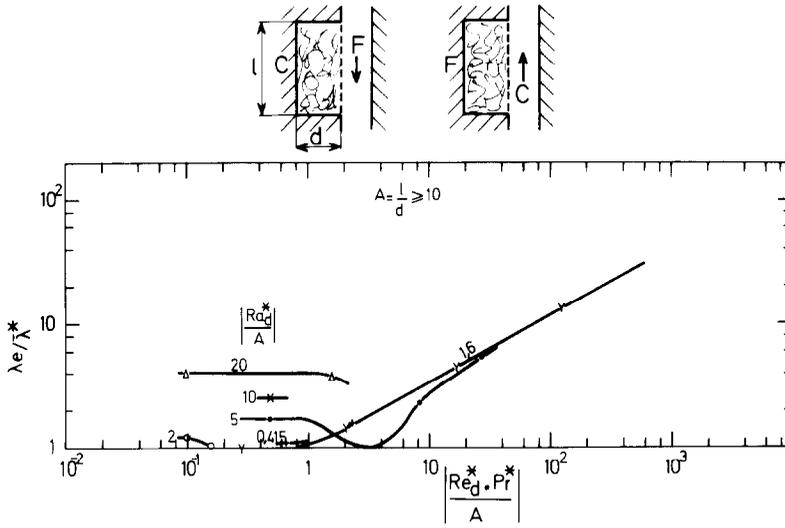


FIG. 11. Convection naturelle et forcée agissant dans des sens opposés. Grands allongements (calculs).

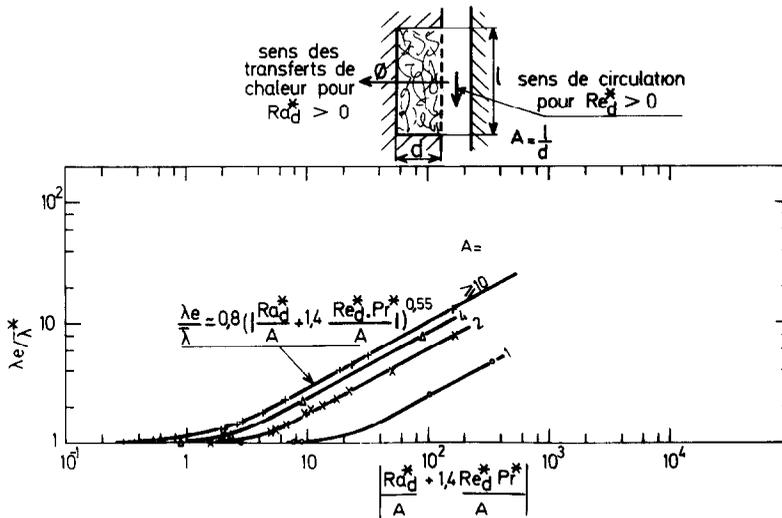


FIG. 12. Convection mixte. Toutes valeurs de  $Re_d^*$  et  $Ra_d^*$  (calculs).

est grand et plus que de  $|Ra_d^*|/A$  et de  $A$  pour les petits allongements.

C'est bien ce que montrent les Figs. 9 et 11.

En s'inspirant de solutions analytiques obtenues par des méthodes intégrales, à l'aide d'équations simplifiées et de configurations géométriques simples, on a recherché une corrélation en fonction du paramètre:

$$\left| \frac{Ra_d^*}{A} + Cte \frac{Re_d^* \cdot Pr^*}{A} \right|$$

Un résultat très satisfaisant est obtenu avec  $Cte = 1,4$ . Il est alors possible de rassembler l'ensemble des points en convection naturelle, mixte ou forcée. Pour les grands allongements, la corrélation est la suivante où  $Ra_d^*$  et  $Re_d^*$  sont à prendre en valeur algébrique:

$$\frac{\bar{\lambda}e}{\lambda_{pr}^*} = 0,8 \left| \frac{Ra_d^* + 1,4 \cdot Re_d^* \cdot Pr^*}{A} \right|^{0,55}$$

pour:

$$A \geq 10$$

et:

$$4 < \left| \frac{Ra_d^* + 1,4 Re_d^* \cdot Pr^*}{A} \right| < 10^3.$$

**Configuration C.** L'influence de l'obstacle extérieur est importante seulement lorsque le fluide est en circulation forcée, aussi nous n'avons

pas examiné l'influence au sens de circulation, influence qui joue seulement un rôle dans la zone intermédiaire.

Les paramètres figés sont les suivants:

$$\overline{Ky}/\overline{Kx} = 1; \quad \overline{\lambda y^*}/\overline{\lambda x^*} = 1; \quad Pr^* = 1;$$

$$Pr = 1; \quad (\overline{Kx} \cdot a)/(\overline{Ky}_p \cdot d) = 0$$

sauf en:

$$X = \frac{1}{2}$$

où:

$$b/d = 0,1; \quad \overline{Kx}/(b \cdot d) = 10^{-6}.$$

La perturbation se fait sentir sur une hauteur variable. L'accroissement local du nombre de Nusselt est indépendant de l'allongement de la cellule mais dépend du paramètre:

$$NG = \frac{\delta p \cdot \overline{Kx} \cdot C_p \cdot \rho}{\mu \cdot \overline{\lambda x^*}_r}$$

où  $\delta p$  est l'échelon de pression provoquée le long de la paroi perméable par la perturbation locale. Ceci est illustré sur la figure suivante que l'on comparera ensuite aux résultats similaires obtenus lors des essais thermiques.

**Configuration D.** Les paramètres figés ont la même valeur que dans le cas précédent mais la paroi perméable est à porosités discrètes localisées en  $l/4$  et  $3l/4$ .

Comme précédemment, les résultats peuvent s'interpréter en fonction du paramètre NG.

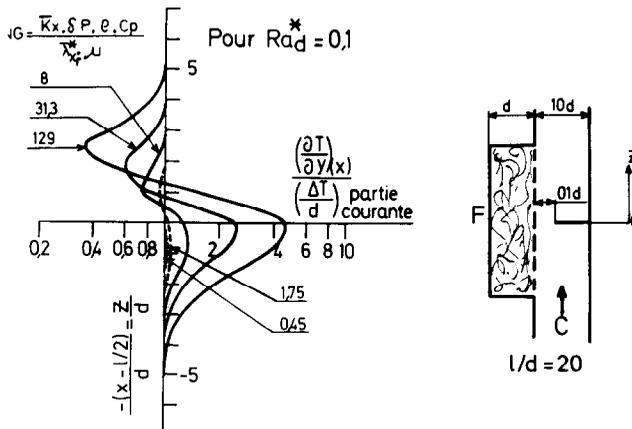


FIG. 13. Répartition du flux de chaleur le long de la paroi froide dans le cas d'un échelon de pression le long de la paroi chaude (calculs).

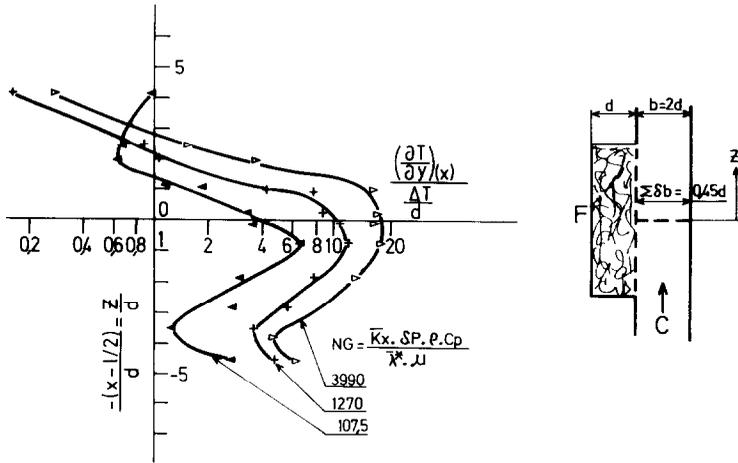


FIG. 14. Répartition du flux de chaleur le long de la paroi froide dans le cas d'un échelon de pression le long de la paroi chaude (Essais thermiques).

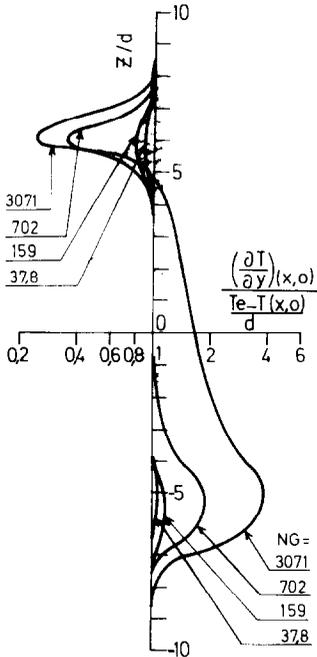


FIG. 15. Répartition du flux de chaleur le long de la paroi froide avec une paroi chaude à porosités discrètes (calculs).

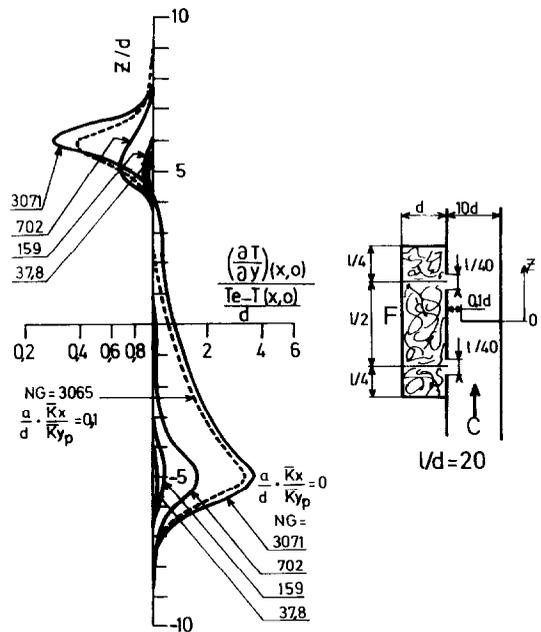


FIG. 16. Répartition du flux de chaleur le long de la paroi froide avec une paroi chaude à porosités discrètes.

## 7. CONCLUSIONS

Un programme de calcul a été élaboré et mis au point pour décrire les effets de la convection mixte dans un milieu poreux délimité par des parois planes orthogonales dont l'une est perméable.

Un début d'exploitation du programme a été effectué et conduit aux principales conclusions suivantes:

—Le paramètre  $NP = -Re_d^* \cdot Pr^*/Ra_d^*$  délimite les zones où la convection forcée ou la convection naturelle sont prépondérantes.

—Avec toutes les parois étanches, les conductivités thermiques apparentes des cellules dépendent du paramètre  $Ra_d^*/A$  pour les grandes valeurs de l'allongement  $A$  et de  $Re_d^*/A$  et  $A$  pour les petites et faibles valeurs de l'allongement.

—Avec paroi perméable et gradient de pression uniforme le long de cette paroi, les corrélations pour les grands allongements sont fonction de  $Ra_d^*/A$  lorsque la convection naturelle est prépondérante, et de  $Re_d^* \cdot Pr^*/A$  lorsque la convection forcée est prépondérante. Pour les petits allongements il y a une influence supplémentaire de l'allongement.

—Avec un échelon de pression le long de la paroi perméable et des cellules de grands allongements, la perturbation du flux le long de la paroi froide est localisée. Son amplitude et l'étendue de la zone perturbée dépendent du paramètre  $NG$ .

—Avec un échelon de pression et une paroi perméable à porosités discrètes, l'interprétation des résultats peut également se faire à l'aide du paramètre  $NG$ .

## REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent exprimer leur reconnaissance envers la S.E.C.N., l'E.D.F., et le C.E.A. qui ont financé cette étude et ont bien voulu nous autoriser à publier les résultats. Nous sommes aussi particulièrement heureux d'adresser nos plus vifs remerciements à Messieurs Merot, Jolas, Lida, Avet Flancart, Cornille et Costes pour leur collaboration fructueuse tout au long de ce travail. Ils remercient également Messieurs Blondeau, Grossin, Mischeau et Pirovano qui à des titres divers ont également pris part au déroulement de ce travail à la Société Bertin.

## BIBLIOGRAPHIE

1. P. N. ROMANENKO et V. N. KHARCHENKO, The effect of transverse mass flow on heat transfer and friction drag in a turbulent flow of compressible gas along an arbitrarily shaped surface, *Int. J. Heat Mass Transfer* **6**, 731-754 (1963).
2. G. B. WALLIS, Studies in pressure drop with lateral mass extraction, *Proc. Instn. Mech. Engrs* **180** (1), (1965-1966).
3. G. MORDCHELLES-REGNIER, P. MICHEAU, A. PIROVANO, C. JUMENTIER, J. S. TERPSTRA, Y. LECOURT, P. CHAVE et M. BREUILLE, A.I.E.A. Julich 21/25 Octobre, Colloque sur les réacteurs poussés et à haute température refroidis par un gaz (1968).
4. M. CLOUPEAU, S. KLARSFELD et R. GROSSIN, Visualisation d'isothermes dans un milieu poreux par effet Christiansen *C.R. Acad. Sci., Paris* **269B**, 163-166 (1969).
5. R. GROSSIN, M. JANNOT, P. MICHEAU et S. KLARSFELD, Echanges de chaleur par convection naturelle en milieu poreux. Réunion d'information sur les travaux relatifs aux cuves de réacteurs en béton précontraint et à leur isolation, Bruxelles 18/20 Novembre (1969).
6. B. N. FURBER et J. DAVIDSON, The thermal performance of porous insulants in a high pressure gas environment Bruxelles 18/20 Novembre (1969).
7. S. WITAKER, Advances in the theory of fluid motion in porous media, *Ind. Engng Chem.* (1969).
8. S. KLARSFELD, Champ de température associé aux mouvements de convection naturelle dans un milieu poreux limité, *Revue Générale de thermique* n° 108 (Décembre 1970).
9. M. COMBARNOUS, Convection naturelle et mixte dans une couche poreuse horizontale. *Revue Générale de Thermique* n° 108 (Décembre 1970).

## ANNEXE

*Comportement de la Paroi Permeable*

Soit une paroi perméable séparant le milieu extérieur du milieu poreux. Dans quelle mesure la distribution discrète des porosités de cette paroi peut elle être considérée comme continue du point de vue du calcul? Cette question a été soulevée en particulier à propos des essais sous pression où une paroi perforée séparent les deux milieux. Pour tenter d'apporter une réponse à ce problème, nous avons examiné le cas d'un écoulement forcé isotherme pénétrant dans le milieu poreux après avoir traversé une telle paroi.

L'écoulement étant supposé isotherme, la détermination de l'écoulement dans le milieu poreux consiste à résoudre une équation de Laplace. Cette résolution effectuée à partir d'un programme de calcul numérique conduit aux conclusions suivantes:

—La largeur de la zone perturbée, à l'aval des trous de la paroi perforée, est sensiblement égale au pas des trous de cette paroi.

—Lorsque l'épaisseur de cette zone perturbée est petite vis-à-vis de l'épaisseur  $d$  du milieu poreux, il est équivalent

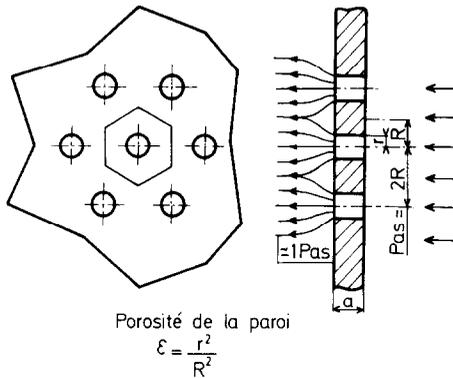


FIG. 17. Schéma de la paroi perméable.

de remplacer la paroi perforée par un milieu poreux de caractéristiques:

$$\overline{Kx} = 0$$

$$(\overline{Ky_p})_e^{-1} = [Ky_p V_{rai}]^{-1} + [\overline{Ky} (a/R) f(\varepsilon)]^{-1}$$

avec:

$$f(\varepsilon) = 4,67 + 0,022\varepsilon$$

pour:

$$0,01 < \varepsilon < 0,09$$

et:

$$f(\varepsilon) = 0,083 e^{5,57\sqrt{\varepsilon}}$$

Pour:

$$0,09 < \varepsilon < 0,49.$$

Un raisonnement similaire peut être appliqué à des plastrons de formes diverses, par exemple avec des porosités en forme de fentes.

#### MIXED CONVECTION IN POROUS MEDIA

**Abstract**—For conception of nuclear reactors of thermal insulation purposes a theoretical study and a experimental investigation were conducted to determine the flow interaction between free and forced convection in porous media.

The equations describing the model are presented and a numerical computer code is developed. The analytical results are in good agreement with the experiments. The exploitation of the code show the governing parameters.

#### MISCHKONVEKTION IN PORÖSEN MEDIEN

**Zusammenfassung**—Theoretische und experimentelle Arbeiten über die Mischkonvektion in porösen Medien wurden zur Untersuchung des thermischen Isolationsverhaltens gewisser Wärmeisolerstoffe für Kernreaktoren ausgeführt.

Die wichtigsten Ergebnisse sind beschrieben sowie das Berechnungsmodell, die theoretischen und experimentellen Gegenüberstellungen und die Ergebnisse einer systematischen Berechnungsvorschrift.

#### КОНВЕКЦИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

**Аннотация**—Теоритические и экспериментальные работы по смешанной конвекции в пористой среде производились в виде предвидения повидения термической изоляции по некоторым термоизоляторов для ядерных реакторов.

Описываются достигнутые основные результаты, особенно модель удерживанного вычисления, теоритические и экспериментальные сравнения, и результаты систематической эксплуатакой свода правил вычисления.