

DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE CONVECTION D'UN ALLIAGE SODIUM-POTASSIUM DANS UN TUBE CIRCULAIRE

E. SKUPINSKI*, J. TORTEL et L. VAUTREY

Section des Métaux Liquides, Département de Recherche Physique, Commissariat à l'Énergie Atomique, Paris (Centre d'Études Nucléaires de Fontenay-aux-Roses)

(Reçu le 22 Octobre 1964)

Résumé—Par mesures de température dans la paroi, nous avons déterminé les coefficients d'échange thermique dans un tube circulaire et horizontal avec du NaK (44% Na-56% K) en régime permanent, thermiquement et hydrodynamiquement établi, à flux de chaleur constant ($q/A_{\max} = 16 \text{ W/cm}^2$), pour des valeurs du nombre de Reynolds de $3,6 \cdot 10^3$ à $9,05 \cdot 10^5$, et des valeurs du nombre de Péclet de $5,8 \cdot 10^4$ à $1,31 \cdot 10^4$ (domaine particulièrement étendu). Le nombre de Prandtl était sensiblement constant autour d'une valeur moyenne de $1,53 \cdot 10^{-2}$. Le taux d'oxyde était de l'ordre de 6 ppm environ. Nos résultats sont en bon accord avec certains autres résultats publiés auparavant et sont bien représentés par la relation:

$$Nu = 4,82 + 0,0185 Pe^{0,827}$$

Pour vérifier le bon fonctionnement de notre appareil de mesure, nous avons tout d'abord effectué des essais à l'eau.

NOMENCLATURE

A, constante empirique, sans dimension;
B, constante empirique, sans dimension;
C, concentration en oxygène [ppm];
D_i, diamètre intérieur du tube [m];
f, fonction de la quantité en parenthèses, sans dimension;
Gr, nombre de Grashof, sans dimension, basé sur *L*;
h_i, coefficient de convection sur la surface intérieure du tube [kcal/h m² degC];
h₀, coefficient de convection sur la surface extérieure du tube [kcal/h m² degC];
K_w, coefficient de conduction de la paroi [kcal/h m degC];
L, longueur chauffée [m];
L', longueur hydrodynamique d'entrée [m];
L'', longueur hydrodynamique de sortie [m];
m, constante empirique, sans dimension;
Nu, nombre de Nusselt, sans dimension;
Pe, nombre de Péclet, sans dimension;

Pr, nombre de Prandtl évalué à la température moy. du fluide, sans dimension;
Pr_p, nombre de Prandtl évalué à la température de paroi, sans dimension;
q, puissance thermique échangée [kcal/h];
Re, nombre de Reynolds, sans dimension;
S, surface d'échange [m²];
t, température [°C];
t_m, température moyenne du fluide [°C];
Δt, différence de température entre paroi et fluide [degC];
Δt₀, différence de température entre 2 fluides séparés par une paroi [degC];
ΔT, échauffement du fluide [°C];
U, coefficient moyen global d'échange de chaleur [kcal/h m² degC];
V, débit volume de fluide [m³/h];
W, vitesse moyenne du fluide [m/s];
X_w, épaisseur de paroi du tube [m].

I. INTRODUCTION

NOUS AVONS déterminé expérimentalement les coefficients de convection d'un métal liquide en écoulement dans un tube de section circulaire,

* Euratom, Bruxelles, Affecté à la Section des Métaux Liquides, Commissariat à l'Énergie Atomique (Association Euratom-CEA).

traversé par un flux de chaleur constant, dans des conditions de régimes hydrodynamiques et thermiques établis.

Ce sujet est celui qui a été le plus souvent traité dans le domaine des échanges de chaleur par métaux liquides. Entre 1940 et 1953, une vingtaine de rapports ont été publiés [1] et en 1955 a paru un rapport groupant plus de 600 points expérimentaux [2]. Depuis cette date, une douzaine de travaux expérimentaux ont été réalisés [13-17, 19, 20, 24-27].

Jusqu'en 1953, les expérimentateurs ont souvent utilisé de longs échangeurs à tube et conduit annulaire coaxiaux, avec circulation du même métal liquide, à contre courant, dans le tube puis le conduit annulaire (cette disposition permettait la réalisation d'un flux de chaleur constant à travers la paroi du tube, dans la partie de l'échangeur où les régimes étaient établis). Les coefficients moyens globaux d'échange de chaleur entre les deux écoulements de métal liquide étaient déterminés par :

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta t_0} \quad (1)$$

En général, on utilisait ensuite une équation vraisemblable reliant les coefficients de convection sur les surfaces intérieure et extérieure du tube :

$$h_0 = f(h_i) \quad (2)$$

Dans le cas d'un tube mince, d'épaisseur x_w , de coefficient de conduction k_w , U est relié à h_i et h_0 par la relation :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{k_w} + \frac{1}{h_0} \quad (3)$$

x_w et k_w étant connus par ailleurs, les équations (2) et (3) permettaient de calculer h_i et h_0 .

Cette méthode a le défaut d'introduire une incertitude importante par l'expression hypothétique de la relation (2).

Si on veut éviter de formuler la relation (2), on doit connaître par ailleurs h_0 et calculer h_i par la relation (3) :

$$\frac{1}{h_i} = \left(\frac{1}{U} - \frac{x_w}{k_w} \right) - \frac{1}{h_0} \quad (4)$$

Mais cette autre méthode est imprécise si

x_w/k_w et $1/h_0$ sont du même ordre de grandeur que $1/h_i$, ce qui est souvent le cas, car $1/h_i$ résulte de la différence de deux termes de même ordre

$$\left(\frac{1}{U} - \frac{x_w}{k_w} \right) \text{ et } \frac{1}{h_0};$$

il y a donc augmentation importante de l'erreur sur h_i , h_0 étant par ailleurs connu avec une certaine imprécision. En outre, si l'échangeur expérimental n'est pas assez long, une erreur non négligeable peut être introduite dans les résultats par la variation du coefficient d'échange et du flux dans les longueurs de mise en régime.

Nous avons préféré, comme la plupart des expérimentateurs depuis une dizaine d'années, une méthode de détermination directe des coefficients de convection. Par suite de la définition du coefficient de convection :

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta t} \quad (5)$$

ces méthodes de détermination directe comportent la mesure de la température de paroi : pratiquement cette température peut être obtenue par extrapolation d'une température mesurée soit dans la paroi, soit dans le fluide, à une distance aussi faible que possible de l'interface métal liquide-paroi solide.

D'autres imperfections ont pu apparaître dans certains travaux anciens, et ont été éliminées de travaux plus récents. Entre autres :

— Absence ou insuffisance de brassage du métal liquide avant mesure de sa température moyenne. La forme régulièrement courbée des profils de température dans les métaux liquides rend indispensable le brassage avant mesure, qui n'est pas toujours nécessaire avec les fluides à Pr élevé.

— Position défectueuse des thermocouples de paroi : thermocouples trop éloignés de la surface intérieure du tube et trop près du bobinage chauffant extérieur. L'effet de cette disposition est surtout sensible avec un tube en métal peu conducteur, par exemple en acier inoxydable : la correction nécessaire pour obtenir la température de paroi à partir de la température mesurée est importante en comparaison de l'écart de température entre paroi intérieure et fluide, surtout aux grands débits ; l'imprécision sur

cette correction augmente sensiblement l'erreur commise sur Δt , donc sur h , d'après (5). Dans les mêmes conditions, les variations de flux de chaleur à travers la surface extérieure du tube, dues à l'inhomogénéité de l'élément chauffant peuvent provoquer des variations parasites de température à l'endroit de la mesure.

—Reconstitution médiocre de la paroi après installation du thermocouple. La reconstitution peut avoir été faite avec des matériaux de coefficient de conduction très différent de celui du matériau du tube, ou avec introduction de grandes résistances thermiques de contact. Dans ce cas, le flux de chaleur et la température peuvent être fortement modifiés dans la région de mesure.

—Chauffage du métal liquide par passage de courant électrique dans le tube. Une proportion notable du courant passe alors dans le métal liquide, d'où un dégagement de chaleur parasite dans la masse du fluide. La perturbation qui en résulte conduit à des corrections importantes et incertaines.

—Absence de correction de conduction axiale dans le métal liquide et la paroi du tube, pour les faibles valeurs de Pe [3], dans le cas où la température moyenne du métal liquide dans une section donnée est obtenue par interpolation entre températures moyennes d'entrée et de sortie. Cette absence de correction a pour effet une diminution des valeurs de Nu d'autant plus importante que Pe est faible, et peut conduire à des erreurs considérables.

—Domaine insuffisant de variation du débit, c'est-à-dire de Re , entraînant une imprécision sur la loi de variation de Nu en fonction de Re . En effet, la dispersion inévitable des points expérimentaux ne peut être contrebalancée que par un grand intervalle de variation de Re .

—Faibles valeurs des écarts de température entre paroi et métal liquide (Δt) et entre entrée et sortie du fluide. Cette situation a pour effet une diminution de précision sur Δt et sur la puissance échangée q , lorsque cette dernière est basée sur l'écart de température du fluide entre entrée et sortie. Il en résulte une diminution de précision sur h d'après l'équation (5).

—Purification du métal liquide et contrôle de pureté mal définis. Les interactions au contact métal liquide-paroi peuvent avoir des effets mal

connus sur la résistance thermique, donc sur les valeurs de h mesurées. Ces effets peuvent d'ailleurs varier suivant la nature du métal liquide (Hg, Pb-Bi, Na ou NaK).

Nous nous sommes efforcés d'éviter ces imperfections au cours du travail que nous présentons. En particulier:

—nous avons reconstitué la paroi du tube, à l'emplacement des thermocouples, avec autant de soin que possible.

—nous avons effectué nos mesures avec des différences de température relativement grandes, grâce à la valeur assez élevée du flux thermique ($q/A \leq 16,5 \text{ W/cm}^2$)

—nous avons pu réaliser une très grande variation de Re au cours de nos mesures:

$$3,6 \cdot 10^3 \leq Re \leq 9,05 \cdot 10^5$$

II. APPAREILLAGE

(a) Circuit

A l'exception de la veine de mesure, le circuit était construit en acier inoxydable austénitique type 18/10 (acier NS 22 S des Acieries d'Ugine), soudé à l'arc sous argon. Le diamètre intérieur de la tuyauterie principale était de 50 mm. Avant fonctionnellement, l'étanchéité du circuit a été vérifiée au spectromètre à hélium et à l'argon sous pression.

Le métal liquide utilisé était un alliage sodium-potassium (NaK) à 44 pour cent en poids de sodium, fourni par MSA Research Corporation (USA). Les niveaux libres de NaK étaient recouverts d'argon à une pression effective de 0,5 bar maximum, épuré par barbotage dans un bain de NaK avant son introduction dans le circuit.

Le circuit d'essai est représenté schématiquement sur la Fig. 1. Le NaK mis en circulation par la pompe (2) est chauffé dans la veine de mesure (12), ou dans le by-pass (11) et refroidi dans l'échangeur à air comprimé (7). La veine (12) ne pouvant supporter des températures nettement supérieures à 200°C, on a d'abord fait fonctionner l'installation en utilisant le by-pass (11) pour porter le NaK à 350 ou 400°C, et obtenir ainsi un bon mouillage des débitmètres électromagnétiques (4). En ce qui concerne le mouillage de la veine de mesure, il a été montré [29] qu'il n'y a

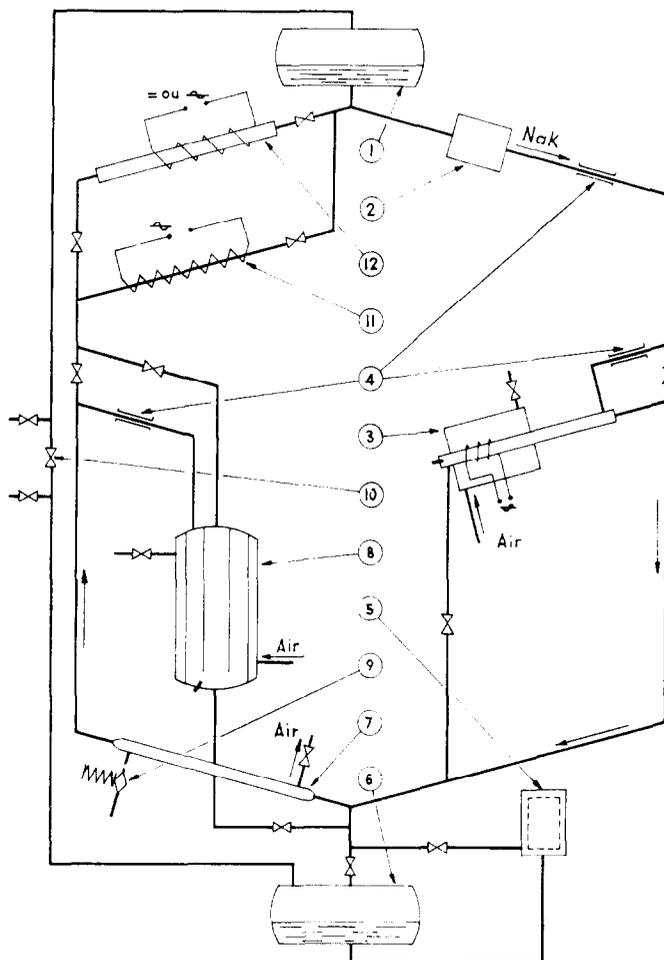


FIG. 1. Schéma du circuit d'essai.

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. Réservoir d'expansion | 7. Refroidisseur par air comprimé |
| 2. Pompe | 8. Piège froid |
| 3. Indicateur de bouchage | 9. Régulateur de pression d'air |
| 4. Débitmètres | 10. Tuyauterie d'argon |
| 5. Filtre de remplissage | 11. By-pass pour mouillage des débitmètres |
| 6. Réservoir de stockage | 12. Veine de mesure. |

pas de variation sensible des coefficients de convection du NaK avec une paroi de nickel pour des températures inférieures à 220°C et pour 350°C.

Pour éviter la convection naturelle, la veine (12) était horizontale et placée à la partie supérieure du circuit. L'alimentation en air comprimé du refroidisseur (7) est stabilisée par le régulateur de pression (9) pour améliorer la

stabilité thermique pendant les mesures. Le NaK est purifié par le piège froid (8) et refroidi à l'air et sa pureté est vérifiée par mesure de la température de bouchage dans l'indicateur de bouchage (3).

Le remplissage s'effectuait à partir du réservoir de stockage (6) à travers le filtre (5) constitué par une paroi poreuse en acier inoxydable fritté de porosité 5 μ . Un réservoir d'expansion (1)

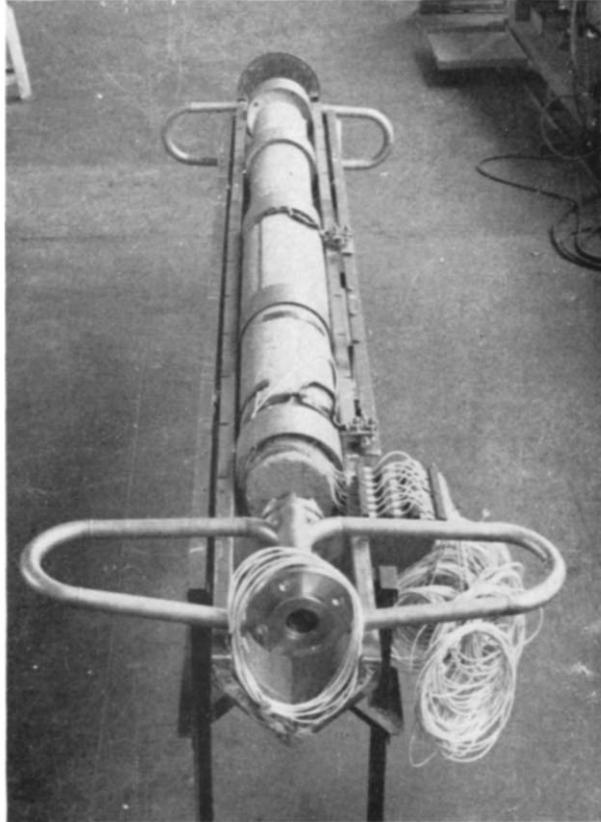


FIG. 2. Vue extérieure de l'ensemble de la veine de mesure.

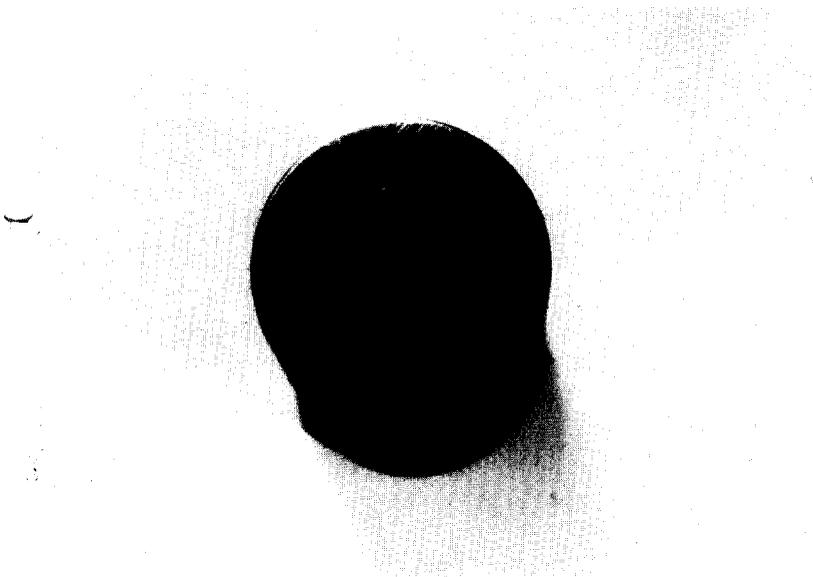


FIG. 5. Veine de mesure—photographie d'une coupe selon un plan perpendiculaire à l'axe, montrant la bonne reconstitution de la paroi du tube de cuivre, après montage des thermocouples de paroi.

permet la dilatation du NaK. L'alimentation en argon est effectuée par la tuyauterie (10).

(b) *Veine de mesure*

La veine de mesure (Figs. 2 et 2 bis) était constituée par un ensemble de trois tubes rectilignes de même diamètre placés bout à bout : un tube de cuivre chauffé compris entre deux tubes d'acier inoxydable non chauffés servant à l'établissement du régime hydraulique. Des guidages extérieurs aux tubes assuraient le bon alignement des trois parties. Les dimensions de la veine étaient les suivantes :

- diamètre intérieur des tubes
 $D_i = 2,2 \cdot 10^{-2}$ m;
- longueur chauffée
 $L = 1$ m soit $L/D_i = 46$;
- longueur d'entrée hydrodynamique
 $L' = 8,8 \cdot 10^{-1}$ m soit $L'/D_i = 40$;
- longueur de sortie hydrodynamique
 $L'' = 1,7 \cdot 10^{-1}$ m soit $L''/D_i = 8$;
- épaisseur du tube chauffé
 $x_w = 9 \cdot 10^{-3}$ m.

Le chauffage de la section de mesure (tube de cuivre) était réalisé à l'aide d'un bobinage à spires jointives enroulé sur sa surface extérieure (6 brins alimentés en parallèle). Le fil chauffant en nickel-chrome était contenu dans une gaine en inconel de 2 mm de diamètre extérieur et isolé de cette dernière par de la magnésie comprimée. La puissance de chauffage était mesurée à $\pm 0,5$ pour cent.

La surface intérieure du tube de cuivre avait été rodée puis recouverte d'une couche de nickel adhérente de 20μ d'épaisseur. Les tubes d'acier inoxydable sont hydrodynamiquement lisses dans tout l'intervalle de variation du débit (rugosité moyenne: $2,5 \mu$). Le cuivre a été utilisé à cause de son coefficient de conduction thermique élevé, ce qui présentait un double avantage: faible correction pour obtenir la température de la surface intérieure du tube à partir de l'indication du thermocouple situé dans la paroi, et grande homogénéité du flux de chaleur à travers la surface intérieure du tube, malgré les légères variations possibles sur la surface extérieure. Par ailleurs, la pellicule interne de nickel permet d'expérimenter avec un contact

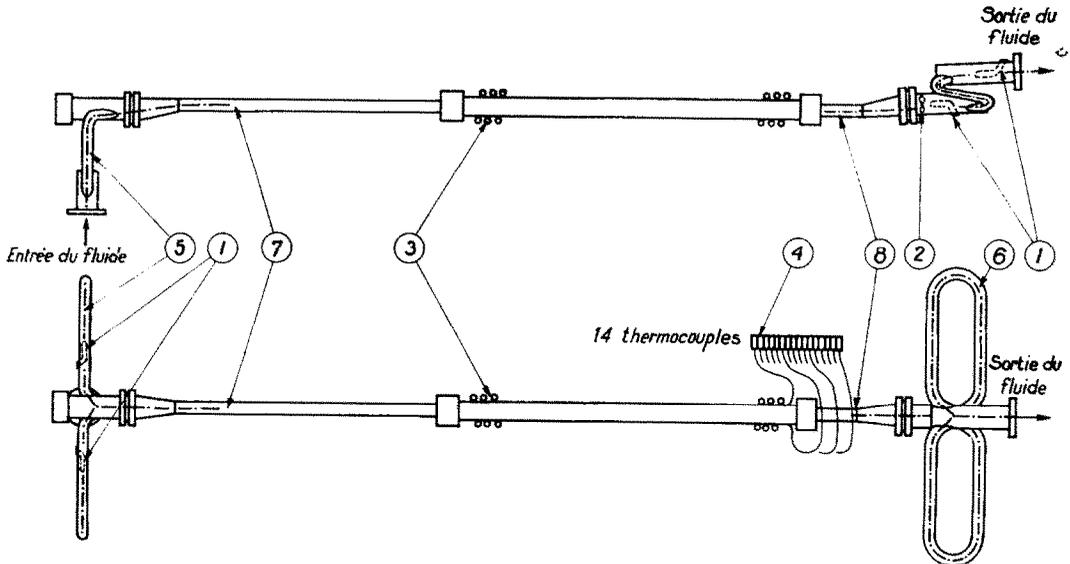


FIG. 2 bis. Schéma de l'ensemble de la veine de mesure.

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1. Doigt de gant | 5. Lyre d'entrée |
| 2. Mélangeur | 6. Lyre de sortie |
| 3. Bobinage chauffant | 7. Veine d'entrée hydraulique |
| 4. Sorties des thermocouples | 8. Veine de sortie hydraulique. |

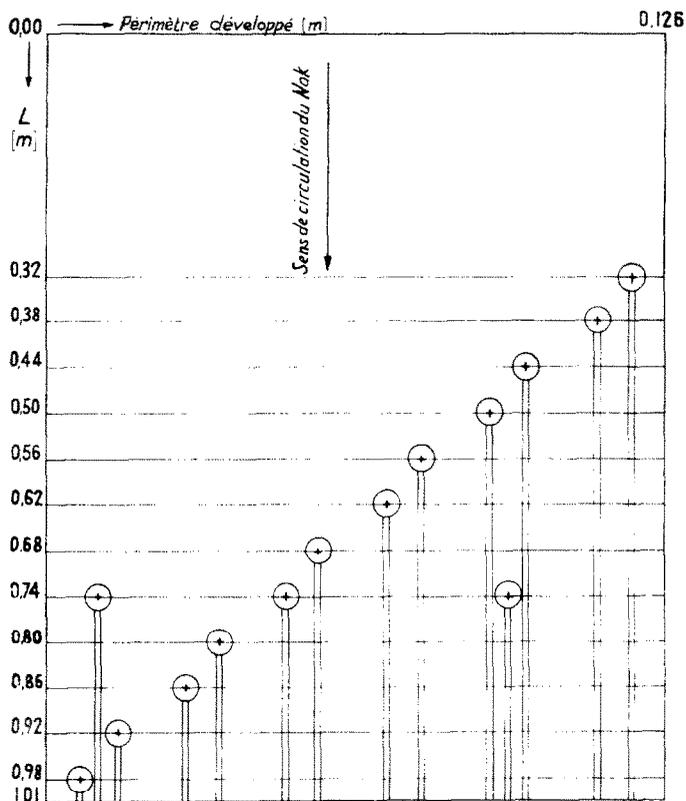


FIG. 3. Veine de mesure—schéma de l'emplacement des thermocouples. Les chiffres en regard des différentes sections indiquent les distances, en mètres, entre ces sections et la section où commence le chauffage du NaK.

NaK–nickel, plus voisin du cas usuel (NaK–acier inoxydable) que le contact NaK–cuivre.

(c) Mesures de températures

Les mesures de température ont été effectuées à l'aide de thermocouples chromel–alumel, entourés d'une gaine en incoel de 1 mm de diamètre extérieur, isolés par de la poudre de magnésie comprimée. La soudure chaude des conducteurs thermoélectriques était isolée électriquement de la gaine pour permettre la mesure de température différentielle. La gaine était fermée par une soudure étanche au niveau de la jonction des conducteurs et obturée à l'autre extrémité par une goutte de vernis pour protéger la magnésie contre l'entrée d'humidité (la résistance d'isolement entre conducteurs thermoélectriques et gaine est restée invariable).

On a utilisé pour les mesures un potentiomètre à décades, système Bouty, et un détecteur de zéro électronique pour courant continu. Le potentiomètre permettait la lecture des f.e.m. à $\pm 0,5 \mu\text{V}$ près et le galvanomètre avait une sensibilité de $\pm 0,5 \mu\text{V}$ au voisinage de son zéro. Toutes les précautions ont été prises pour éliminer du circuit de mesure les f.e.m. thermoélectriques parasites dues aux changements de métaux.

Toutes les mesures de températures ont été effectuées sous forme de différences par rapport à un thermocouple de référence donnant la température d'entrée du NaK. Seule la température d'entrée du NaK était obtenue directement en opposant le thermocouple de référence à un thermocouple plongé dans la glace fondante.

Avant les premières mesures, on a procédé à

une vérification en place de tous les thermocouples, par fonctionnement isotherme de la boucle à différentes températures, le NaK étant alors chauffé dans la branche (II). L'écart relatif des différents thermocouples par rapport au thermocouple de référence était, dans tous les cas, inférieur à 0,5 pour cent. Les écarts obtenus ont ensuite été pris en compte dans le dépouillement des mesures.

Les thermocouples mesurant les températures moyennes d'entrée et de sortie du NaK étaient placés dans des doigts de gant soudés à la tuyauterie en amont de la longueur hydrodynamique d'entrée et en aval de la longueur hydrodynamique de sortie (deux thermocouples avant et deux thermocouples après la veine). Les doigts de gant placés à la sortie de la veine de mesure étaient précédés d'un mélangeur en forme d'hélice destiné à homogénéiser la température du NaK après son chauffage.

Les températures de paroi ont été obtenues par l'intermédiaire de 14 thermocouples placés dans la paroi en cuivre du tube chauffé; les positions

de ces thermocouples sont précisées dans la Fig. 3. Chaque thermocouple était encastré dans un petit cylindre de cuivre, lui-même ajusté dans un trou borgne percé dans la paroi perpendiculairement à son axe (Fig. 4) On notera :

—la faible distance (2,5 mm) entre soudure du thermocouple et surface intérieure du tube, d'où un écart minime entre la température indiquée par le thermocouple et la température de paroi intérieure du tube ($0,5^{\circ}\text{C}$ pour un flux de 10 W/cm^2).

—la longueur de thermocouple de 6 mm environ à partir de la soudure, placée parallèlement à l'axe du tube, pour minimiser l'effet de conduction le long du thermocouple.

La base inférieure des petits cylindres de cuivre a été dressée après encastrement du thermocouple dans sa gorge, jusqu'à affleurement de la surface extérieure de la gaine dans le plan de la base, et les fonds de trous borgnes ont été réalisés bien plans et perpendiculaires à l'axe du trou avec un bon état de surface. Enfin, les

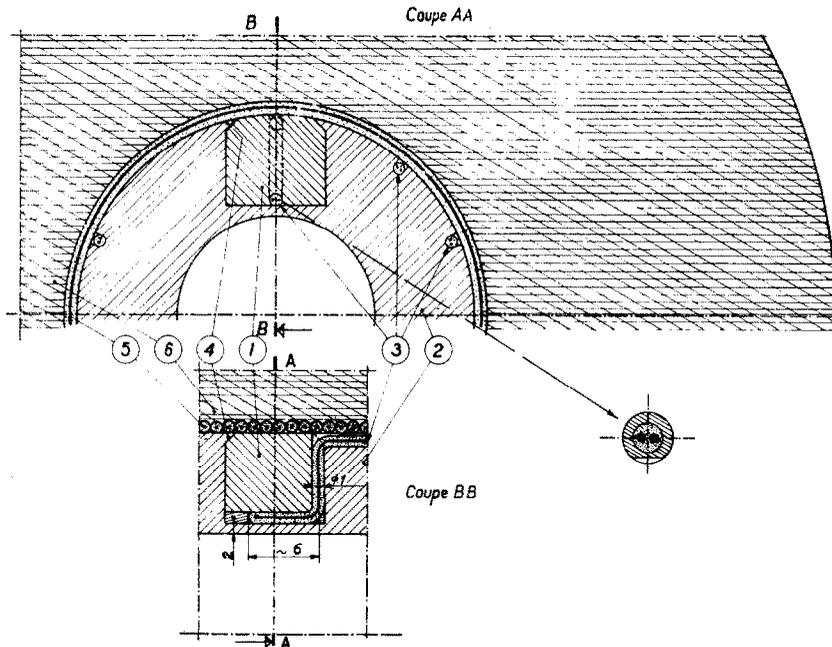


FIG. 4. Veine de mesure—demi-vue en coupe d'une section de mesure (cotes en millimètres).

- | | |
|-----------------------------|------------------|
| 1. Petit cylindre de cuivre | 4. Sertissage |
| 2. Paroi du tube en cuivre | 5. Fil chauffant |
| 3. Thermocouple | 6. Calorifuge. |

petits cylindres ont été énergiquement pressés contre les fonds des trous par matage de métal du tube autour des petits cylindres de cuivre (voir Fig. 4). Ces précautions tendaient à supprimer toute perturbation du champ de température dans les régions du tube contenant les thermocouples de paroi. Des maquettes du montage décrit ci-dessus ont été réalisées pour essai et des coupes de ces maquettes, analogues à la coupe AA de la Fig. 4, ont été effectuées. La Fig. 5 représente une photo d'une telle coupe.

(d) Mesures de débits

Les débits de NaK étaient mesurés à l'aide de débitmètres électromagnétiques à électroaimants, à alimentation stabilisée, préalablement étalonnés. Les électrodes de prise de tension étaient en acier inoxydable, pour réduire les f.e.m. thermoélectriques parasites, et les corps des débitmètres étaient précédés de longueurs d'établissement de régime hydraulique. Les mesures étaient effectuées à l'aide du même dispositif potentiométrique que celles des thermocouples. Deux débitmètres étaient alternativement utilisés pendant les mesures: un débitmètre de 40 mm de diamètre, donnant 1 mV pour 0,84 m³/h et un débitmètre de 8 mm de diamètre, donnant 1 mV pour 0,08 m³/h. L'utilisation de deux débitmètres de sensibilités différentes permettait d'obtenir des f.e.m. mesurables avec précision dans la gamme très étendue des débits utilisée pour les mesures.

III. TRAITEMENT DES MESURES

Pour dépouiller les mesures, on a utilisé les propriétés physiques du NaK données dans [4-8] après mise en équation à la Section des Métaux Liquides, pour faciliter le dépouillement à l'aide d'une machine à calcul électronique. Les propriétés physiques ont été prises à la température moyenne du fluide dans la région de mesure (pour $L = 0,65$ m). Le coefficient de conduction du matériau du tube, cuivre OFHC, a été déterminé par un laboratoire spécialisé* sur deux échantillons de la barre utilisée pour la fabrication du tube d'essai. La précision de

mesure était de l'ordre de ± 1 pour cent. De plus, on a fait mesurer† le diamètre intérieur et l'épaisseur de paroi du tube dans toutes les sections de mesure à $\pm 1/100$ mm. Ces dernières mesures permettaient de connaître avec précision la position des thermocouples dans la paroi, pour en déduire la température de la paroi intérieure du tube. Les températures moyennes du fluide ont été calculées par interpolation linéaire entre celles d'entrée et de sortie, corrigées des pertes dans les longueurs d'établissement de régime hydraulique. On a vérifié, avant les mesures, que les températures étaient stables à $\pm 0,1$ degC près. Enfin, on s'est assuré que la zone de mesure correspondait à une région de régimes thermiquement et hydrauliquement établis: ce fait découle du parallélisme entre la droite représentant les températures du fluide et celle représentant les températures dans la paroi (voir Fig. 6).

Les coefficients de convection h ont été déterminés à partir du flux de chaleur (basé sur le débit pondéral et l'échauffement axial du NaK), et de la différence de température entre paroi et fluide. Les valeurs des coefficients de convection et des nombres de Nusselt ont été corrigées de l'effet de la conduction axiale dans la paroi et dans le métal liquide [3] et de la dissipation de chaleur dans le liquide provoquée par la perte de charge dans la veine de mesure. Les corrections varient en gros respectivement comme $1/Pe^2$ et Re^2 . C'est pourquoi leur effet est limité aux faibles et grandes valeurs de Re , respectivement. L'ordre de grandeur maximal de ces corrections était de 20 pour cent en ce qui concerne la conduction axiale, et de 15 pour cent en ce qui concerne la dissipation de chaleur par pertes de charge.

A titre de vérification, on a comparé la puissance calorifique (déduite du débit et de l'échauffement du NaK) et la puissance électrique de chauffage. Le rapport puissance électrique/puissance calorifique était compris entre 0,90 et 1,10 pour 80 pour cent environ des points de mesure (domaine de Pe de 100 à 7000). Aux deux extrémités de la plage de mesure (Pe de 55 à 100 et de 7000 à 13 000), ce rapport restait toujours compris entre 0,80 et 1,20.

* Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Allemagne).

† Laboratoire Central de l'Armement, Arcueil (Seine).

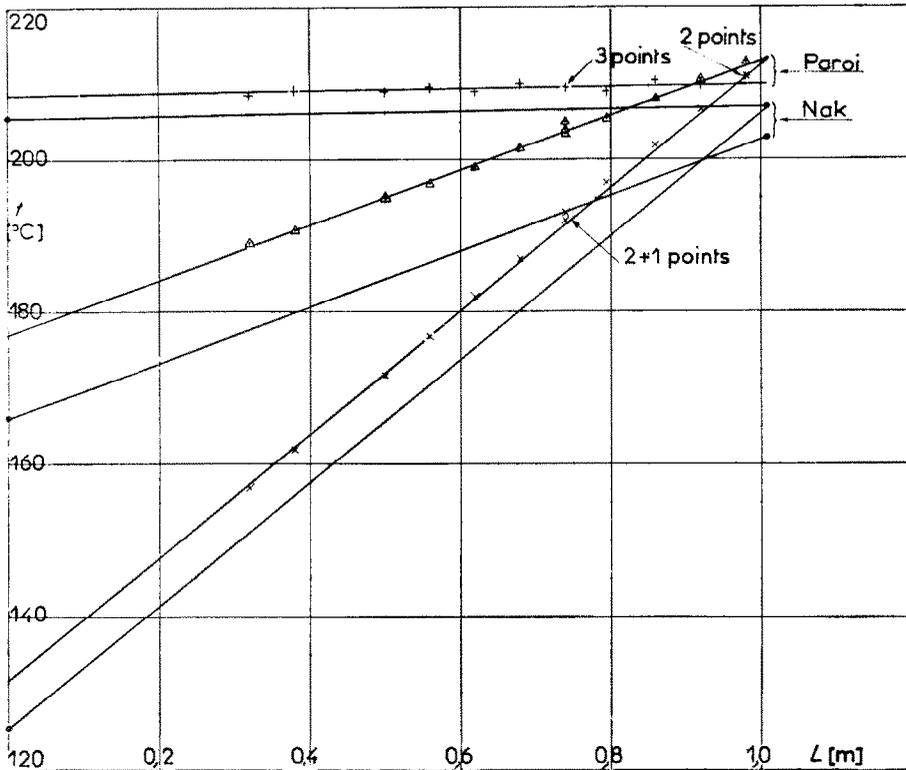


FIG. 6. Exemples de répartition des températures de NaK et de paroi, le long de la veine de mesure. L'abscisse 0 correspond au début du chauffage. Les diagrammes présentés ont été obtenus dans les conditions suivantes :

- symbole \times — $Pe = 58 - (q/A) = 2,5 \cdot 10^4 \text{ kcal/h m}^2 - \Delta t = 6,5 \text{ degC}$
- symbole \triangle — $Pe = 4 \cdot 10^2 - (q/A) = 7,7 \cdot 10^4 \text{ kcal/h m}^2 - \Delta t = 10,9 \text{ degC}$
- symbole $+$ — $Pe = 1,3 \cdot 10^4 - (q/A) = 1,25 \cdot 10^5 \text{ kcal/h m}^2 - \Delta t = 2,7 \text{ degC}$.

IV. RESULTATS

Eau

Avant les essais avec le NaK, nous avons effectué des mesures de coefficients de convection avec de l'eau. Les essais avaient pour but de mettre en évidence toute imperfection de l'appareillage de mesure qui était, sauf pour les débits, le même pour les deux fluides. Nous avons choisi comme base de comparaison les relations de Friend et Metzner [9] et de Mikheev [10] qui nous semblent être parmi les plus complètes du point de vue variation de paramètres et références expérimentales. Ces relations sont représentées sur la Fig. 7* avec nos points expérimentaux ; on

* Les courbes de la Fig. 7 sont repérées d'après les numéros de références bibliographiques. Il en est de même pour les Figs. 8 et 9.

à également tracé la relation classique de Colburn [28]. On peut noter l'excellent accord de nos points expérimentaux avec la formule de Friend et Metzner ; ils sont aussi en bon accord avec la relation de Mikheev. Au cours de nos mesures, le rapport puissance électrique / puissance calorifique était toujours compris entre 0,95 et 1,05.

NaK

Les coefficients d'échange thermique avec le NaK ont été obtenus en régime permanent, thermiquement et hydrodynamiquement établi, à flux de chaleur constant ($2,28 \cdot 10^4 < q/A \text{ kcal/m}^2 \text{ h} < 1,42 \cdot 10^5$) et pour les valeurs suivantes des paramètres d'essai :

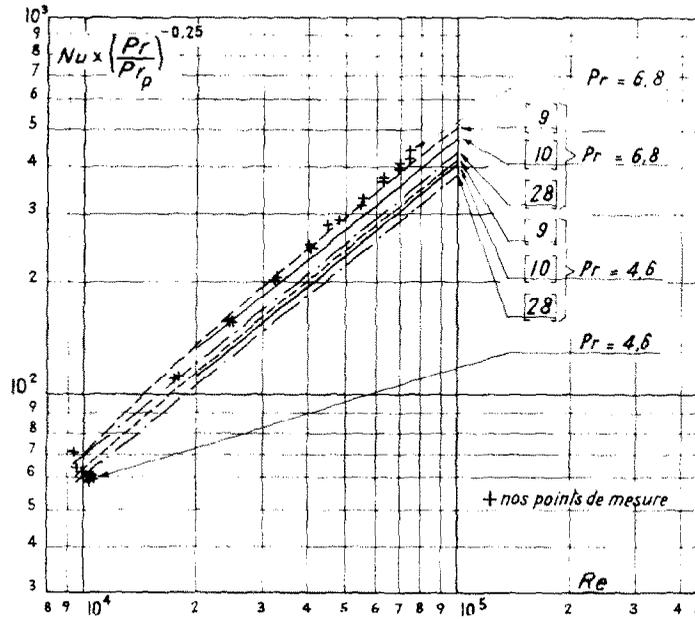


Fig. 7. Présentation de nos points de mesure à l'eau. Les courbes [28] correspondent à $Pr/Pr_p = 1$. Nos points expérimentaux ont été obtenus pour des valeurs de Pr comprises entre 4,6 et 6,8.

- Nombre de Reynolds
 $3,6 \cdot 10^3 < Re < 9,05 \cdot 10^5$
- Nombre de Prandtl
 $1,42 \cdot 10^{-2} < Pr < 1,66 \cdot 10^{-2}$
- Nombre de Péclet
 $58 < Pe < 1,31 \cdot 10^4$
- Température moyenne du fluide (pour $L = 0,65$ m)
 $176 < t_m \text{ } ^\circ\text{C} < 212$
- Différence de température entre paroi et fluide
 $2,7 < \Delta t \text{ degC} < 20,5$
- Echauffement du fluide
 $1,8 < \Delta T \text{ degC} < 90,5$
- Débit volumétrique
 $9,9 \cdot 10^{-2} < V \text{ m}^3/\text{h} < 23,2$
- Vitesse du fluide
 $7,25 \cdot 10^{-2} < W \text{ m/s} < 16,9$
- Teneur en oxyde
 $C \sim 6 \text{ ppm.}$

Des exemples de répartition des températures dans la paroi et dans le fluide en fonction de la distance du début de la longueur chauffée sont

donnés par la Fig. 6. La dispersion des points est faible, et le parallélisme des courbes pour le NaK et la paroi montre que le régime est thermiquement et hydrauliquement établi. On notera également la bonne symétrie circumférentielle des températures d'après les trois points de mesure correspondant à $L = 740$ mm ($L/D \sim 34$); ces trois points ont été obtenus à l'aide de trois thermocouples montés à 120° l'un par rapport à l'autre dans une même section (voir Fig. 3).

La Fig. 8 représente nos résultats sous la forme $Nu = f(Re)$. Etant donné la faible variation expérimentale du nombre de Prandtl, il n'était pas possible de chercher à isoler les variations de Nu en fonction de Re d'une part et de Pr d'autre part. Les points expérimentaux sont au nombre de 113, correspondant à de nombreux réglages du débit et du flux thermique (de nombreux points n'ont pu être représentés sur le graphique parce qu'ils sont superposés); chaque relevé de mesures a été répété au moins deux fois. Pour des raisons technologiques, les mesures ont été effectuées en différentes séries, chaque série de mesures correspondant à

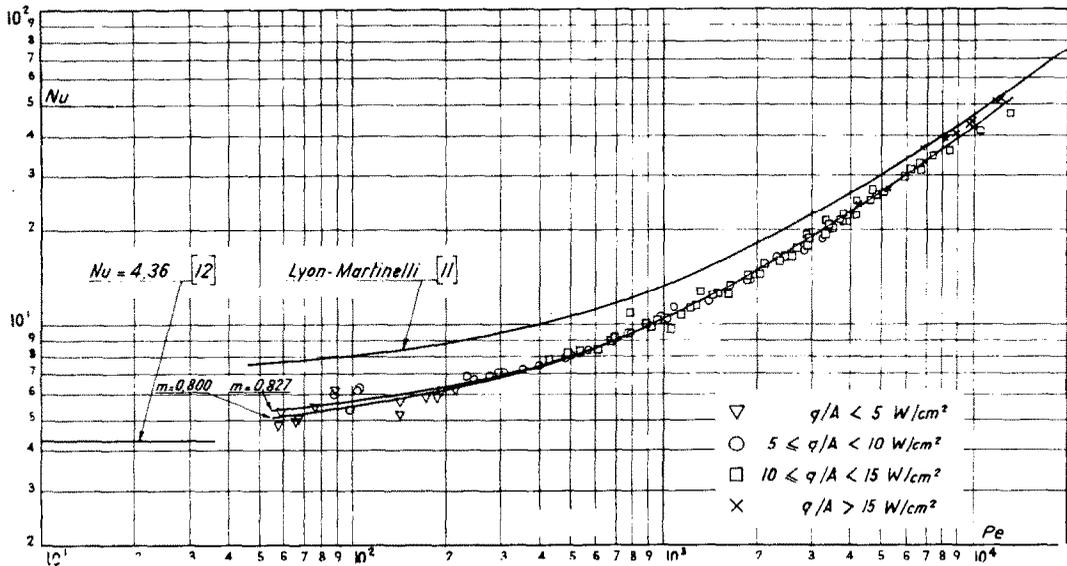


FIG. 8. Présentation de nos points de mesure avec du NaK dans le diagramme $Nu = f(Pe)$.

une valeur constante du flux thermique et à différentes valeurs du débit.

On notera une excellente reproductibilité des mesures, une dispersion relativement faible et l'absence d'une influence sensible du flux thermique (donc des propriétés physiques du fluide). L'erreur maximale expérimentale sur Nu a été estimée à ± 15 pour cent environ. On constate d'ailleurs que la dispersion des points expérimentaux est inférieure à cette valeur.

Nous avons recherché par la méthode des moindres carrés une équation de la forme :

$$Nu = A + B \cdot Pe^m \tag{7}$$

qui représente au mieux l'ensemble de nos points expérimentaux. Deux calculs ont été effectués, soit en fixant *a priori* $m = 0,8$, valeur prévue par Lyon [11] dans sa formule approximative, soit en laissant m arbitraire et en déduisant sa valeur de la méthode des moindres carrés. Deux équations ont été ainsi obtenues :

$$Nu = 4,48 + 0,0238 Pe^{0,8} \tag{8}$$

$$Nu = 4,82 + 0,0185 Pe^{0,827} \tag{9}$$

Etant donné le très grand intervalle de varia-

tion de Pe^* et la faible dispersion des points expérimentaux, on peut remarquer que la valeur de $m = 0,827$ correspondant à nos mesures, ressort d'une façon nette des calculs. Sans attribuer trop de signification aux deux dernières décimales, on notera que cette valeur 0,827 est très voisine de celle prévue par Lyon, $m = 0,8$.

Les courbes correspondant à (8) et (9) sont tracées sur la Fig. 8. On peut constater que les deux équations représentent bien l'ensemble des points et qu'elles donnent des valeurs pratiquement confondues à partir de $Pe \sim 8 \cdot 10^2$. A titre de comparaison, nous avons tracé dans le même diagramme la relation semi-théorique de Lyon et la droite $Nu = 4,36$, valable dans la région laminaire [12]. Nos valeurs de Nu varient d'une manière continue en fonction de Pe , et se rapprochent de la courbe de Lyon pour $Pe > 10^4$. Aux faibles valeurs de Pe , ($Pe < 150$), notre courbe expérimentale descend à des valeurs de Nu voisines de 5.

La Fig. 9 permet la comparaison de nos

* Notre domaine de mesure correspond à un rapport de $2,3 \cdot 10^2$ environ entre les valeurs maximale et minimale de Pe . A notre connaissance, aucun travail expérimental antérieur ne semble avoir été effectué sur un domaine aussi vaste.

résultats représentés par la relation (9) avec d'autres travaux antérieurs, sous forme de courbes moyennes (que nous avons dans certains cas tracées nous-mêmes pour représenter les points expérimentaux publiés). Pour cette comparaison, nous n'avons retenu parmi les travaux récents que ceux qui sont effectués avec mesures directes, c'est-à-dire dans lesquels on a mesuré la température sur la surface d'échange. Nous avons fait figurer également les résultats de Lubarsky et Kaufman [1] et de Mikheev *et al.* [2] qui sont des synthèses de travaux expérimentaux antérieurs à 1955, comportant également des expérimentations avec mesures indirectes, c'est-à-dire sans détermination des températures de la paroi d'échange.

Même parmi les travaux récents, on trouve encore une dispersion considérable. En comparaison avec des résultats obtenus avant 1955 (voir Fig. 53 dans [1]) on constate que les valeurs de Nu sont en général plus élevées. La zone la plus expérimentée est celle de $150 < Pe < 2000$. Ceci est probablement en rapport avec la technologie de mesure. Dans cet intervalle de variation de Pe on arrive à atteindre une précision de mesure supérieure à celle qu'on peut obtenir dans la zone inférieure $Pe < 150$ et supérieure $Pe > 2000$.

Dans la région $Pe < 150$ on rencontre en particulier les difficultés suivantes :

—combinaison d'un grand échauffement du fluide et d'un petit écart de température entre paroi et fluide. Il en résulte une diminution de précision sur l'écart de température entre paroi et fluide, donc sur le coefficient de convection, et une conduction axiale sensible dans le tube et le métal liquide, qui exige une correction notable. En outre, le nombre de Prandtl peut varier sensiblement d'une extrémité à l'autre de la longueur chauffée. Dans nos essais, nous avons limité l'échauffement à des valeurs inférieures à 100°C .

—l'influence possible de la convection naturelle suivant les dimensions et la position du tube d'essai.

—la difficulté accrue de mesurer de faibles débits avec une bonne précision. Pour mesurer les petits débits, nous avons utilisé un débitmètre de grande sensibilité, $0,08 \text{ m}^3/\text{h mV}$.

Dans le domaine $Pe > 2000$, une des difficultés réside dans la réalisation d'un bobinage chauffant, isolé du tube d'essai, capable de fournir un flux thermique suffisant pour avoir des écarts de températures assez grands entre fluide et paroi. D'autre part, la dissipation de chaleur dans le fluide due à la perte de charge dans la veine de mesure exige une correction notable si l'on atteint des vitesses de l'ordre de 20 m/s .

Pour $Pe < 150$ ($Re < 10^4$), zone assez peu expérimentée, on constate que la majorité des courbes expérimentales descendent à des valeurs de Nu inférieures à 7. C'est le cas des résultats de [13], [14], [15], et [2] ainsi que de nos propres mesures. On peut penser que les nombres de Nusselt très voisins de 7 trouvés par Pigorov [16] sont influencés par la convection naturelle, parce qu'ils ont été obtenus avec un tube en position verticale et un écoulement du fluide de bas en haut ($Gr \cdot Pr^2$ de l'ordre de $2,5 \cdot 10^6$). A notre connaissance, le seul travail effectué dans la région laminaire est celui de Petuchov et Yushin [13]. Ils ont fait varier le nombre de Reynolds entre 620 et 23 500 pour un nombre de Prandtl de $2,5 \cdot 10^{-2}$ environ. Le nombre de points de mesure est grand et la dispersion faible. Les auteurs ont trouvé pour la région laminaire $Nu = 4,36$, valeur prévue rigoureusement par des calculs purement théoriques.

Pour $Pe > 150$, la plupart des auteurs, sauf [17], [18] et [19] trouvent des résultats qui sont en dessous des prévisions de Lyon, mais qui ont tendance à les rejoindre pour des nombres de Péclet élevés, à l'exception des travaux [2], [20] et [1], dont les résultats sont bas, surtout pour les valeurs $Pe > 10^3$. Les courbes correspondant à [2] et [1] sont des synthèses de travaux avec de nombreux points de mesure. Il s'agit d'expérimentations antérieures à 1955, qui n'étaient pas toujours effectuées avec de bons montages expérimentaux et de bons procédés de mesure, néanmoins [2] a été confirmé plus tard par [20].

A côté de la corrélation de Lyon [11], valable dans les limites

$$3 \cdot 10^3 < Re < 3,24 \cdot 10^6 \text{ et } 0 < Pr < 10^{-1},$$

nous avons représenté dans la figure 7 deux autres prévisions semi-théoriques, celle de Dwyer [21] et celle de Buleev [22], valable pour

$$5 \cdot 10^3 < Re < 10^6 \text{ et } 10^{-2} < Pr < 10.$$

Les limites de validité des relations citées ont été traduites en nombres de Péclet, pour $Pr = 1,53 \cdot 10^{-2}$, valeur moyenne au cours de nos essais. Les courbes sont distinctes pour les faibles valeurs de Pe , elles se confondent avec la courbe de Lyon pour les grandes valeurs de Pe , celles de Dwyer pour $Pe \sim 5 \cdot 10^3$, celle de Buleev vers $Pe \sim 1,5 \cdot 10^4$. Selon Lyon, on a des valeurs $Nu > 7$ jusqu'à $Pe \sim 60$, correspondant à $Re = 3 \cdot 10^3$, limite inférieure de son calcul. Dwyer prévoit une valeur $Nu = 7$ constante entre Pe correspondant à $Re = 2320$ et $Pe = Pe_{cr}$, la conduction turbulente devenant négligeable vis-à-vis de la conduction moléculaire pour une valeur de $Pe < Pe_{cr}$, qui dépend du Pr . Dans notre cas, Pe_{cr} est environ 140. En général, la courbe de Buleev est placée plus bas que celle des auteurs précédents.

En conclusion, il faut finalement constater qu'il existe encore une dispersion sensible, même parmi les derniers travaux expérimentaux et théoriques. Un jugement catégorique sur les travaux expérimentaux est très difficile à porter par manque d'informations sur des détails importants concernant le montage et les méthodes de mesure, dans une grande partie des publications. Notons simplement que nos résultats expérimentaux représentés par la relation:

$$Nu = 4,82 + 0,0185 Pe^{0,827}$$

sont en excellent accord avec les travaux [14], [15] et [23] et en bonne concordance (± 15 pour cent) avec les travaux [13] et [24] et la corrélation théorique [22].

D'autres travaux expérimentaux conduits avec une grande rigueur seraient encore nécessaires, en particulier pour les grandes valeurs de Pe ($Pe > 5 \cdot 10^3$), et tout spécialement dans le domaine des faibles valeurs de Pe ($Pe < 150$).

BIBLIOGRAPHIE

1. B. LUBARSKY et S. J. KAUFMAN, Review of experimental investigations of liquid-metal heat transfer. NACA Technical Note 3336, Washington (1955).
2. M. A. MIKHEEV, V. A. BAUM, K. D. VOSKRESSENSKY et O. S. FEDYNSKY, Le dégagement de chaleur par les métaux en fusion, *Actes de la Conférence Internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève 8-10 Août 1955*. Vol. IX, pp. 327-332. Nations Unies Genève (1956).
3. L. TREFETHEN, Measurement of mean fluid temperatures. *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* **78**, 1207-1212 (1956).
4. R. N. LYON, *Liquid Metals Handbook*, Sodium NaK supplement, pp. 38-103. AEC, Department of Navy (1952).
5. M. SITTING, *Sodium—Its Manufacture, Properties and Uses*. Reinhold, New York (1956).
6. C. J. MEISL, Thermodynamic properties of alkali-metal vapors and measuring. Flight Propulsion Laboratory Department, General Electric Company, Cincinnati, Ohio (1960).
7. E. L. DUNNING, The thermodynamic and transport properties of sodium and sodium vapor. ANL 6246. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois (1960).
8. *National Bureau of Standard Handbook*, 77. Vol. II, p. 341 (1961).
9. W. FRIEND et A. METZNER, Turbulent heat transfer inside tubes and the analogy among heat, mass and momentum transfer, *J. Amer. Inst. Chem. Engrs* **4**, 393-402 (1958).
10. M. A. MIKHEEV, Heat transfer in turbulent motion of liquids in tubes. *AEC TR 3760* (1959).
11. R. N. LYON, Forced convection heat transfer theory and experiments with liquid metals. *AECU* 419, *ORNL* 361 (1949).
12. R. H. NORRIS et D. D. STREID, *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* **62**, 525-533 (1940).
13. B. S. PETUCHOV et A. YA YUSHIN, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **136**, 1321 (1961).
14. V. I. SUBBOTIN, P. USHAKOV, G. GABRIANOVICH et B. TALONOFF, Heat transfer in a flow of liquid metals in circular tubes, *Inzh.-fiz. Zh.* **6**, 16-21 (1963).
15. V. I. SUBBOTIN, A. K. PAPVIANZ, P. L. KIRILLOV et N. K. IVANOVSKY, Etude de transfert de chaleur au sodium liquide dans des tubes, *Atomnaya Energiya* **13**, 380-382 (1962).
16. M. S. PIGOROV, Heat transfer to sodium at low Reynolds numbers, *Atomnaya Energiya* **8**, 367-368 (1960).
17. V. I. SUBBOTIN, M. K. IBRAGIMOV, M. N. IVANOVSKI, M. N. ARNOL'BOV et E. V. NOMOFILOV, Heat transfer from the turbulent flow of liquid metals in tubes, *Atomnaya Energiya* **11**, 133-139 (1961).
18. S. E. ISAKOFF, Thèse, Columbia University, New York (1952).
19. V. I. SUBBOTIN, M. K. IBRAGIMOV et E. V. NOMOFILOV, Emission de chaleur par une section thermiquement stable d'un tube parcouru par un courant de métaux liquides en régime turbulent, *Atomnaya Energiya* **13**, 155-162 (1962).
20. M. K. IBRAGIMOV, V. I. SUBBOTIN et P. USHAKOV, Investigation of heat transfer in the turbulent flow of liquid metals in tubes, *Atomnaya Energiya* **8**, 54-56 (1960).
21. O. E. DWYER, Eddy transport in liquid metal heat transfer, *J. Amer. Inst. Chem. Engrs* **9**, 261-268 (1963).

22. N. I. BULEEV, Theoretical model of the mechanism of turbulent exchange in fluid flow, *Heat transfer*. SSSR Academy of Sciences, Moscow (1962).
23. I. I. NOVIKOV, A. N. SOLOVYEV, E. M. KHABAKHPASHEVA, V. A. GRUSDEV, A. I. PRIDANTSEV et M. YA VASENINA, Heat transfer and thermophysical properties of molten alkali metals, *Atomnaya Energiya* 4, 92 (1956).
24. H. E. BROWN, B. H. AMSTEAD et B. E. SHORT, Temperature and velocity distribution and transfer of heat in a liquid metal, *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* 79, 279-285 (1957).
25. P. L. KIRILLOV, V. I. SUBBOTIN, M. YA. SUVOROV et M. F. TROYANOV, The investigation of heat transfer to a sodium-potassium alloy in a tube, *Sov. J. Atomic Energy* 6, 253-260 (1959).
26. E. M. KHABAKHPASHEVA et YU. M. IL'IN, Heat transfer to a melt of sodium and potassium in annular clearances, *Atomnaya Energiya* 9, 494-496 (1960).
27. E. H. BUYCO, Heat and momentum transfer in liquid metals. Thèse Purdue University (1961).
28. A. P. COLBURN, *Trans. Amer. Inst. Engng* 22, 522 (1933).
29. L. DUCHATELLE et L. VAUTREY, Détermination des coefficients de convection d'un alliage NaK en écoulement turbulent entre plaques parallèles, *Int. J. Heat Mass Transfer* 9, 1017-1031 (1964).

Abstract—Convection heat-transfer coefficients have been determined in a horizontal circular tube, by means of temperature measurements in the duct, with NaK (44% Na-56% K) in the steady state, both hydrodynamically and thermally, at a constant heat flux ($q/A_{\max} = 16 \text{ W/cm}^2$), at Reynolds numbers between 3.6×10^3 and 9.05×10^5 and Péclet numbers between 58 and 1.31×10^4 . The Prandtl number was essentially constant around a mean value of 0.0153. The concentration of oxygen was of the order of 6 ppm. The experimental results are in good agreement with some previously published data and are well correlated by the relation

$$Nu = 4.82 + 0.0185 Pe^{0.827}$$

To verify that the experimental equipment was functioning properly, trial runs were first made with water.

Zusammenfassung—Bei konstanter Wärmestromdichte ($q/A_{\max} = 16 \text{ W/cm}^2$), bei Reynoldszahlen zwischen $3,6 \cdot 10^3$ und $9,05 \cdot 10^5$ und Pecletzahlen zwischen 58 und $1,31 \cdot 10^4$ (besonders weiter Bereich) wurden mit Hilfe von Temperaturmessungen in der Wand die Wärmeübergangszahlen in einem horizontalen Kreisrohr mit NaK (44% Na-56% K) für stationären Zustand bei hydrodynamisch und thermisch ausgebildeter Strömung bestimmt. Die Prandtzahl bleibt im wesentlichen konstant um einen Mittelwert von $1,53 \cdot 10^{-2}$. Der Sauerstoffanteil war in der Größenordnung von 6 ppm. Die Versuchsergebnisse stimmen gut mit einigen früher veröffentlichten Werten überein und werden durch die Beziehung

$$Nu = 4,82 + 0,0185 Pe^{0,827}$$

ausgedrückt.

Um das gute Funktionieren der Messapparatur zu überprüfen wurden vorher Testversuche mit Wasser gemacht.

Аннотация—Определены коэффициенты конвективного теплообмена в горизонтальной трубе круглого сечения по данным замеров температур NaK (44% Na-56% K) в канале в гидродинамически и термически установившемся состоянии при постоянном тепловом потоке ($q/A_{\max} = 16 \text{ W/cm}^2$) в диапазоне чисел Рейнольдса от $3,6 \cdot 10^3$ до $9,5 \cdot 10^5$ и чисел Пекле от 58 до $1,31 \cdot 10^4$. Число Прандтля в основном было постоянно и в среднем составляло 0,0153. Концентрация кислорода составляла 6%. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными данными и удачно описываются соотношением:

$$Nu = 4,82 + 0,0185 Pe^{0,827}$$

Для того, чтобы убедиться в нормальной работе экспериментальной установки, сначала были проведены пробные эксперименты с водой.