

CEA-R 2469 - PELCE Jacques, FRANCOIS Serge, HOUSEAUX Oscar,
PIERRE Bernard

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT DE CHALEUR ET DES PERTES
DE CHARGES DES GAINES A AILETTES HELICOIDALES EN CHEVRON.

Sommaire.- Les gaines à ailettes en chevron sont utilisées pour le refroidissement de l'uranium dans certains réacteurs nucléaires. Par chevron, on entend une disposition alternée des ailettes ayant un plan de symétrie parallèle à la direction générale de l'écoulement fluide. Les principaux paramètres géométriques sont alors : le nombre des ailettes, le nombre de chevrons, l'angle d'inclinaison des ailettes par rapport à l'axe de la gaine, les dimensions des ailettes, le diamètre de la gaine et le diamètre du canal.

L'étude est essentiellement expérimentale. Les essais sont de trois types : essais en vraie grandeur, dans des conditions proches de celles existant dans le réacteur (flux constant, CO_2 sous pression) ; essais en vraie grandeur mais à température de paroi constante, d'une mise en oeuvre beaucoup plus simple, et destinés à une discrimination rapide entre les différents types de gaine ; essais à grande échelle avec de l'air à la

./.

CEA-R 2469 - PELCE Jacques, FRANCOIS Serge, HOUSEAUX Oscar,
PIERRE Bernard

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER AND PRESSURES DROPS FOR
CANS WITH SPIRAL HERRING-BONE FINNS.

Summary.- Cans fitted with herring-bone fins are used for cooling uranium in certain nuclear reactor. By herring-bone is meant a staggered arrangement of the fins which have a plane of symmetry parallel to the general direction of liquid flow. The main geometrical parameter are then : the number of fins, the number of herring-bones, the angle of inclination of the fins with respect to the can axis, the dimensions of the fins, the can diameter and the channel diameter.

The research is essentially experimental. The test are of three types : full size tests, in conditions approaching those in the reactor (constant flux, CO_2 under pressure) ; full size tests but with a constant wall temperature, much casier to set up, and intended to distinguish rapidly between the merits of the various types of can ; large-scale tests with air at atmospheric pressure for studying the phenomena in more detail.

For each can tried out there is a corresponding pressure drop coefficient, a mean thermal exchange coefficient \bar{M}_0 and a minimum exchange coefficient $M_{0 \text{ min}}$, and M_0 are related by the expression $M_{0 \text{ min}} = M_0 \times f_c \times f$, where f_c and f , are respectively circumferential and longitudinal singularity factor

./.

pression atmosphérique pour une observation des phénomènes dans le détail.

Pour chacune des gaines expérimentées correspond un coefficient de pertes de charge, un coefficient d'échange thermique moyen \overline{Mo} et un coefficient d'échange minimum \overline{Mo}_{\min} servant au calcul du point le plus chaud de la gaine ; \overline{Mo}_{\min} et \overline{Mo} sont reliés par l'expression $\overline{Mo}_{\min} = \overline{Mo} \times f_c \times f_l$, où f_c et f_l sont respectivement des facteurs de singularités circonférentielle et longitudinale, déterminés après un examen statistique de l'ensemble des températures mesurées sur chaque gaine.

Les résultats sont rassemblés sur une trentaine de tableaux et figures, les résultats les plus marquants étant résumés dans la conclusion.

1964

p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

determined from a statistical study of all the temperatures measured for each can.

The results are presented in about thirty tables and figures the most noteworthy results being summarized in the conclusion.

1964

p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

**ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT
DE CHALEUR ET DES PERTES DE CHARGES
DES GAINES A AILETTES HELICOIDALES
EN CHEVRON**

par

Jacques PELCÉ¹ Serge FRANÇOIS

Oscar HOUSEAUX Bernard PIERRE

Rapport C E A - R 2469

1964

Ja*

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

- RAPPORT C. E. A. n° 2469 -

Service des Etudes Métallurgiques et Thermiques

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT DE CHALEUR
ET DES PERTES DE CHARGES DES GAINES A AILETTES
HELICOIDALES EN CHEVRON

par

Jacques PELCÉ - Serge FRANÇOIS - Oscar HOUSEAUX

Bernard SERGE

- Août 1964 -

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

CHAPITRE I - DISPOSITIONS EXPERIMENTALES

I - Essais avec gaz sous pression et flux de chaleur constant (p. 4)

1 - Description

a) - Dispositions générales

b) - Dispositions particulières aux présents essais.

2 - Conditions de l'essai.

II - Essais à grande échelle avec air atmosphérique et flux de chaleur constant (p. 10)

1 - Caractères particuliers à ce type de cellule.

2 - Description.

III - Essais à l'échelle 1 avec température de paroi constante (p. 13)

1 - Caractères particuliers à ce type de cellule.

2 - Description.

CHAPITRE II - DEFINITION DES GRANDEURS SANS DIMENSIONS UTILISEES (p. 17)

CHAPITRE III - CARACTERES PROPRES AUX ECOULEMENTS EN CHEVRON -
CHOIX d'UN MODE d'ETUDE.

- I - Caractères propres aux éléments en chevron (p.21)
 - 1 - Répartition circonférentielle des températures
 - 2 - Répartition longitudinale des températures
 - 3 - Coefficient de perte de charge en fonction du débit.
 - 4 - Nombre de Margoulis moyen en fonction du débit.

- II - Notion de singularité dans la distribution des coefficients d'échange thermique. (p. 26)
 - 1 - notion de valeur moyenne
 - 2 - Singularités circonférentielle et longitudinale.

- III - Méthode pratique adoptée dans la définition des valeurs moyennes et des facteurs de singularité (p.32)
 - 1 - Existence de dissymétries dans les phénomènes observés.
 - 2 - Définitions
 - a) valeurs moyennes
 - b) facteurs de singularités.
 - 3 - Définition d'un nombre de Margoulis global dans les essais "isothermes".

CHAPITRE IV - PRECISION DES MESURES

- I - Essais préliminaires (p.40)
 - 1 - Les cellules d'essais
 - 2 - Dispositifs de mesure
 - a) - les thermocouples
 - b) - le contact thermique entre barreau chauffant et gaine.

3 - Conditions expérimentales

- a) - Conduction circonférentielle
- b) - Conduite des essais
- c) - Mesure des pertes de charge.

II - Précision des mesures (p. 44)

- 1 - Précision sur $\overline{\mathcal{M}}_0$
- 2 - Précision sur f_0 .

CHAPITRE V - RESULTATS EXPERIMENTAUX.

I - Valeurs moyennes (p.47)

- 1 - Flux de chaleur constant - Essais à grande échelle.
 - a) - Influence du diamètre du canal,
 - b) - Remarque sur les définitions de f_0 et de \mathcal{M}_0 .
 - c) - Diagramme $\left[\overline{\mathcal{M}}_0 - f_0 \right]$
- 2 - Flux de chaleur constant - Essais à l'échelle 1.
- 3 - Essais isothermes.
- 4 - Conclusions communes aux résultats des essais sur les trois types de cellule.
 - a) - Essais à flux constant : échelle 2,5 et échelle 1.
 - b) - Essais à flux constant et essais "isothermes".

II - Singularités thermiques (p. 73)

- 1 - Singularités circonférentielles
 - a) - Variation de f_c en fonction du débit.
 - b) - Valeur de f_c attachée à chaque type de gaine.

2 - Singularités longitudinales

a) - f_1 indépendant du débit.

b) - Valeur de f_1 attachée à chaque type de gaine.

3 - Facteur de dissymétrie.

CONCLUSION - (p. 89)

NOMENCLATURE

- N : nombre d'ailettes.
- n : Nombre de secteurs.
- S : Pas de l'hélice.
- α_m : Angle d'inclinaison des ailettes par rapport à l'axe de la gaine à mi-hauteur d'ailette.
- α_b : Angle d'inclinaison des ailettes à leur base par rapport à l'axe de la gaine.
- l : Hauteur d'ailette.
- e_p : Épaisseur d'une ailette à la pointe mesurée perpendiculairement au sous-canal.
- e_b : Épaisseur d'une ailette à la base mesurée perpendiculairement au sous-canal.
- e_m : Distance entre les axes de 2 ailettes consécutives à mi-hauteur.
- s' : Section droite d'un sous-canal.
- D_l : Diamètre en base d'ailette
- D_o : Diamètre du contour intérieur de gaine (ou barreau d'uranium).
- D_c : Diamètre du canal.
- s : section droite de passage du fluide.
- λ_g : Coefficient de conductibilité de la gaine
- q : Débit-masse du fluide.
- V : Vitesse moyenne débitante du fluide à travers une section droite s entre la gaine et le canal.
- $\overline{p_d}$: Pression dynamique moyenne du fluide.
- \overline{p} : Pression moyenne du gaz.
- $\frac{\Delta p}{L}$: Chute de pression statique le long du canal par unité de longueur.
- t_o : température de la gaine en un point de son contour intérieur
- θ : Température moyenne de mélange dans la section droite où est mesurée t_o .
- $\frac{\phi}{L}$: Flux de chaleur dissipé par unité de longueur du barreau chauffant.

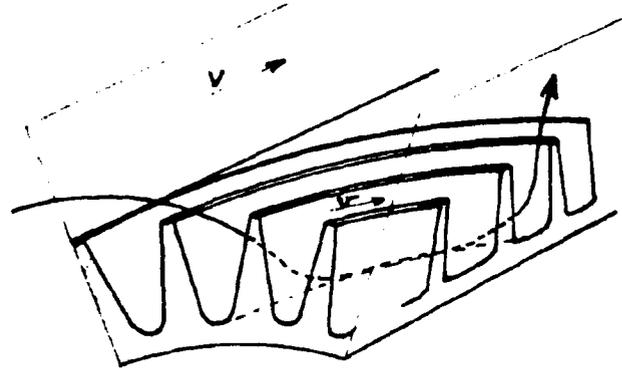
- Re_0 : Nombre de Reynolds défini à partir du contour intérieur de la gaine D_0 .
- f_0 : Coefficient de perte de charge défini à partir du contour intérieur de la gaine D_0 .
- h_0 : Coefficient d'échange local défini à partir du contour intérieur de la gaine D_0 .
- \mathcal{M}_0 : Nombre de Margoulis local défini à partir du contour intérieur de la gaine D_0 .
- $\overline{\mathcal{M}}_{0,G}$: Moyenne arithmétique, pour chaque gaine, des valeurs de \mathcal{M}_0 en des points équidistants le long de la génératrice médiane G de mesure.
- \mathcal{M}_0 : Moyenne arithmétique pour l'ensemble des gaines, des valeurs de $\overline{\mathcal{M}}_{0,G}$, dans les essais à "flux constant", ainsi que valeur globale obtenue dans les essais "isothermes".
- f_c : Facteur de singularité circonférentielle.
- f_l : Facteur de singularité longitudinale.
- f_d : Facteur de dissymétrie.

GAINES A AISETTES HELICOIDALES EN CHEVRONS

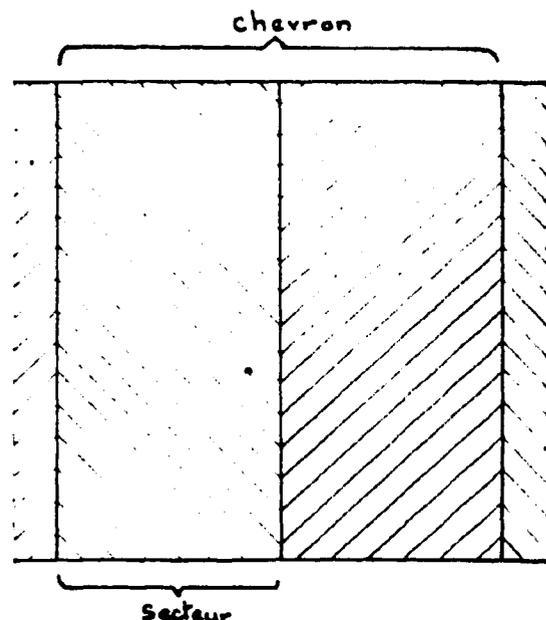
INTRODUCTION.

Le refroidissement des barreaux d'uranium dans les réacteurs nucléaires de puissance modérés au graphite et refroidis par circulation de gaz carbonique sous pression a pu être obtenu en utilisant des gaines qui, au début, étaient munies d'ailettes longitudinales, puis par la suite, munies d'ailettes transversales. Une amélioration très nette de la qualité des échanges thermiques peut être obtenue en utilisant une disposition des ailettes en hélice en limitant l'écoulement du gaz entre les ailettes par des cloisons longitudinales.

On crée ainsi un écoulement par zones (figure ci-contre). Le phénomène est alors le suivant : une partie du fluide pénètre dans les sous-canaux compris entre les ailettes et retourne ensuite dans l'écoulement principal. On peut concevoir alors deux dispositions possibles : ou bien cette délimitation par zone est obtenue au moyen de cloisons



solides allant de la base des ailettes à la paroi du canal, ou bien on réalise une disposition alternée des ailettes de façon à obtenir des secteurs symétriques deux à deux (figure ci-contre), l'ensemble des deux secteurs formant un chevron; dans ce cas, la délimitation des zones se trouve naturellement réalisée par les plans de symétrie de l'écoulement.



Les paramètres géométriques entrant dans l'étude de ce type de gaine sont : le nombre (N) des ailettes, le nombre (n) de secteurs, l'angle α d'inclinaison des ailettes par rapport à l'axe de la gaine, la forme, l'épaisseur et la hauteur (l) des ailettes, la

jonction des ailettes au niveau des plans de symétrie de la gaine, le diamètre en base d'ailette et le diamètre du canal.

Cette étude s'est essentiellement appuyée sur des résultats d'expériences. Le calcul peut parfois intervenir mais chaque fois son interprétation reste d'ordre qualitatif, la complexité des phénomènes étant telle qu'on est obligé de raisonner à partir d'hypothèses simplifiées ou schématiques. Nous n'en retiendrons que les aspects susceptibles d'éclairer le commentaire des résultats expérimentaux.

L'étude expérimentale de ce type de gaine a été abordée par des voies différentes nécessitant chaque fois une méthode appropriée. Outre des essais dans des conditions expérimentales aussi voisines que possible de celles existant dans le réacteur, il est apparu utile, entre autres moyens d'étude, d'une part de procéder à des essais à grande échelle dans le but d'analyser dans le détail les phénomènes, d'autre part de procéder à des essais à température de paroi constante qui, en utilisant la circulation interne d'un fluide pour chauffer la gaine et en supprimant les thermocouples en paroi, permettent une comparaison rapide et aisée des performances globales d'un grand nombre de gaines.

Nous ne présenterons que des résultats relatifs à des configurations idéales. En particulier, nous ne donnerons aucun résultat d'essais concernant l'étude des différents types de dispositions pouvant exister réellement dans le réacteur (décalage angulaire des cartouches entre elles, interruption variable entre deux cartouches consécutives, excentrement des cartouches par rapport au canal, etc...).

Après avoir décrit dans un premier chapitre les dispositions expérimentales utilisées, nous donnerons les définitions des principales grandeurs utilisées : nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement fluide, coefficient de perte de charge, et nombre de Margoulis caractérisant les échanges thermiques entre la gaine et le gaz. Dans un troisième chapitre, seront présentés les caractères propres aux écoulements en chevron, ainsi que la méthode utilisée pour en aborder l'étude.

La précision des mesures est traitée dans un quatrième chapitre.
Enfin, dans un cinquième chapitre, sera présenté l'ensemble des résultats expérimentaux.

DISPOSITIONS EXPERIMENTALES1 - ESSAIS AVEC GAZ SOUS PRESSION ET FLUX DE CHALEUR CONSTANT.1 - Descriptiona) - Dispositions générales.

La gaine est disposée dans un canal vertical. La géométrie de la gaine est interrompue tous les 60 cm. de façon à simuler en partie les dispositions en train de cartouches existant dans le réacteur (schéma (a) sur la figure 1). Sur ce seul point il y aura simulation d'une configuration existant réellement dans le réacteur. Pour le reste, la géométrie est supposée idéale: en particulier, dans tous les cas considérés les plans de symétries des gaines seront alignés. Dans la plupart des cas ont été disposées trois ou quatre longueurs de cartouches. Etant donné que dans tous les essais la gaine était interrompue, nous utiliserons par la suite le terme de "gaine" pour caractériser chaque élément de 60 cm. expérimenté.

Le chauffage des gaines est constant sur toute la longueur. Il est assuré par dissipation de courant électrique continu au sein de barreaux en acier inoxydable de 60 cm. de long également, isolés électriquement de la gaine au moyen de zircone projetée (environ 4/10^e d'épaisseur), le barreau étant ensuite recouvert d'argent

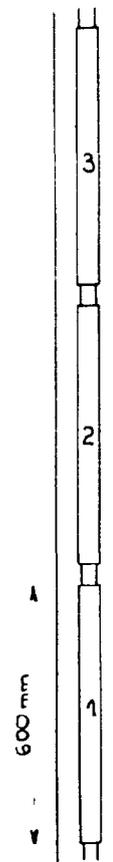


Fig.1

rectifié (environ 1 mm. d'épaisseur), de façon à obtenir un état de surface convenable. Le contour intérieur des gaines est donc en contact avec l'argent. Le jeu au montage est calculé de telle manière que les dilatations différentes de l'acier inoxydable et du métal de gaine réalisent au moment de l'essai un serrage suffisant du barreau chauffant sur la gaine. Le métal de la gaine a été tantôt du magnésium-zirconium, tantôt un alliage d'aluminium (A U 4 G ou A G 5).

La mesure des températures de gaine est réalisée au moyen de thermocouples, soit en chromel-constantan, soit en chromel-alumel, introduits dans l'épaisseur de la gaine suivant une génératrice de celle-ci. Cette disposition nécessite de découper la gaine en tronçons, le montage du thermocouple s'effectuant alors comme indiqué sur le schéma (b) figure 1. La soudure, isolée électriquement, est enfoncée sur une certaine profondeur; le fil court ensuite sur une partie de la circonférence et sort à la hauteur d'un plan de symétrie de la gaine. Les buts recherchés en utilisant cette méthode de mesure sont d'éviter la présence des fils dans l'écoulement au voisinage du point de mesure et de permettre aux fils du thermocouple, surtout au voisinage de la soudure, de parcourir un trajet sensiblement isotherme.

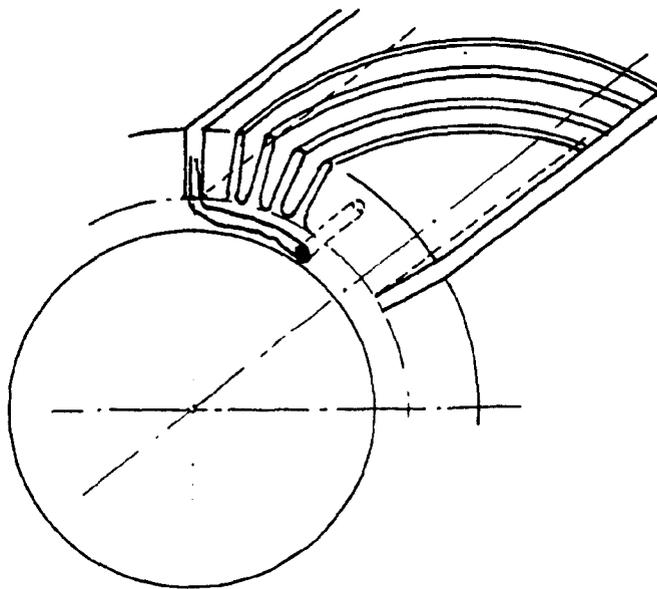


Fig. 1 b

La mesure des pertes de charge s'effectue à l'aide de prises de pression statique de paroi disposées sur une même génératrice le long du canal.

Le débit du gaz est mesuré à l'aide de tuyères normalisées (ASME-LRPO).

b) - Dispositions particulières aux présents essais.

Les gaines expérimentées peuvent être classées en deux séries : gaines dites "épaisses" et gaines dites "minces". Ces gaines ont même diamètre en base d'ailettes (43,6 mm). Mais les unes ont un diamètre intérieur de 29 mm, alors que celui des autres est de 40 mm. Les barreaux chauffants sont de même conception. Pour les gaines épaisses, les fils de thermocouples sont en chromel-constantan, la soudure a 2 mm. de diamètre et est enfoncée de 5 cm. sur un diamètre de 39 mm. (schéma (c) figure 1); le point de mesure est donc à 2,3 mm du contour en base d'ailette. Dans les gaines minces, on utilise du "thermocoax" constitué par 2 fils de chromel et alumel isolés dans un tube de 5/10^e de mm. de diamètre extérieur; la tête du thermocouple, protégée par un capuchon de 7/10^e de mm, est enfoncée de 7 mm. sur un diamètre de 41,8 mm; le point de mesure est donc à 9/10^e de mm. en dessous du contour en base d'ailette et à 9/10^e de mm. également du contour intérieur de la gaine (schéma (d) figure 1).

Dans le cas des gaines épaisses sont représentées quatre longueurs de gaines et dans celui des gaines minces trois longueurs. L'interruption entre deux gaines consécutives est de 3 cm; cette partie est occupée par un bouchon cylindrique

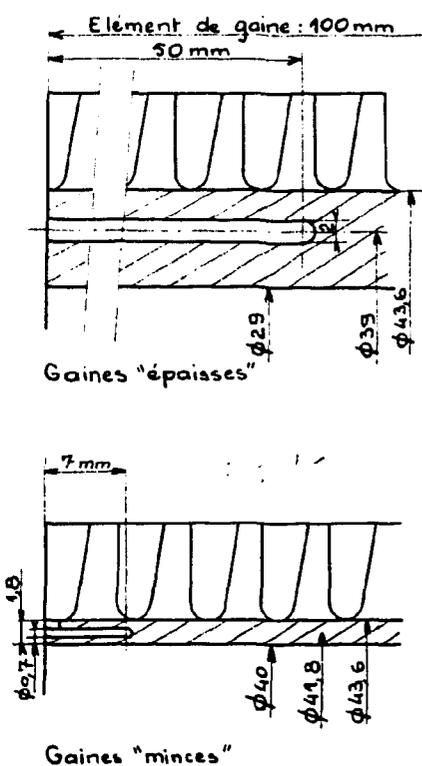


figure 1 c. et d.

de raccordement en cuivre entre deux barreaux chauffants consécutifs, dont le diamètre extérieur est égal à 43 mm. Il n'y a pas de dissipation du flux de chaleur sur cette longueur de 3 cm.

Les gaines sont symétriques: même rainure de 2,5 mm de large au droit des plans de symétries de la gaine.

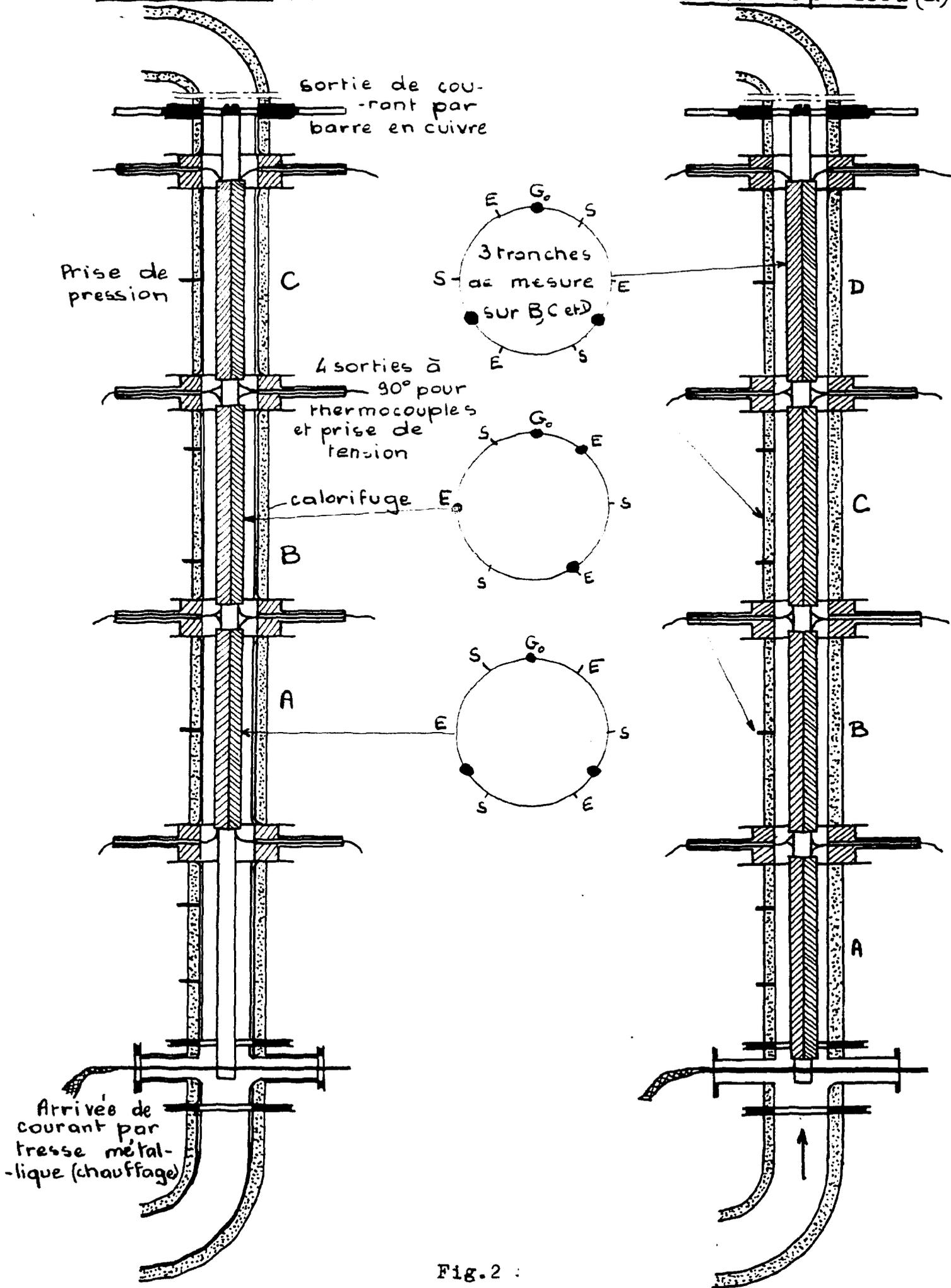
La répartition des points de mesure présente pour les deux types de gaine sensiblement les mêmes caractères. Nous donnons sur la figure 2 un exemple de chacune des deux répartitions. Une série de thermocouples est disposée sur une génératrice médiane (à mi-distance entre deux plans de symétrie de la gaine). Ils sont équidistants, au nombre de 6 par gaine, placés tous les 10 cm. (sur les 4 gaines épaisses et sur l'une des 3 gaines minces). Différentes sections droites (3 sur les gaines épaisses et une sur une gaine mince) sont équipées de thermocouples placés sur d'autres génératrices médianes (2 autres à 120° pour des gaines ayant 6 secteurs et 3 autres à 90° pour des gaines ayant 8 secteurs). Les gaines épaisses ne disposent pas de point de mesure au droit des plans de symétrie. Par contre, les gaines minces possèdent une section droite de mesure dans laquelle, outre un thermocouple sur une génératrice médiane, sont disposés des thermocouples au droit des plans de symétrie de la gaine conformément au schéma (b), figure 2.

La présence des barres d'arrivée de courant électrique et des fils de thermocouples dans l'écoulement gazeux perturbe la mesure des pertes de charge. Pour cette raison, les mêmes gaines (mais seulement les gaines "minces") ont été expérimentées également sans thermocouples et sans barre d'arrivée de courant.

Il est possible dans la cellule comportant des gaines minces de faire circuler le gaz dans l'un ou l'autre sens. Les gaines étant rigoureusement symétriques, cela revient, en adoptant l'un ou l'autre sens de circulation du gaz, à disposer en somme

Gaines minces (b)

Gaines épaisses (a)



de deux distributions différentes de points de mesure.

2 - Conditions de l'essai.

La plupart des essais ont été effectués avec du gaz carbonique sous 25 Hpz. Certains essais ont été effectués en faisant varier la pression de façon à obtenir une plage de débits plus élevée. En principe, une variation de la pression doit être sans effet sur les performances de la gaine, ce qui a été pratiquement vérifié; nous verrons cependant plus loin ce qu'il faut en toute rigueur en penser.

Le flux de chaleur dissipé a atteint 600 Kw/m² à travers le contour intérieur de la gaine. Tous les essais ont été effectués en maintenant le niveau de température de la gaine sensiblement constant (environ 150° C.) de telle sorte que seul le flux variait en fonction du débit du gaz. L'écart entre température de gaine et température du gaz était de l'ordre de 80° C.

Les conditions d'essais en laboratoire diffèrent de celles existant dans le réacteur essentiellement sur les deux points suivants. La température d'entrée du gaz est nettement plus basse que dans le réacteur: 50° C. au lieu de 200 - 300° C. Le flux de chaleur est constant tout le long de la cellule, alors que dans le réacteur, il varie tout le long du canal. De plus, les conditions de conduction circonférentielles ne sont pas en toute rigueur respectées. Pour ces raisons, il est possible que dans une transposition à un calcul de canal de pile, les valeurs du coefficient d'échange thermique obtenues dans les essais en laboratoire diffèrent quelque peu (très peu estimons-nous) de celles existant dans le réacteur.

II - ESSAIS A GRANDE ECHELLE AVEC AIR ATMOSPHERIQUE ET FLUX DE CHALEUR CONSTANT.

1 - Caractères particuliers à ce type de cellule.

Les cellules à grande échelle ont été conçues au départ comme devant constituer un outil de travail complet. En effet, si l'on prend garde de respecter les lois de similitude, il n'y a pas de raison que les valeurs obtenues du coefficient de perte de charge et du nombre de Margoullis caractérisant les échanges thermiques, ne soient pas pratiquement égales à celles existant dans le réacteur. Pour cela, il est nécessaire de réaliser les mêmes valeurs du nombre de Reynolds, ce qui est possible en utilisant l'air atmosphérique comme fluide de refroidissement dans une cellule à grande échelle (échelle 2,5 par exemple).

Une telle cellule présente les avantages suivants : il est commode de placer un grand nombre de thermocouples dans la paroi de la gaine, et les mesures de vitesse et de température sont très facilitées dans un fluide circulant à la pression atmosphérique. Par contre, elles présentent l'inconvénient d'être très coûteuses, ce qui a limité leur nombre : ont été expérimentés 3 types de gaines en train de 2 ou 3 cartouches maximum.

Dans ces conditions, nous avons porté notre effort, moins sur le nombre des types de gaines essayés, que sur une analyse détaillée des phénomènes pour quelques uns d'entre eux. Il s'ensuit que les résultats obtenus sur ce type de cellule apportent des informations susceptibles d'interpréter bon nombre des résultats obtenus sur l'ensemble des autres gaines de même type expérimentées dans les autres cellules.

2 - Description.

La cellule est disposée verticalement (échelle 2,5).
L'air à la pression atmosphérique circule de haut en bas (schéma (a))

Schéma (a)

Cellule grande échelle (éch. 2,5)
Air à la pression atmosphérique

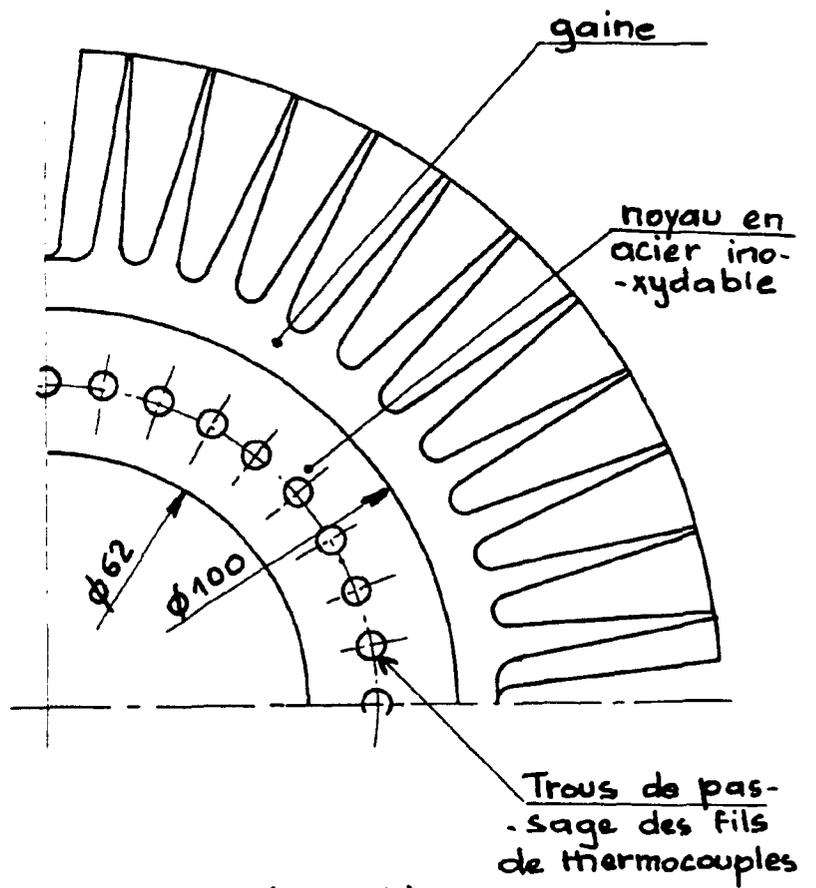
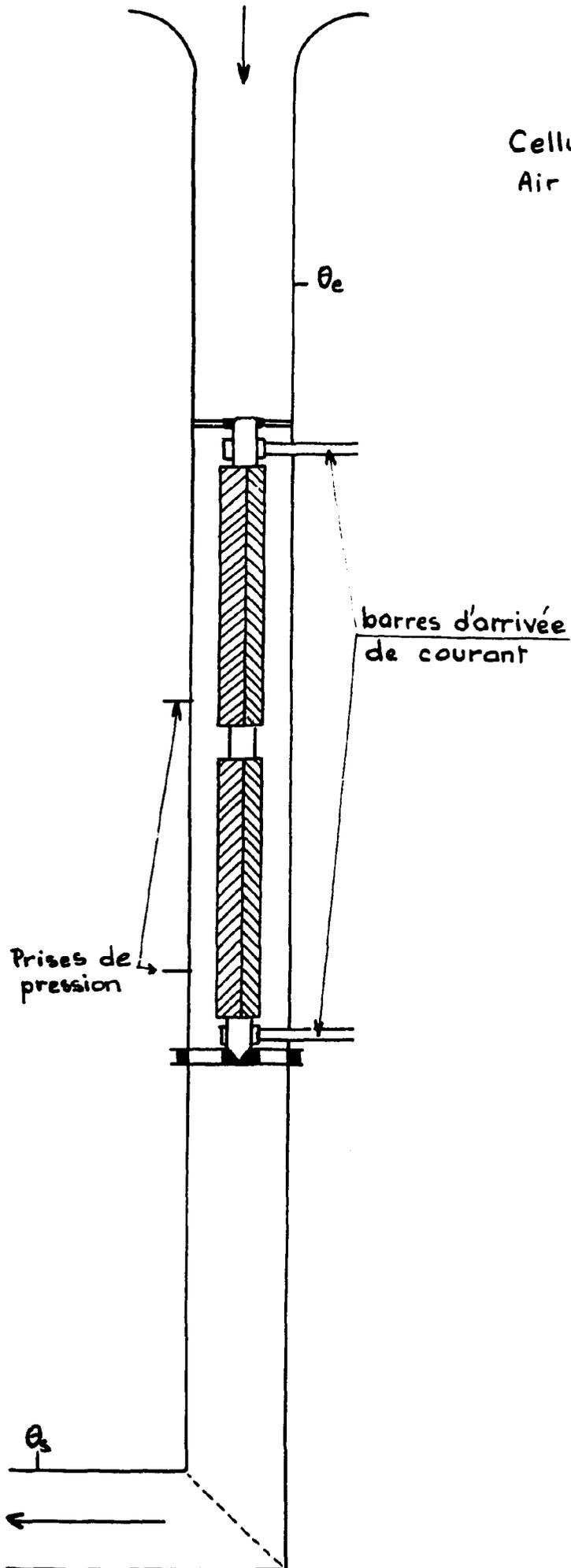


Schéma (b)
Section droite

Fig.3

figure 3). Le flux de chaleur est constant sur toute la longueur des gaines.

Trois profils de gaine ont été expérimentés. Ils ont les caractéristiques géométriques communes suivantes: 48 ailettes, angle d'inclinaison à la base des ailettes $\alpha_b = 19^\circ$

Seuls varient le nombre de secteurs (4, 6 et 8 secteurs) et la hauteur des ailettes (10,2, 7,5 et 6 mm). La variation de la hauteur des ailettes est obtenue par usinages successifs sur la même gaine.

La cellule comprend soit 2 gaines (pour le "4" et le "8 secteurs") soit 3 gaines (pour le "6 secteurs"). Chaque gaine a 1,44 m. de long. L'écartement des gaines entre elles est de 37 mm.

Chaque gaine est feuilletée en éléments de façon à pouvoir placer les thermocouples suivant le même principe que celui décrit pour les essais à l'échelle 1. Les barres de chauffage sont de même conception que celles des essais à l'échelle 1.

Entre la barre de chauffage ($\phi = 62$ mm) et le contour intérieur de la gaine ($\phi = 100$ mm) se trouve un noyau en acier inoxydable (schéma (b) figure 3). Ce noyau est destiné à simuler aussi convenablement que possible les phénomènes de conduction circonférentielle tels qu'ils doivent exister dans la réalité dans l'ensemble barreau uranium-gaine.

Les trous indiqués sur le schéma (b) figure 3 servent au passage des fils de thermocouples le long de chaque cartouche. De cette façon, il ne sort aucun fil de thermocouples dans l'écoulement sinon à l'extrémité des cartouches où tous les fils sont rassemblés.

Les thermocouples sont du type chromel-constantan. La soudure isolée électriquement, est disposée dans un fourreau; l'ensemble constitue la prise de mesure dont le diamètre extérieur est de 2,5 mm. Le point de mesure est à 3 mm. en dessous du contour en base d'ailette.

Nous ne donnerons pas une description détaillée du plan d'implantation des thermocouples. La position des points de mesure apparaîtra sur les figures donnant les résultats d'essais.

D'une manière générale, les thermocouples sont disposés, les uns suivant une même génératrice médiane, les autres suivant quelques sections droites. Sur la génératrice médiane certaines gaines ont jusqu'à 20 thermocouples tous les 9 cm. Une gaine a été équipée de 45 thermocouples répartis également sur 3 génératrices médianes. Les sections droites ont été équipées suivant des principes différents: les unes possèdent soit 7 soit 11 thermocouples (nombre impair) répartis régulièrement sur la circonférence, d'autres ne possèdent des thermocouples qu'au droit des plans de symétrie de la gaine. Les sections avec nombre impair de thermocouples sont destinées à calculer des moyennes du coefficient d'échange dans la section droite.

Les pertes de charge sont mesurées à l'aide de prises de pression statique en paroi disposées sur une même génératrice le long du canal.

Le débit d'air est mesuré à l'aide de tuyères à col sonique. On change la tuyères pour chaque débit. En général, au cours des essais, 5 valeurs ont été données au débit.

III - ESSAIS AVEC GAZ SOUS PRESSION ET TEMPERATURE DE PAROI CONSTANTE.

1 - Caractères particuliers à ce type de cellule.

La méthode expérimentale utilisée consiste à chauffer

les gaines, non par dissipation d'énergie électrique, mais par circulation d'eau chaude, ce qui permet une mise en oeuvre expérimentale beaucoup plus simple. L'eau en circulation, du fait de sa très grande capacité calorifique comparée à celle du gaz de refroidissement, impose une température presque uniforme sur la surface interne de la gaine, ce qui permet de définir un coefficient d'échange thermique global pour l'ensemble de la gaine (définition donnée plus loin). La seconde simplification expérimentale qui résulte de cette constatation (température quasi uniforme et connue tout le long de la gaine) est qu'il est alors inutile de disposer des thermocouples sur la paroi intérieure de la gaine.

Dans ces conditions, il est possible d'expérimenter un grand nombre de configurations dans des délais relativement rapides. Mais en utilisant une telle méthode, il n'est cependant pas possible d'obtenir la totalité des renseignements utiles: les valeurs obtenues ne sont que globales et de plus, elles ne peuvent être utilisées qu'après avoir effectué certains recalages (comme nous le verrons plus loin).

Tous les essais ont été effectués avec des gaines à l'échelle 1, (éventuellement utilisables ensuite pour des essais à flux constant).

Les premiers essais ont été faits avec de l'air à la pression atmosphérique sur une cellule horizontale. Le nombre de Reynolds du fluide était faible : $Re_0 = 120.000$ (le $\frac{1}{6}$ environ de la valeur en pile). Les autres essais ont été faits avec du gaz carbonique sous pression pour pouvoir augmenter le nombre de Reynolds. Nous ne décrivons que la cellule sous pression, le système de chauffage des gaines par circulation d'eau chaude étant le même dans les deux cas.

2 - Description

La cellule des essais sous pression est du même type

que celle utilisée dans les essais à flux constant. L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur la figure 4. La cellule est verticale, les gaines sont à l'échelle 1 (diamètre en base d'ailette 45,6 mm. diamètre intérieur 40 mm). La cellule comprend 3 gaines de 60 cm. chacune, mises bout à bout, de façon à réaliser une géométrie continue (sans interruption) sur 1,80 m. de long.

La température de l'eau, mesurée à l'entrée et à la sortie de la cellule, est maintenue au voisinage de 100° C. La température du gaz est mesurée directement à l'entrée et après un mélangeur à la sortie de la cellule (figure 4). Les tubes d'arrivée d'eau et le canal extérieur sont soigneusement calorifugés.

La mesure des pertes de charge est obtenue à l'aide de 5 prises de pression statique en paroi du canal placées comme l'indique la figure 4.

La précision des expériences sera étudiée dans un chapitre que nous préférons placer plus loin quand, en particulier, auront été définies les grandeurs utilisées et présentés quelques premiers résultats.

Chapitre II

DEFINITION DES GRANDEURS SANS DIMENSIONS UTILISEES.

Etant donné les très petites dimensions des ailettes de refroidissement et aussi la complexité des phénomènes aérodynamiques entourant ces ailettes, il n'est pas possible d'aborder d'emblée les problèmes à l'échelle des phénomènes physiques eux-mêmes. On est contraint, tout au moins dans un premier stade, à procéder par mesures globales et à définir les grandeurs significatives en conséquence. Nous ferons en sorte que ces grandeurs soient sans dimensions (nombre de Reynolds, coefficient de pertes de charge et nombre de Margoulis), de façon à leur conférer une valeur plus générale, ce qui, en particulier, est important quand on est amené à utiliser les lois de similitudes.

Nous donnons ci-dessous les définitions adoptées, que nous commenterons ensuite :

$$Re_o = \frac{\rho V D_o}{\mu}$$

$$f_o = \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{s}{\pi D_o} \cdot \frac{1}{pd} = \frac{2s}{\pi D_o L} \left(\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta \theta}{\bar{\theta}} \right)$$

$$M_o = \frac{h_o}{\rho V c_p} \quad \text{avec} \quad h_o = \frac{\phi}{L \times \pi D_o \times (t_o - \theta)}$$

dans lesquelles D_0 est le diamètre du contour intérieur de gaine * (ou du barreau d'uranium), V la vitesse moyenne débitante du fluide à travers une section droite s entre la gaine et le canal, $\frac{\Delta p}{L}$ la chute de pression statique le long du canal, $p_d = \frac{1}{2} \rho v^2$ la pression dynamique moyenne du fluide, \bar{p} la pression moyenne du gaz, $\frac{\Delta \theta}{\bar{\theta}}$ le rapport de l'échauffement $\Delta \theta$ du gaz sur la longueur L à la température moyenne $\bar{\theta}$ du gaz sur cette même longueur, ϕ la puissance dissipée sur la longueur L de la gaine, t_0 la température de la gaine en un point de son contour intérieur, θ la température moyenne de mélange dans la section droite où est mesurée t_0 .

- 1 - De façon à ce que la vitesse V soit aussi représentative que possible du mouvement du fluide, c'est-à-dire égale à la vitesse moyenne débitante réelle, la section de passage s adoptée doit comprendre non seulement la section droite de l'espace annulaire (espace compris entre les extrémités d'ailettes et la paroi du canal) mais également la section de passage du fluide dans les sous-canaux (espace compris entre les ailettes). Plus précisément, compte-tenu de ce qu'il est apparu que la vitesse moyenne du fluide entre les ailettes était sensiblement égale à celle de l'écoulement principal, la valeur adoptée pour la section de passage du fluide dans les sous-canaux a été prise égale à $N s'$ (N étant le nombre d'ailettes, s' la section droite d'un sous-canal).
- 2 - Faute de connaître avec suffisamment de rigueur les phénomènes physiques au voisinage des ailettes, (conditions aérodynamiques de

(*) L'indice (0) caractérise tous les paramètres définis à partir du contour intérieur de gaine.

l'écoulement à l'entrée et à la sortie des sous-canaux, et entre les ailettes), il n'est pas possible d'adopter des définitions du coefficient de perte de charge et du nombre de Margoulis qui soient liées à la géométrie extérieure de la gaine et à l'écoulement du fluide entre les ailettes. Nous avons dû choisir une définition plus globale, beaucoup moins représentative des phénomènes physiques réels et qui aura pour inconvénient de nuire à une extrapolation étendue des résultats en fonction des paramètres géométriques des gaines. La seule généralisation ou extrapolation possible porte sur l'application des lois de similitude à chaque profil de gaine expérimenté (changement d'échelle et des propriétés physiques du gaz.).

Dans ces conditions, il ne paraît pas utile en particulier d'introduire, comme paramètre géométrique de référence dans la définition des nombres sans dimensions, un diamètre hydraulique équivalent qui n'a d'intérêt que lorsque l'échelle des phénomènes physiques eux-mêmes est connue. Il suffit dans le cas présent d'utiliser n'importe quel paramètre qui soit une grandeur de référence, c'est-à-dire un paramètre d'échelle géométrique pour l'ensemble de la cellule. Nous avons choisi le diamètre externe D_0 du barreau d'uranium correspondant. Il permet donc une comparaison directe des résultats entre eux.

Nous verrons plus loin, au vu des résultats expérimentaux, que le choix de D_0 dans la définition de f_0 et de $\gamma\tau_0$ se trouve justifié également pour d'autres raisons.

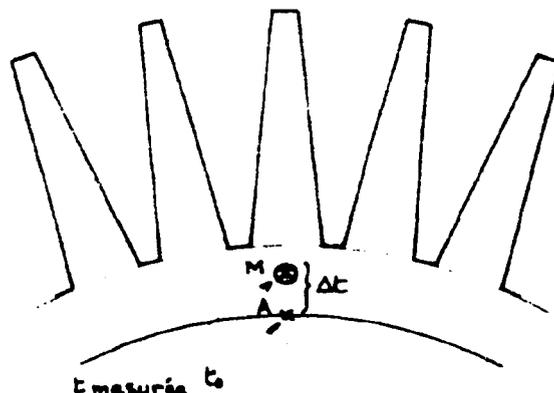
3 - La mesure des températures s'effectue dans l'épaisseur de la gaine et non sur son contour intérieur. La température t_0 n'est donc pas celle indiquée par le thermocouple. Par la suite, nous entendrons par température t_0 en un point de mesure, la température obtenue à partir de la température réelle mesurée à laquelle on ajoute la chute Δt de température entre les points A et M calculée par

l'expression $\Delta t = \frac{A M}{\lambda_g} \frac{\phi}{\pi D_o L}$

λ_g étant le coefficient de conductibilité de la gaine. (schéma ci-contre). La valeur réelle de la densité du flux de chaleur en ce point n'est pas nécessairement $\frac{\phi}{\pi D_o L}$

mais l'expérience a montré qu'elle en différerait peu, au point que, compte-tenu de ce que les points

A et M. sont toujours très rapprochés (moins d'1 mm), l'erreur ainsi faite sur t_o est dans tous les cas tout à fait négligeable.



La valeur du diamètre $D_o = 40$ mm est celle du contour intérieur de la gaine dans le réacteur EDF2. Dans les essais en laboratoire, il importe essentiellement de reproduire le contour extérieur de la gaine (diamètre en base d'ailette $D_1 = 43,6$ mm), mais peu importe que le contour intérieur $D_o = 40$ mm. soit représenté ou non. Dans le cas des gaines "minces" expérimentées (Voir description), il est effectivement représenté; par contre, dans le cas des gaines "épaisses", il est fictif; mais dans tous les cas, il est pris dans les calculs, égal à 40 mm, et t_o est toujours la température sur ce diamètre.

- 4 - Les essais de perte de charge sont effectués sans chauffer la cellule. Il s'ensuit que dans le dépouillement des essais on a toujours

$$\frac{\Delta \theta}{\bar{\theta}} = 0.$$

CHAPITRE III

CARACTERES PROPRES AUX ECOULEMENTS EN CHEVRONS - CHOIX d'UN MODE d'ETUDE

Dans un premier temps, nous présenterons au moyen d'exemples quels sont les caractères propres aux écoulements en chevrons. Puis, nous exposerons la méthode utilisée pour aborder l'étude de ces phénomènes, cette méthode s'appuyant sur une notion essentielle dans la conduite des réacteurs, celle de limitation technologique au point le plus chaud de la gaine ou de l'uranium.

I - CARACTERES PROPRES AUX ECOULEMENTS EN CHEVRON.

Tous les résultats observés présentent des caractères communs que nous allons présenter sur des exemples.

La gaine de mesure possède, comme il a été décrit plus haut, des thermocouples disposés le long d'une même génératrice, ainsi que d'autres thermocouples disposés dans différentes sections droites sur une même circonférence.

1 - Représentation circonférentielle des températures.

L'observation détaillée d'une section droite a été effectuée à grande échelle. La gaine expérimentée avait 6 secteurs. 6 thermocouples étaient disposés au droit des plans de symétrie de la gaine, un thermocouple supplémentaire étant placé au milieu de l'un des 6 secteurs.

Sur la figure 5_a sont portées les valeurs de η_{ζ_0} correspondant à l'indication des 7 thermocouples.

Les lettres Σ et S indiquent les plans de symétrie de la gaine qui sont aussi ceux de l'écoulement, la lettre E étant réservée

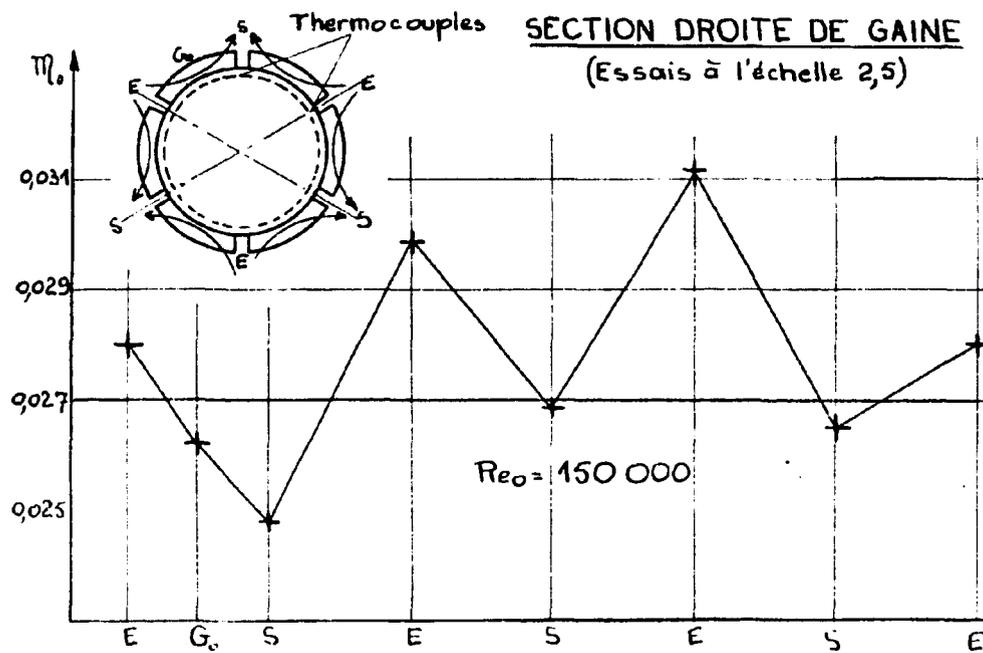


figure 5 a

aux plans de symétrie où s'effectue l'entrée dans les sous-canaux, la lettre S correspondant aux plans de symétrie où le fluide sort des sous-canaux.

On constate que Nu_0 est plus grand dans les plans d'entrée que dans les plans de sortie, ce qui est dû au fait que les entrées sont plus froides que les sorties. Ce résultat est typique des écoulements en chevron et s'explique très simplement. Comme le montre le schéma sur la figure 5_a, il y a convergence vers les plans de sortie de deux écoulements symétriques qui se sont échauffés au contact des ailettes.

2 - répartition longitudinale des températures.

un exemple de répartition longitudinale des températures est donné sur la figure 5_b. Suivant l'abscisse sont portées les longueurs de 4 gaines (gaines "épaisses") de 60 cm. chacune espacées de 3 cm. les unes des autres. On constate que le nombre de Margoulis Nu_0 oscille tout le long de cette génératrice sans amortissement apparent. De plus, les points expérimentaux sont sensiblement disposés suivant

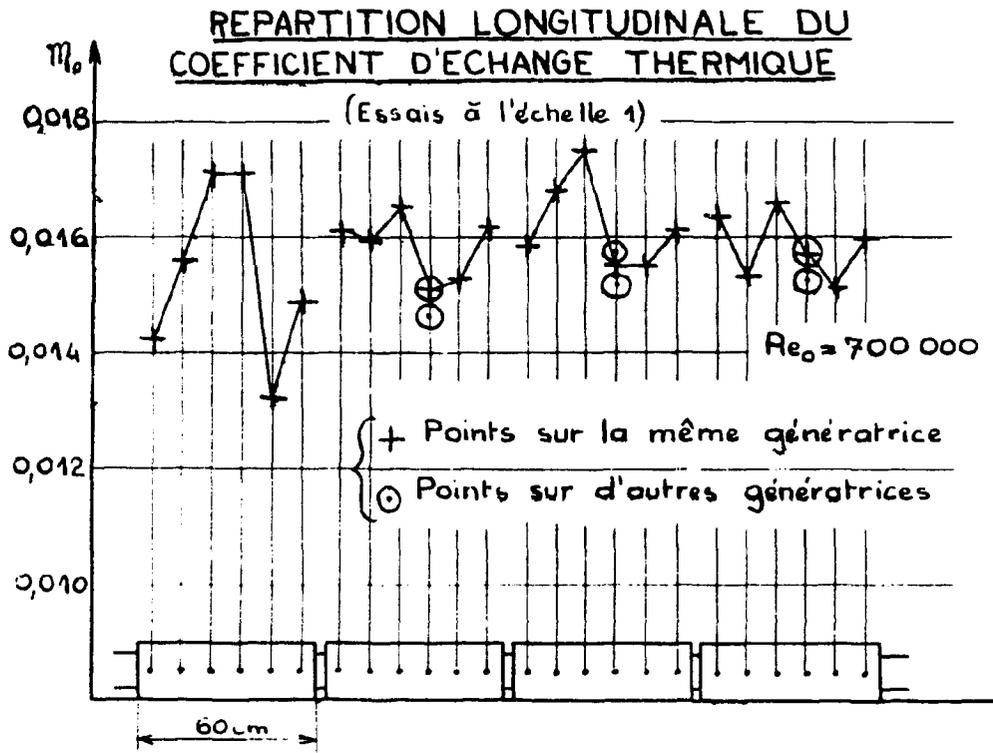


Figure 5 b.

une direction moyenne horizontale. Il semble donc que l'on ait à faire à un régime établi en moyenne, c'est-à-dire où les oscillations encadrent une même valeur moyenne quelle que soit l'abscisse. Nous dirons que le régime est pseudo-établi.

Des sondages de pressions et de températures effectués dans l'écoulement permettent d'expliquer en partie les raisons de telles oscillations. Il n'est pas dans notre intention de présenter ici une analyse détaillée de ces raisons.

Disons seulement que l'on observe une anisothermie très nette du fluide dans chaque section droite du canal, due à un cyclage du fluide entre les ailettes, sans mélange ensuite de celui-ci dans l'écoulement principal.

Cette anisothermie évolue de façon irrégulière le long du canal; en particulier, il en est ainsi pour la température du fluide à l'entrée des sous-canaux. Il s'ensuit que cette distribution irrégulière des températures dans le fluide se répercute sur celle des températures de gaine. Notons également qu'à l'entrée des sous-

canaux la vitesse du fluide présente des oscillations qui entraînent une irrégularité dans l'alimentation des sous-canaux.

Ces phénomènes sont de nature complexe, et il est impossible de prévoir par le calcul quelle sera la loi des variations du nombre de Margoulis $\eta \zeta_0$ le long de l'abscisse. En somme cette complexité est à l'image du désordre apparent dans lequel les points de mesure se distribuent suivant l'abscisse (figure 5_b). Pour cette raison, nous n'avons pas représenté de courbe expérimentale passant par les points de mesure; nous nous sommes seulement contentés de joindre ces points deux à deux par un segment de droite pour une simple clarté de présentation.

3 - Coefficient de pertes de charge en fonction du débit.

Le coefficient de perte de charge f_0 présente la particularité d'être indépendant du nombre de Reynolds (figure 6_a). Ce résultat a été constaté pour toutes les gaines expérimentées. Cette constance de f_0 doit provenir de ce que les pertes de charge

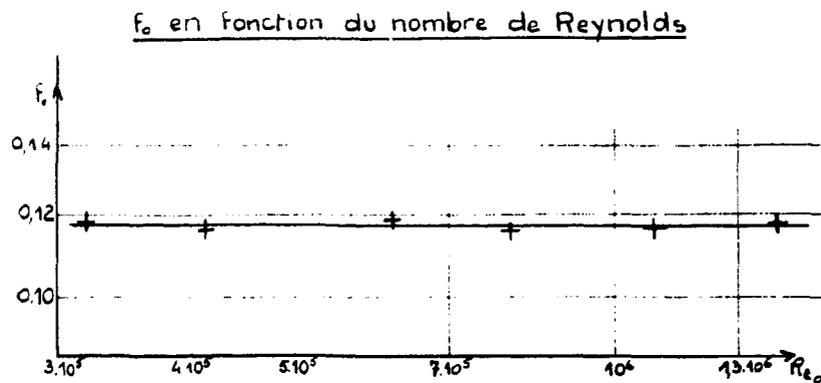


Figure 6 a

ne sont pas tant dues au frottement lisse sur la paroi des ailettes qu'à une dégradation de l'énergie lors de l'échange des quantités de mouvement entre le fluide cyclé entre les ailettes et l'écoulement principal. Dans ce cas, il est normal de penser que dans la mesure où les pressions dynamiques dans les sous-canaux et dans l'écoulement principal restent sensiblement dans un même rapport quelle que soit la vitesse du fluide, la perte de charge occasionnée par cette dégradation est proportionnelle à la pression dynamique du fluide.

4 - nombre de Margoulis moyen en fonction du débit.

nous montrerons plus loin comment on définit une valeur moyenne \overline{M}_0 du nombre de Margoulis à partir des valeurs M_0 locales mesurées.

La figure 6_b montre un exemple d'une variation de \overline{M}_0 en fonction du nombre de Reynolds. On constate qu'en coordonnées logarithmiques, la courbe présente une courbure vers le bas. On ne trouve pas là un résultat comparable à ceux obtenus sur des parois lisses non ailetées - cas du tube lisse par exemple - pour lesquelles les variations du nombre de Margoulis en fonction du nombre de

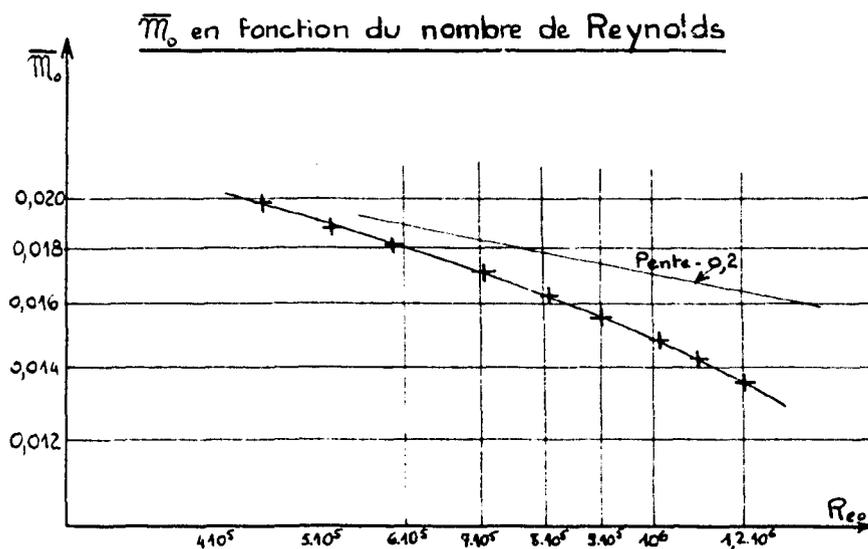


Figure 6_b

Reynolds sont représentées dans un diagramme logarithmique par une droite de pente voisine de $- 0,2$. Cette différence provient de la présence des ailettes. En effet, leur efficacité diminuant quand le débit augmente, il est normal de constater une telle courbure vers le bas.

II - NOTIONS DE SINGULARITE DANS LA REPARTITION DES COEFFICIENTS d'ECHANGE THERMIQUE.

Nous venons de voir qu'il était dans la nature des écoulements en chevron de faire apparaître des irrégularités dans la distribution des coefficients d'échange thermique sur toute la surface de la gaine. Or, ce qui intervient dans la conduite du réacteur, c'est le point le plus chaud de la gaine; c'est en ce point que le coefficient d'échange thermique est minimum. Dans ces conditions, il y a lieu d'accorder une importance particulière à ce minimum du coefficient d'échange. Nous dirons par la suite qu'il y a singularité thermique en chaque point où le coefficient d'échange présente un minimum.

Nous avons vu sur la figure 5_a que dans chaque section droite de la gaine le point le plus chaud se trouvait au droit d'un plan de sortie (S) du fluide. Il s'ensuit que sur l'ensemble de la gaine, le point le plus chaud se situe nécessairement quelque part sur une génératrice de sortie. Recherchant systématiquement ce point, il pourrait paraître alors judicieux de ne mesurer les températures que tout au long de cette génératrice. En fait, nous avons procédé autrement.

Nous avons préféré accorder de l'importance à la notion de coefficient d'échange moyen pour l'ensemble de la gaine, et rattacher ensuite la valeur minimum à cette valeur moyenne.

1 - Notion de valeur moyenne.

a) - Intérêt d'une telle notion.

La notion de valeur moyenne présente un intérêt pour les raisons suivantes :

Elle permet de caractériser d'une manière plus physique les qualités thermiques intrinsèques de la gaine.

Les corrélations établies à partir de valeurs moyennes entre différentes gaines et pour différents modes de chauffage sont plus fidèles que celles que l'on obtient à partir des valeurs locales plus sujettes aux aléas de l'expérience.

Cette notion permet également de calculer le point le plus chaud de l'uranium; en effet, du fait d'une homogénéisation partielle des températures par conduction dans l'uranium dans chaque section droite, il est nécessaire d'aborder ce calcul en considérant les conditions aux limites extérieures intéressant le pourtour complet du barreau d'uranium, ces conditions aux limites étant rapportées aux performances moyennes de la gaine dans la section droite considérée.

De plus, la valeur moyenne peut servir de valeur de référence par rapport à laquelle on peut déterminer la valeur minimum du coefficient d'échange sur la gaine.

Adopter une valeur de référence se conçoit dans la mesure où les singularités observées se présentent de façon systématique sous le même aspect et non, par exemple, sous une quelconque forme évolutive; ceci n'est possible que si les phénomènes aérodynamiques présentent des caractères permanents. Or, c'est bien présentement le cas.

Cela est particulièrement net dans le cas de la section droite où les singularités observées (figure 5_a) sont liées étroitement à l'échauffement du fluide le long des sous-canaux, échauffement dont on peut évaluer à priori l'ordre de grandeur. On ne peut donc craindre là de singularité insolite.

Dans le sens longitudinal, de tels caractères permanents sont moins évidents. L'existence d'un régime pseudo-établi peut paraître rassurante. Cependant, à la différence de ce qui se passe dans la section droite, il n'est pas possible d'évaluer à priori l'ordre de grandeur de l'amplitude d'une singularité longitudinale. Ce n'est qu'après coup, maintenant qu'ont été observés un très grand nombre de résultats expérimentaux, que l'on peut affirmer ce caractère permanent des phénomènes.

Il paraît, par conséquent, possible de concevoir une relation entre valeur minimum et valeur moyenne.

b) - Définitions possibles d'une valeur moyenne.

Dans l'étude des gaines à grande échelle, une première implantation des thermocouples avait été adoptée de façon à mesurer une valeur moyenne qui soit pratiquement égale à celle donnée par l'une ou l'autre des expressions suivantes :

$$\bar{m}_0 = \frac{1}{\Sigma} \iint_{\Sigma} m_0 \, d\sigma \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\bar{m}_0} = \frac{1}{\Sigma} \iint_{\Sigma} \frac{1}{m_0} \, d\sigma$$

Sur une même gaine, 5 sections droites équidistantes étaient équipées d'un nombre impair n de thermocouples (7 ou 11 thermocouples, comme il a été décrit plus haut),

disposés régulièrement sur le pourtour de la gaine. Le nombre des secteurs étant obligatoirement pair, cette méthode permet avec un nombre de thermocouples limité, d'obtenir une valeur moyenne $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{M}_i$ pratiquement égale à $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathcal{M}_\omega d\omega$.

Ensuite, on effectuait la moyenne arithmétique des 5 valeurs moyennes correspondant aux 5 sections droites de mesure.

Cette méthode, qui se justifiait au début de l'étude des gaines à chevrons alors qu'on ne connaissait pratiquement rien des problèmes de singularités, a été par la suite abandonnée en raison du trop grand nombre de thermocouples nécessaires, et qui, de toute manière ne pouvait pas être mis sur la gaine à l'échelle 1.

Une très grande simplification expérimentale a pu être obtenue en remplaçant la moyenne mesurée sur une section droite par la valeur mesurée sur une des génératrices médianes (à mi-distance entre une génératrice d'entrée et une génératrice de sortie). Les essais à grande échelle ont, en effet, montré que dans tous les cas expérimentaux envisagés cette valeur médiane \mathcal{M}_G était très voisine de toute valeur moyenne calculée dans la section droite, au point que dans la pratique, cette valeur peut être considérée comme étant tout aussi représentative des qualités intrinsèques de la gaine dans la section droite considérée.

2 - Singularités circonférentielle et longitudinale.

a) - Singularité circonférentielle.

La valeur \mathcal{M}_G mesurée sur une des génératrices médianes, représentative de la valeur moyenne dans la section droite, constitue une valeur de référence par rapport à laquelle

REPARTITION LONGITUDINALE DES COEFFICIENTS D'ÉCHANGE THERMIQUE

(essais à l'échelle 1)

Gaine 48 ail., 6 secteurs,
pas 300 mm, haut. ail. 6 mm

{ génératrice +
 { entrée ○
 { sortie △

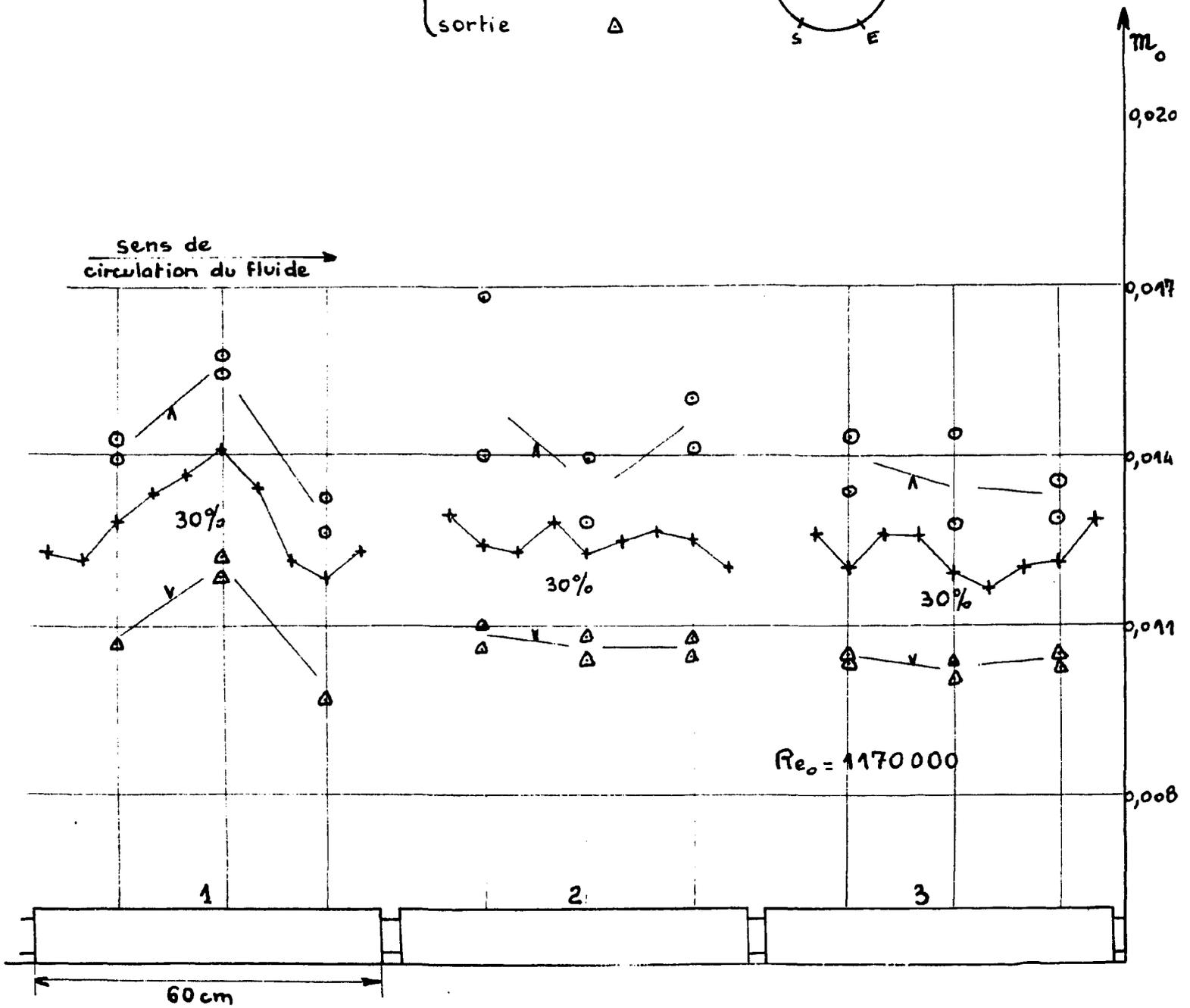
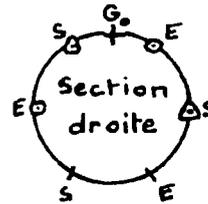


Figure 7

peut être chiffrée la singularité circonférentielle.

Considérons alors dans chaque section droite le rapport $\frac{\mathcal{M}_0 \text{ minimum}}{\mathcal{M}_{cG}}$. L'expérience montre que ce rapport reste pratiquement constant quelle que soit l'abscisse. Ce résultat peut être constaté sur la figure 7 : 3 sections droites par gaine (soit 9 sections droites au total) équipées de thermocouples sur des génératrices d'entrée [point (⊙)] et de sortie [point (Δ)].

Il paraît donc possible de définir un facteur de singularité circonférentielle, $f_c = \frac{\mathcal{M}_0 \text{ minimum}}{\mathcal{M}_{cG}}$ indépendant de l'abscisse, donc intrinsèque à la gaine considérée.

b) - Singularité longitudinale.

Le long de la génératrice médiane de mesure G, les points de mesure sont disposés de façon équidistante. Nous définissons une moyenne du nombre de Margoulis $\overline{\mathcal{M}_{cG}}$ sur la génératrice G par l'expression $\frac{1}{L} \int \mathcal{M}_0 dx$,

qui se trouve être pratiquement égale, si le nombre (n) des points de mesure est suffisamment grand, à la quantité $\frac{1}{n} \sum \mathcal{M}_0$.

Si on considère la valeur du nombre de Margoulis au point où il est minimum sur cette génératrice, on peut alors définir un facteur de singularité longitudinale $f_l = \frac{\mathcal{M}_0 \text{ minimum}}{\overline{\mathcal{M}_{cG}}}$.

Ainsi, si l'expérience a permis de déterminer la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}_{cG}}$ pour l'ensemble de la gaine, la relation qui permet de calculer la valeur $\mathcal{M}_0 \text{ minimum}$ du nombre de

Margoulis au point le plus chaud de la gaine s'écrit :

$$\mathcal{M}_0 \text{ minim} = f_l \times f_c \times \overline{\mathcal{M}_{0G}} \quad (1)$$

III - METHODE PRATIQUE ADOPTEE DANS LA DEFINITION DES VALEURS MOYENNES et des FACTEURS DE SINGULARITES.

1 - Existence de dissymétries dans les phénomènes observés.

Revenons à la figure 5_a. On constate que les 3 valeurs de $\overline{\mathcal{M}_0}$ sur les 3 génératrices de sortie ne sont pas égales. Aussi, malgré le soin apporté à la réalisation d'une géométrie présentant une symétrie de répétition pour l'ensemble gaine-canal, le phénomène observé présente une certaine dissymétrie. On peut accuser l'expérimentation (mesure des températures, distribution circonférentielle du flux de chaleur, etc...). Mais, on peut se demander également si l'écoulement fluide lui-même ne présente pas une instabilité propre à faire apparaître de telles dissymétries. Il y a probablement superposition des deux phénomènes et il sera difficile de dire au vu des résultats quelle est la part de l'un et de l'autre.

Puisque le phénomène présente une dissymétrie, la relation (1) donnée au paragraphe précédent a besoin d'être précisée. Il ne paraît pas en effet possible à priori de se contenter de mesurer les températures sur une seule génératrice médiane et sur une seule génératrice de sortie. L'existence de dissymétries nécessite donc que l'on dispose d'un bien plus grand nombre de thermocouples sur la gaine. Ceci a été possible dans les cellules à grande échelle.

Nous avons déjà présenté sur la figure 5_a avec une

section droite de mesure, un premier type de résultats obtenus à grande échelle. Nous en présentons un second où sont données, suivant l'abscisse, les variations de \overline{m}_0 sur 3 génératrices médianes.

La cellule d'essais possède 3 gaines ayant 6 secteurs. La gaine centrale a été équipée sur toute sa longueur de 3 séries de thermocouples disposés sur 3 génératrices médianes de part et d'autre de l'une d'entre elles, l'une est à 60° et l'autre à 120° .

Les résultats reportés sur la figure 8 montrent

REPARTITION LONGITUDINALE DE \overline{m}_0 SUR TROIS GÉNÉRATRICES MÉDIANES

(Résultats à grande échelle)

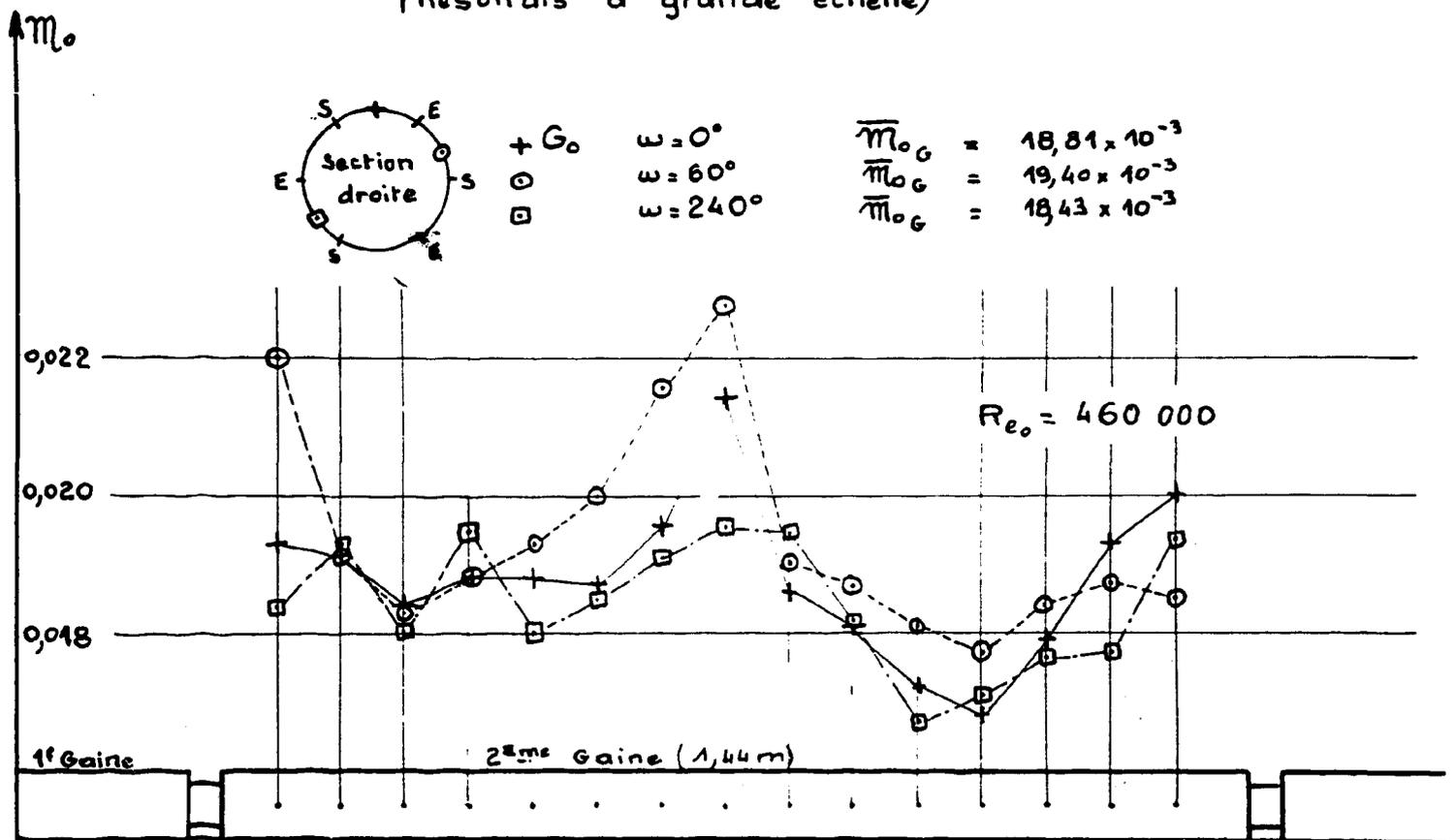


Figure 8

qu'il existe bien en chaque abscisse de mesure une légère dissymétrie entre les 3 secteurs mesurés. Cependant, si l'on considère maintenant les 3 répartitions longitudinales dans leur ensemble, on constate qu'elles ont sensiblement le même dessin et qu'elles ne présentent pas de déphasage entre elles suivant l'abscisse. De plus, les valeurs moyennes $\overline{\eta_{\text{C}_0 \text{G}}}$ (valeurs indiquées sur la figure) ne diffèrent pas entre elles de plus de 5 %. On doit pouvoir en déduire que dans une section droite, bien que les valeurs de η_{C_0} en 3 points homologues présentent une certaine dispersion, il y a malgré tout une forte probabilité pour que ces 3 valeurs soient entre elle dans des rapports égaux à ceux des moyennes $\overline{\eta_{\text{C}_0 \text{G}}}$ correspondantes.

Dans les essais à l'échelle 1, il n'a pas été possible de disposer autant de thermocouples qu'il aurait été nécessaire pour tenir compte des dissymétries éventuelles. Rappelons qu'il y a, d'une part, des thermocouples sur une seule génératrice médiane, d'autre part, dans une seule section droite par gaine, des thermocouples placés soit sur des génératrices médianes, soit sur des génératrices d'entrée et de sortie.

Les définitions adoptées pour les valeurs moyennes et pour les facteurs de singularités vont donc reposer sur un nombre limité de thermocouples. Cependant, les conclusions précédentes obtenues sur les essais à grande échelle permettent de préciser comment utiliser les définitions choisies.

2 - Définitions.

a) - Valeurs moyennes

- $\overline{\eta_{\text{C}_0 \text{G}}}$: moyenne arithmétique, pour chaque gaine, des valeurs de η_{C_0} en des points équidistants le long de la

génératrice médiane G de mesure.

- $\overline{\mathcal{M}}_{oT}$: moyenne des \mathcal{M}_o , pour chaque gaine, dans la section droite où les thermocouples sont sur des génératrices médianes.

- $\overline{\mathcal{M}}_{oK} = \overline{\mathcal{M}}_{oG} \times \frac{\overline{\mathcal{M}}_{oT}}{\mathcal{M}_{oc}}$, \mathcal{M}_{oc} étant la valeur de \mathcal{M}_o au point de mesure commun à la génératrice G et à la tranche T de thermocouples sur génératrices médianes.

- $\overline{\mathcal{M}}_o$: moyenne arithmétique pour l'ensemble des gaines des valeurs de $\overline{\mathcal{M}}_{oK}$. En somme, $\overline{\mathcal{M}}_o$ représente la moyenne générale sur l'ensemble des génératrices médianes.

b) - facteurs de singularité.

- $f_c = \frac{\overline{\mathcal{M}}_{os}}{\overline{\mathcal{M}}_{oG}}$: facteur de singularité circonférentielle

égal au quotient de la moyenne arithmétique des valeurs du nombre de Margoulis $\overline{\mathcal{M}}_{os}$ sur les génératrices de sortie dans une section droite, à la valeur $\overline{\mathcal{M}}_{oG}$ mesurée sur une des génératrices médianes dans la même section.

- $f_l = \frac{\mathcal{M}_{o \min}}{\overline{\mathcal{M}}_{oG}}$: facteur de singularité longitudinale

égal au quotient du nombre de Margoulis minimum sur la génératrice médiane de mesure à la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}}_{oG}$ sur cette même génératrice, moyenne prise sur la longueur de la gaine seulement.

a) - Remarques sur les définitions de f_c

Nous avons déjà dit plus haut en quoi le choix de \mathcal{M}_G comme valeur de référence dans la définition du facteur de singularité circonférentielle nous paraissait séduisant : son choix est compatible avec l'utilisation d'un nombre très limité de thermocouples (un seul thermocouple sur génératrice médiane dans une section droite), en même temps que sa valeur reste très voisine de toute valeur moyenne définie sur le pourtour de la gaine. Cependant, cela constitue un inconvénient de ne se référer qu'à un seul point de mesure par section droite, sa valeur pouvant d'une part être entachée d'une erreur expérimentale, d'autre part, être par trop liée à une dissymétrie éventuelle du phénomène.

Or, chaque section droite possède un thermocouple sur une génératrice d'entrée. Nous référant alors aux résultats obtenus à grande échelle sur des sections droites équipées d'un plus grand nombre de thermocouples, nous avons utilisé l'indication donnée par ce thermocouple en génératrice d'entrée \mathcal{M}_e pour recaler en partie l'indication donnée par le thermocouple en génératrice médiane \mathcal{M}_G .

Les résultats à grande échelle montrent en effet que l'on a pratiquement dans tous les cas :

$$\frac{\mathcal{M}_s}{\mathcal{M}_G} = \frac{\mathcal{M}_G}{\mathcal{M}_e}$$

b) - Remarques sur la définition de f_1

Pour rapporter la valeur $\mathcal{M}_{G \min}$ le long d'une génératrice médiane à la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}_G}$ nous avons préféré considérer séparément chaque gaine plutôt que l'ensemble des gaines; la raison de ce choix est la suivante:

Presque tous les essais ont été effectués avec des éléments

de gaine de 60 cm. de long interrompus entre eux par une partie non ailetée de l'ordre de 3 cm. de long de façon à simuler en partie la disposition en train de cartouches existant dans un canal de réacteur. Or, de telles interruptions ne sont pas sans conséquence sur la répartition longitudinale des températures qui suit. Une étude à grande échelle a montré l'existence d'un mélange partiel du gaz à l'amont de chaque cartouche ainsi disposée. Il faut donc penser que la place et l'importance du point le plus chaud par cartouche sur chaque génératrice médiane dépend de cette interruption.

Dans le calcul du point chaud, on peut procéder alors de la manière suivante: une seule valeur minimum de $\overline{N_{0G}}$ pour l'ensemble du train de cartouches est à retenir (la plus basse) parmi les valeurs minimum observées sur chaque cartouche. Mais, comme il se trouve - et cela a été systématiquement observé - que les moyennes $\overline{N_{0G}}$ (des différentes cartouches) étaient toutes pratiquement égales entre elles (à moins de 2 %), il s'ensuit que parmi les différentes valeurs de f_1 relatives à chaque cartouche il suffit de prendre la valeur la plus faible.

c) Facteur de "dissymétrie"

Compte-tenu de ce que les facteurs de singularités f_c et f_1 sont calculés à partir d'un nombre très limité de thermocouples, nombre trop faible pour mesurer les dissymétries éventuelles du phénomène autour de la gaine, il semble nécessaire de définir un nouveau facteur, facteur de dissymétrie f_d . Ce dernier joue davantage un rôle de facteur de sécurité, rôle différent des facteurs f_c et f_1 qui sont des facteurs correctifs, que l'on peut déterminer avec précision.

3 - Définition d'un nombre de Margoulis global dans les essais "isothermes".

Soient, en une abscisse x le long de la gaine :

$$h_o = \frac{\phi_o}{t - \theta} \quad \text{et} \quad H = \frac{\phi_o}{T - t}$$

les coefficients d'échange côté gaz et côté eau, où ϕ_o est la densité moyenne du flux de chaleur à travers la paroi interne de la gaine de diamètre D_o , t la température de la gaine sur cette paroi (*), θ la température moyenne du gaz, et T la température moyenne de l'eau.

$d\theta$ étant l'échauffement du gaz sur la longueur dx , on a :

$$q C_p d\theta = \pi D_o h_o (t - \theta) dx$$

$$\text{ou} \quad \frac{d\theta}{t - \theta} = \frac{\pi D_o}{q C_p} h_o dx$$

$$\text{ou encore} \quad : \quad \frac{d\theta}{(T - \theta) - (T - t)} = \frac{\pi D_o}{q C_p} h_o dx$$

Des relations précédentes, on déduit :

$$\frac{d\theta}{T - \theta} = \frac{\pi D_o}{q C_p} \frac{h_o}{1 + \frac{h_o}{H}} dx$$

Le coefficient d'échange H côté eau peut être considéré comme constant tout le long de la cellule. Pour intégrer cette relation, on peut considérer que $\frac{h_o}{H} = \overline{\frac{h_o}{H}}$, $\overline{\frac{h_o}{H}}$ étant la valeur moyenne sur l'ensemble de la gaine. Enfin la température de l'eau T est pratiquement constante d'un bout à l'autre de la cellule (refroidissement inférieur à 2° C.).

Dans ces conditions, l'intégration de la dernière relation

(*) - t est en fait une température moyenne compte-tenu des très légers écarts pouvant exister dans une section droite entre rainure d'entrée et rainure de sortie.

donne :

$$\text{Log} \left[\frac{T - \theta_e}{T - \theta_s} \right] = \frac{\pi D_o L}{q C_p} \times \frac{\overline{h_o}}{1 + h_o/H}$$

en remplaçant $\overline{h_o}$ et H par leurs expressions en fonction des nombres de Margoulis respectifs $\overline{N_o}$ pour l'air ($\overline{N_o} = \frac{h_o s}{q C_p}$) et N_E pour l'eau ($N_E = \frac{H \pi D_o^2}{Q c}$), et en désignant par $\overline{N_o'}$ l'expression :

$$\frac{s}{\pi D_o L} \times \text{Log} \frac{T - \theta_e}{T - \theta_s},$$

il vient :

$$\overline{N_o} = \frac{\overline{N_o'}}{1 - \frac{\pi D_o^2}{4 s} \frac{q C_p}{Q c} \frac{\overline{N_o'}}{N_E}}$$

L'exactitude de $\overline{N_o}$ dépend de la précision avec laquelle est connue la valeur de N_E . Celle-ci est déterminée au moyen d'une expression de la forme :

$$N_E = k R_{eo}^{-0.2} \times P_{rE}^{-0.6}$$

k a été déterminé expérimentalement, et a été pris égal à 0,035. Le fait que cette valeur puisse paraître élevée est dû probablement aux accidents géométriques au niveau du raccordement entre gaines.

Chapitre IV

PRECISION DES MESURES

1 - ESSAIS PRELIMINAIRES.

Les quelques résultats énumérés ci-après constituent des éléments permettant d'apprécier la précision des mesures.

1 - Les cellules d'essais.

Les essais à l'échelle 1 avec flux de chaleur constant ont été effectués dans deux cellules pratiquement identiques branchées sur deux installations différentes.

Dans chacune des deux cellules, le bilan thermique est bouclé à moins de 1 % près. Mais, pour que l'essai soit concluant, nous avons expérimenté la même gaine dans les deux cellules. Nous avons trouvé le même coefficient de perte de charge. Les coefficients d'échange thermique ne différaient que très peu : moins de 2 %. Or, cette imprécision est celle que l'on obtient également quand on expérimente la même gaine dans la même cellule après avoir effectué un démontage puis un remontage. Dans ces conditions, on peut estimer que les deux cellules donnent bien pratiquement les mêmes résultats.

2 - Dispositifs de mesure

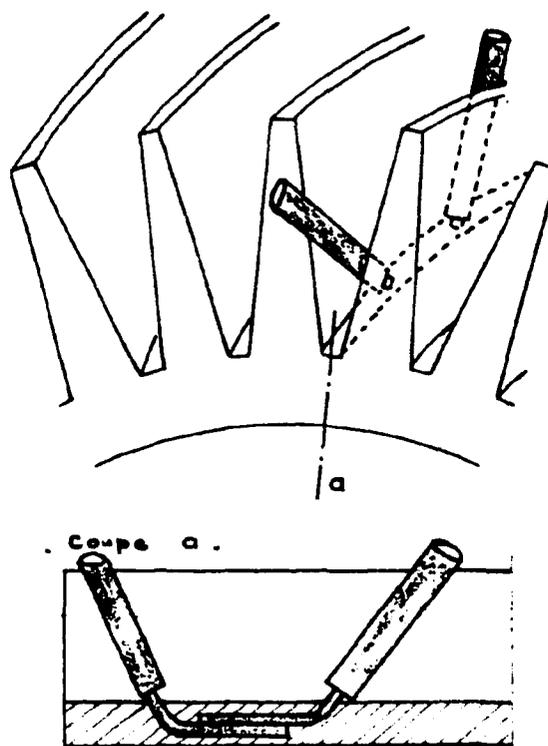
a) - les thermocouples.

La mesure des températures a été effectuée sur une même gaine par deux procédés différents. Outre le procédé de mesure

adopté, nous avons serti des thermocouples au pied des ailettes, les fils sortant directement dans l'écoulement fluide (schéma ci-après).

Si on rapporte les indications obtenues à un même point dans l'épaisseur de la gaine, on trouve les mêmes résultats à moins de 3 % près.

Dans l'évaluation de la précision sur l'ensemble des résultats, nous avons évalué la part due aux seuls thermocouples en tenant compte de ce que la mesure n'était pas rigoureusement ponctuelle, ce qui peut, en effet, avoir de l'importance aux grands nombres de Reynolds (la chute de température dans la gaine étant grande par rapport à l'écart entre les températures de gaine et de gaz.).



b) - Contact thermique entre barreau chauffant et gaine.

A une certaine époque, des essais effectués avec des gaines minces ont fait apparaître des écarts de température entre différents points de mesure sur la gaine, qui se sont avérés ne pas dépendre de l'écoulement fluide. En effet, après avoir inversé le sens d'écoulement du fluide, il est apparu que les écarts entre ces points restaient inchangés. On s'est

aperçu que cette anomalie était due à un contact non homogène en tout point entre le barreau chauffant et le contour intérieur de la gaine.

Une nette amélioration a été obtenue après usinage et alésage beaucoup plus sévère du barreau et de la gaine.

Dans la suite, nous ne donnerons sur les singularités longitudinales que des résultats relatifs aux gaines "épaisses" pour lesquelles les conditions au contact entre barreau chauffant et gaine étaient les meilleures.

3 - Conditions expérimentales.

a) - Conduction circonférentielle.

Dans la pratique seules sont à connaître les valeurs du facteur de singularité circonférentielle telles qu'elles existent sur le barreau d'uranium gainé placé dans le réacteur. C'est pour cette raison que dans les essais à grande échelle, on a pris soin de placer à l'intérieur de la gaine un noyau en acier inoxydable de conductibilité voisine de celle de l'uranium.

Dans les essais à l'échelle 1, une telle simulation n'est pas représentable. Cependant, des études effectuées en utilisant l'analogie rhéoelectrique ont montré que la réduction de l'écart entre les températures de génératrice d'entrée et de génératrice de sortie était essentiellement due à la conduction circonférentielle dans l'épaisseur de la gaine, la conduction dans l'uranium intervenant pour très peu. Il en résulte donc que la valeur du facteur de singularité circonférentielle mesurée dans les présents essais doit avoir un sens dans une application éventuelle à un calcul de point chaud en pile.

b) - Conduite des essais.

A l'inverse de la méthode habituellement adoptée (température de la gaine maintenue à un niveau constant pendant que varie le débit-masse du fluide), quelques essais ont été effectués en faisant varier la température de gaine en même temps que le débit du gaz, tout en maintenant le niveau du flux constant. Nous avons trouvé les mêmes valeurs et les mêmes lois de variations du coefficient d'échange thermique en fonction du débit.

D'autres essais ont été effectués en faisant varier l'intensité du phénomène thermique (variation du flux ou de la température) pour un même débit du gaz. Dans la plage de variation considérée (variation de 1 à 5 de la valeur du flux de chaleur) le coefficient d'échange n'a pratiquement pas varié : ces variations entrent probablement dans la plage d'imprécision des expériences.

c) - Mesure des pertes de charge.

α) - Les prises de pression statique sont placées sur une même génératrice du canal. Les essais ont été effectués en plaçant la gaine par rapport à cette génératrice de façon à ce que celle-ci se trouve dans le plan bissecteur d'un secteur de la gaine.

De toute façon, il semble que la position de la génératrice de mesure sur le canal par rapport à la gaine importe peu, comme l'ont montré des essais faits en tournant la gaine par rapport au canal.

β) - Quelques essais de pertes de charge ont été effectués en utilisant une autre méthode. On procédait par différence, les essais étant faits d'abord avec deux gaines, puis avec

quatre gaines. On obtenait par cette méthode des valeurs de f_0 de 3 à 4 % supérieures en moyenne.

II - PRECISION DES MESURES.

Nous n'envisagerons l'aspect "précision des mesures" que pour les valeurs moyennes : valeurs moyennes du nombre de Margoulis $\overline{\eta\sigma_c}$, et du coefficient de perte de charge f_0 .

$\overline{\eta\sigma_c}$ et f_0 sont obtenus à partir d'un nombre d'essais suffisants pour que se trouve éliminée toute erreur liée à la conduite des essais (erreur sur la constance dans le temps du débit et de la puissance, et erreurs de lecture des résultats).

Restent alors les erreurs de type systématique. On peut les classer en deux catégories.:

- celles liées à toute la série des essais, et qui conservent une même valeur.
- celles liées à chaque type de gaine essayé et qui peuvent donc varier d'une gaine à l'autre.

Dans la première catégorie entrent les erreurs attachées à l'installation (mesure du débit, des pressions en paroi du canal, de la puissance), celles liées à la géométrie de la cellule d'essai (passage des fils de thermocouples et des arrivées de courant), les erreurs liées à la manière dont sont mesurées les températures et les erreurs liées à la méthode utilisée dans la mesure des pertes de charge.

Dans la seconde catégorie entrent les erreurs dues aux tolérances d'usinage de la gaine, à la géométrie de la cellule

d'essai (positionnement des cartouches par rapport au canal), et toute erreur en général qu'entraînent un montage, un démontage puis un remontage de la cellule.

1 - Précision sur \overline{m}_0 .

Dans la première catégorie, nous estimons que les erreurs liées à l'installation et à la géométrie de la cellule entrent pour une faible part : elles interviennent ensemble pour moins de 3 % sur \overline{m}_0 . Les erreurs attachées à la mesure des températures sont inférieures à 4 % (pour un nombre de Reynolds voisin de celui utilisé dans le réacteur).

Entrant dans la deuxième catégorie, les erreurs liées à l'essai de chaque gaine sont plus difficiles à apprécier. Une observation d'ordre statistique des résultats relatifs à l'ensemble des gaines expérimentées, nous permet de penser que l'incertitude sur chaque résultat ne dépasse pas 3 %.

Au total, on peut estimer que, pour chaque gaine,
 \overline{m}_0 est connu à $\pm 10\%$ près. (3 + 4 + 3)

2 - Précision sur f_0 .

Dans la première catégorie, entrent les erreurs liées d'une part, à la méthode de mesure employée et d'autre part, à l'installation, que nous estimons respectivement à $\pm 4\%$ et $\pm 3\%$. Les erreurs entrant dans la deuxième catégorie sont estimées à $\pm 3\%$.

Au total, on peut estimer que, pour chaque gaine, f_0 est connu à $\pm 10\%$ près (4 + 3 + 3).

Chapitre v

RESULTATS EXPERIMENTAUX.

Lors de la description des cellules d'essais, nous avons précisé quelles étaient les fonctions de chacune :

- Essais en vraie grandeur dans des conditions proches de celles existant dans le réacteur, de façon à connaître les valeurs du coefficient d'échange thermique et du coefficient de perte de charge à introduire dans les calculs d'avant-projets.
- Essais à grande échelle (échelle 2,5) avec de l'air à la pression atmosphérique dans le but d'observer les phénomènes dans le détail; certains résultats ont une valeur quantitative, d'autres une valeur qualitative seulement, susceptible cependant d'aider à expliquer certains résultats obtenus à l'échelle 1.
- Essais isothermes dans le but d'effectuer une discrimination rapide entre différents types de gaines.

Nous avons vu que les singularités thermiques propres aux écoulements en chevrons, présentaient des caractères permanents indépendants de l'abscisse le long de la gaine, ce qui permettait de parler de régime pseudo-établi. Il est possible alors de chiffrer ces singularités par rapport à une valeur de référence, ou valeur moyenne, représentative des qualités aérothermiques de la gaine. Ainsi, l'étude peut se diviser en deux parties : valeurs moyennes et singularités thermiques dont nous présenterons successivement les résultats.

1 - VALEURS MOYENNES.

1 - Flux de chaleur constant - essais à grande échelle.

Trois gaines ont été expérimentées. Elles avaient le même profil d'ailette et ne différaient que par le nombre de secteurs : 4, 6 et 8 secteurs. Pour chacune d'elles, nous avons fait varier le diamètre du canal et la hauteur d'ailette. Les caractéristiques géométriques à l'échelle 1 de ces gaines ont été les suivantes : 48 ailettes, pas 400 mm. ($\alpha_b = 19^\circ$), épaisseur des ailettes à la base 1,4 mm, diamètre en base d'ailette 43,6 mm. La hauteur des ailettes est passée, après usinages successifs, de 10,2 mm à 1,5 mm, puis à 6 mm (seulement pour la gaine "4 secteurs"), de telle sorte que l'épaisseur en pointe d'ailette a eu successivement les valeurs 0,3 - 0,6 et 0,8 mm. Le diamètre du canal a varié entre 90 mm et 140 mm et le nombre de Reynolds Re_0 de 10^5 à $6,10^5$.

a) - influence du diamètre du canal.

Nous présentons sur la figure 9, l'ensemble des résultats obtenus avec la gaine "6 secteurs". Sont portées en coordonnées logarithmiques, les variations de f_0 et de \overline{N}_0 en fonction de Re_0 . A travers chaque série de points, nous avons tracé des droites, ce qui constitue certainement une légère approximation, étant donné qu'on aurait dû s'attendre - comme nous l'avons dit antérieurement - à une légère courbure vers le bas. En somme, nous avons représenté par un segment de droite une courbe probablement très tendue.

Pour chaque hauteur d'ailettes, les courbes forment un faisceau très serré. Ce résultat est confirmé pour les gaines "4 et 8 secteurs", comme on peut le voir sur le tableau N°10 où sont portées les valeurs de f_0 et de \overline{N}_0 en fonction du

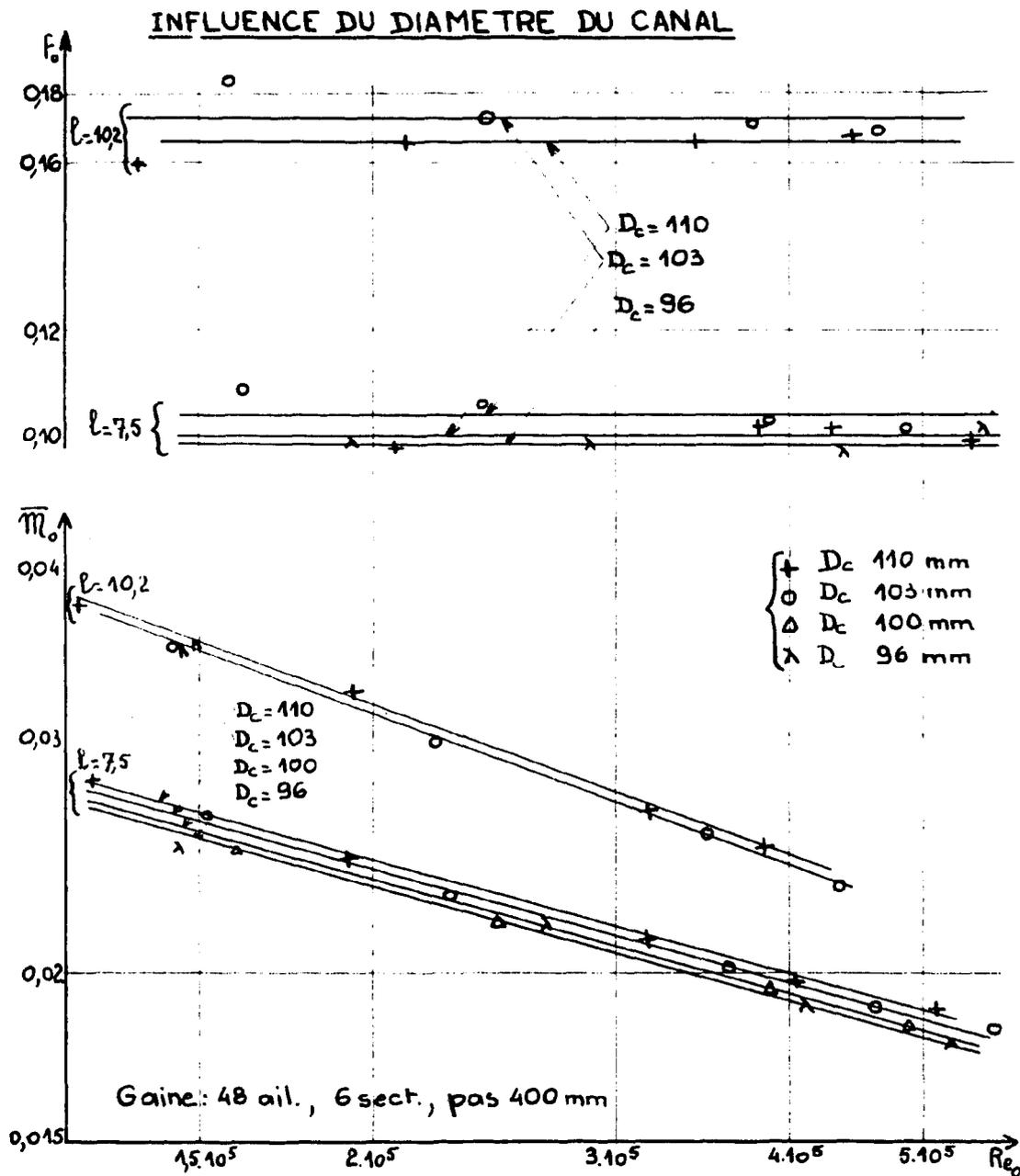


Figure 9

nombre de secteurs, de la hauteur d'ailette et du diamètre du canal, pour une valeur donnée du nombre de Reynolds (nous avons pris : $Re_0 = 400.000$). Il en résulte la constatation suivante : f_0 et \overline{M}_0 ne dépendent pratiquement pas du diamètre du canal, dans une plage de variations relativement étendue (96 mm. à 110 mm, (à l'échelle 1), soit pour une variation de la section de passage du fluide de 50 à 80 cm² environ).

TABLEAU N° 10

ESSAIS A GRANDE ECHELLE - VALEURS de f_0 et de \overline{m}_0
pour $Re_0 = 400.000$ - GAINES 48 AILETTES, PAS 400 mm.

Nombre de Secteurs	hauteur ailettes (mm)	Diamètre du canal (mm)	f_0	\overline{m}_0	f_0	\overline{m}_0	
4	10,2	110	0,135	0,0201	} 0,1375	0,0203	
		103	0,138	0,0205			
	7,5	110	0,085	0,0174	} 0,087	0,0172	
		103	0,088	0,017			
		96	0,085	0,0172			
	0	0	110	0,062	0,0145	} 0,064	0,0149
			103	0,064	0,0147		
			96	0,065	0,015		
			90	0,065	0,0155		
	6	10,2	110	0,165	0,0244	} 0,1675	0,02425
			103	0,17	0,0241		
		7,5	110	0,10	0,020	} 0,102	0,0197
103			0,103	0,0198			
96			0,102	0,01912			
8		10,2	110	0,25	0,0242	} 0,255	0,0241
	103		0,26	0,024			
	7,5	110	0,12	0,020	} 0,128	0,0199	
		103	0,128	0,0198			
		96	0,133	0,0197			
		90	0,115	0,0202			

b) - Remarques sur les définitions de f_0 et de \overline{M}_0 .

Ce résultat ne doit pas surprendre. Il résulte des définitions choisies pour f_0 et \overline{M}_0 . On pouvait en effet, concevoir à priori que dans la mesure où la variation du diamètre influe peu,

- d'une part, sur les variations du frottement sur sa paroi, qui sont très faibles comparées au frottement sur la gaine,

- d'autre part, sur la direction de la vitesse au voisinage des ailettes,

il est possible de raisonner sur la seule vitesse débitante du fluide indépendamment du diamètre du canal. Dans ce cas, pour une même valeur de Re_0 correspond, quel que soit le diamètre du canal, une même valeur du nombre de Reynolds dans les sous-canaux entre les ailettes, donc un même coefficient d'échange thermique h_0 . Il s'ensuit, puisqu'à même Re_0 correspond même valeur de $\frac{q}{s}$, que l'on doit avoir la même valeur de \overline{M}_0 .

Il en est de même pour f_0 . L'expression définissant f_0 peut également s'écrire sous la forme :

$$\pi D_0 f_0 = \frac{s \Delta p}{L} \times \frac{l}{pd}$$

A même Re_0 , on a même pression dynamique p_d . Il est normal alors d'avoir même effort longitudinal global sur l'ensemble gaine-canal, qui s'exprime, par unité de longueur, par $\frac{s \Delta p}{L}$.

Il s'ensuit que l'on doit avoir même valeur de f_0 .

Les résultats expérimentaux confirment de façon très satisfaisante ces hypothèses.

Ainsi, par la suite, chaque gaine pourra être caractérisée

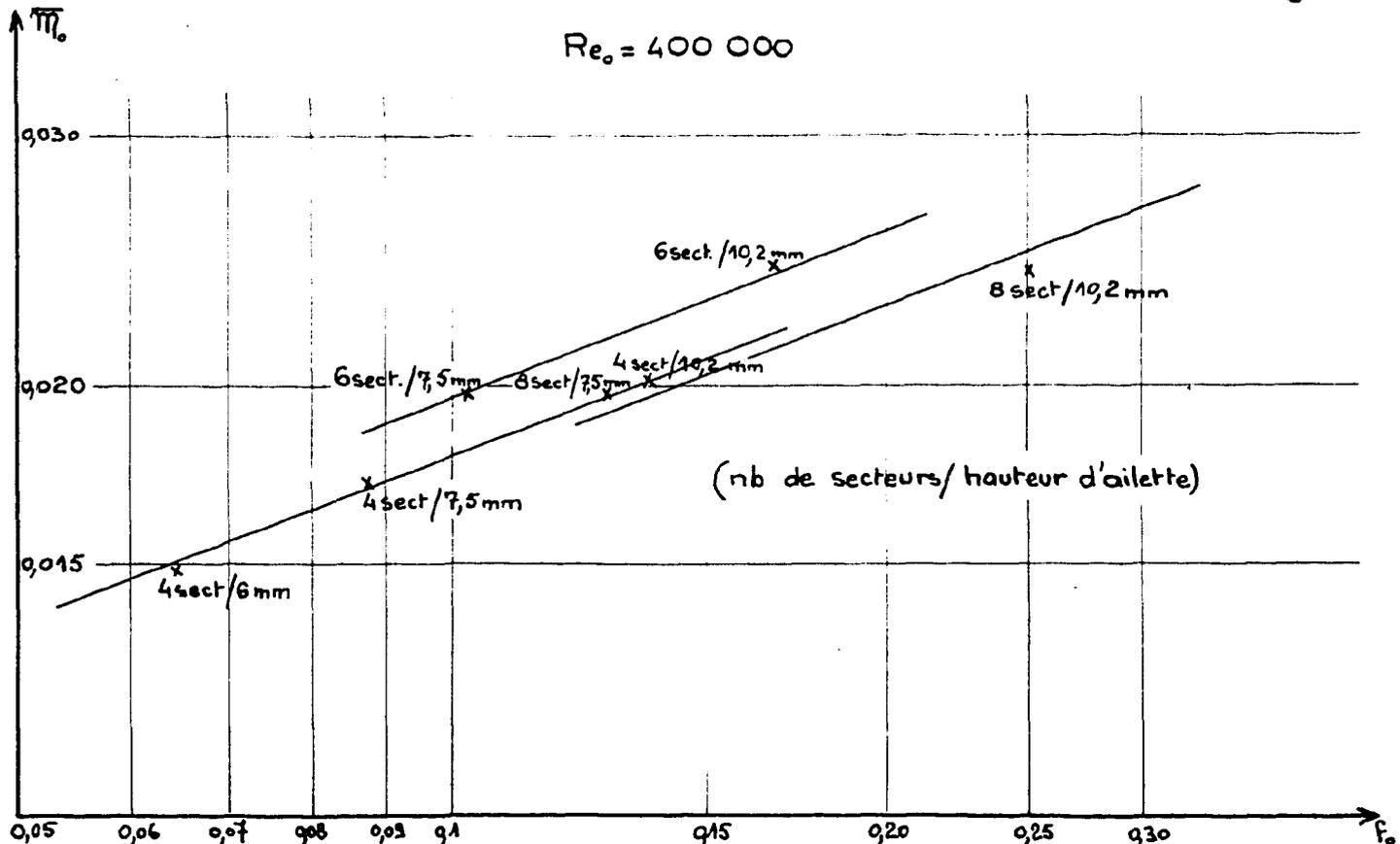
par une seule valeur du coefficient de pertes de charge et par une seule loi du nombre de Margoulis, indépendamment du diamètre du canal. Ce n'est pas absolument exact en toute rigueur comme le montre la légère dispersion des courbes sur la figure 9. Mais, en pratique, cette dispersion entre dans bien des cas dans l'imprécision expérimentale.

c) - Diagramme \overline{M}_0 , f_0

Sur la figure 11, dans un diagramme logarithmique avec \overline{M}_0 et f_0 en coordonnées, sont représentées par un point les caractéristiques de chaque gaine expérimentée, correspondant au même nombre de Reynolds (400.000), étant entendu qu'il y a autant de gaines expérimentées qu'il y a de combinaisons de nombres de secteurs et de hauteur d'ailette considérées. Compte-tenu de ce qui vient d'être dit plus haut, le diamètre du canal n'y figure plus. Les valeurs de f_0 et de \overline{M}_0 adoptées sont celles figurant dans 2 colonnes supplémentaires du tableau 10. Les courbes "iso-nombre de secteurs" sont représentées par des segments de droites.

GAINES: 48 AILETTES, PAS 400 mm (Echelle: 2,5)

Figure 11



2 - Flux de chaleur constant. Essais à l'échelle 1

Les différentes gaines expérimentées avaient les caractéristiques communes suivantes : même largeur de rainure au droit des génératrices d'entrée et de sortie (2,5 mm), même diamètre en base d'ailette (43,6 mm) et presque dans tous les cas même diamètre de canal (100 mm). Les caractéristiques géométriques des gaines dont nous présentons les résultats sont données dans le tableau N°12. Les gaines sont classées en deux séries ("gaines épaisses" et "gaines minces"); les conditions expérimentales en ont déjà été décrites au Chapitre I. Le nombre de Reynolds Re_0 a varié entre $0,3 \cdot 10^6$ et $1,2 \cdot 10^6$.

Nous avons donné sur la figure 6 un exemple de variations de f_0 et de \overline{M}_0 en fonction du nombre de Reynolds Re_0 . Nous reproduisons d'autres exemples de ces variations sur la figure 13.

Au cours de l'essai des gaines "épaisses", on a fait varier le nombre de Reynolds, grâce à trois pressions différentes (6, 12 et 23 bars). On constate que les trois tronçons de courbe correspondants ne se raccordent pas exactement. Les écarts sont faibles, de l'ordre des incertitudes expérimentales.

La figure 13 groupe, en outre les résultats suivants :

a) - Sont portés en particulier les résultats relatifs à une même gaine (60 ailettes, 6 secteurs, pas 400 mm, hauteur ailette 7,5 mm) expérimentée dans deux canaux de 100 mm. et 110 mm. Nous retrouvons ici le résultat suivant lequel f_0 et \overline{M}_0 ne dépendent que très peu du diamètre du canal.

β) - Pour nous rendre compte directement de l'influence de cette conductibilité de la gaine sur ses performances globales, nous avons effectué deux essais avec deux gaines de géométrie

TABLEAU N°12

ESSAIS à FLUX CONSTANT (Echelle 1)

$Re_0 = 700.000$

	N	ϵ_m	n	pas	l	e_p	e_b	s 100	métal	f_0	f_0	\bar{m}_0	Pente
										"avec therm"	"sans therm."		$m_0(Re_0)$
gaines "minces"	60	2,58	6	600	7,5	0,33	0,90	6020	AU4G		0,078	0,0157	0,29
	60	2,58	8	600	7,5	0,37	1,07	6019	"	0,0912	0,087	0,016	0,35
	60	2,48	6	400	7,5	0,30	1,02	5997	"	0,126	0,118	0,0172	0,39
	60	2,48	8	400	7,5	(0,28)	(0,93)	5998	"	0,146		0,0174	0,41
	60	2,09	6	200	7,5	0,31	0,96	5801	"	0,222	0,229	0,0210	0,43
	36	4,14	6	400	7,5	0,78	1,89	5906	"	0,0923	0,088	0,0132	0,29
gaines "épaisses"	48	3,10	6	400	7,5	0,44	1,41	5927	AU4G	0,114		0,0155	0,39
	48	3,10	6	400	7,5	(0,55)	1,38	5927	Mg-Zr	0,112		0,0153	0,36
	48	3,02	6	400	6	0,72	1,38	5987	Mg-Zr	0,083		0,0138	0,33
	48	2,88	6	300	7,5	(0,55)	1,68	5897	Mg-Zr	0,131		0,0167	0,40
	48	2,724	6	300	6,75	(0,60)	1,68	5927	Mg-Zr	0,115		0,0160	0,35
	48	2,70	6	300	6	0,79	1,68	5967	Mg-Zr	0,098		0,0150	0,33

(Les valeurs entre parenthèses sont des cotes relevées sur plans qui ne correspondent pas obligatoirement à la réalité).

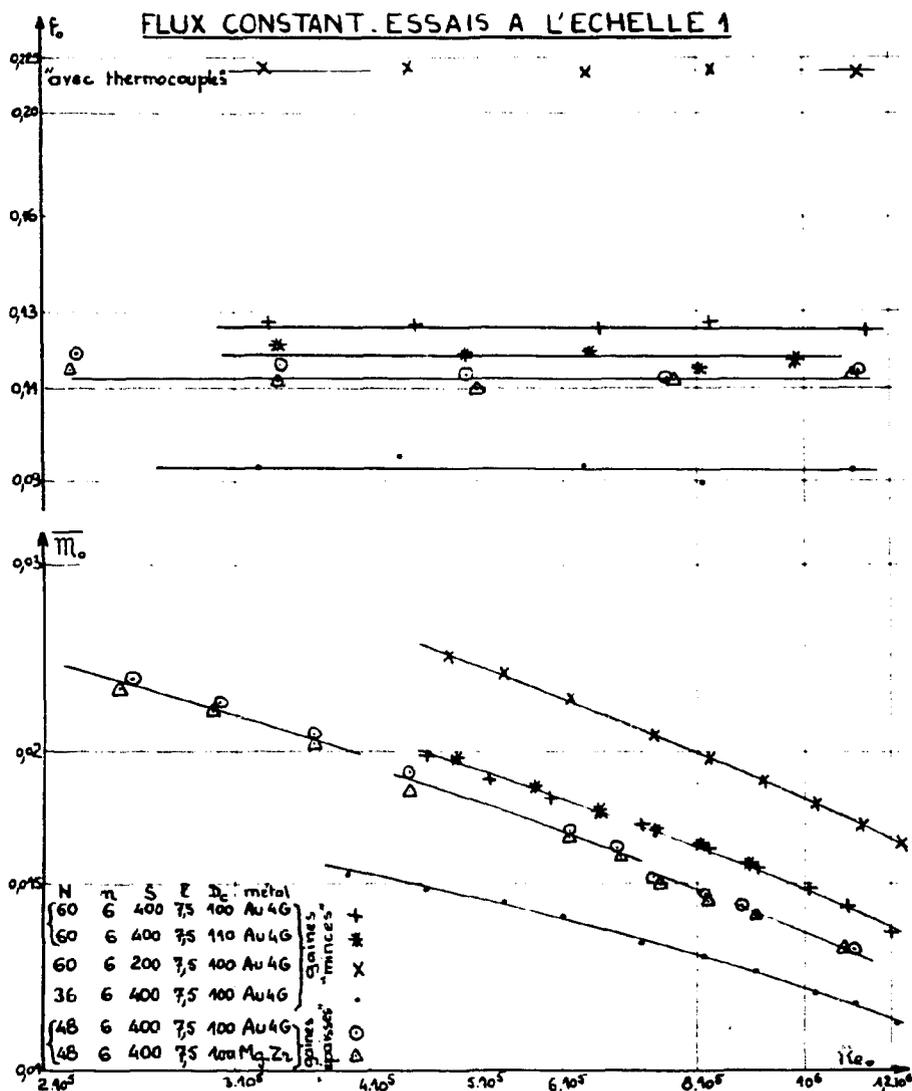


Figure 15

identique, l'une en AU4G, l'autre en Mg-Zr (48 ailettes, 6 secteurs pas 400 mm, hauteur d'ailette 7,5 mm). Les résultats sont donnés sur la figure 15 (points (O) pour l'Au4G et points (Δ) pour le Mg-Zr. Le coefficient de perte de charge f_0 ayant la même valeur pour les deux gaines, on peut penser que l'usinage des ailettes a été réalisé de façon parfaitement identique pour les deux gaines. On constate alors que le nombre de Margoulis est légèrement plus grand pour la gaine en AU4G, comme il fallait s'y

attendre; mais l'écart sur \overline{m}_0 entre les deux gaines est faible et ne dépasse pas en moyenne 2 %. Pour cette raison, dans le commentaire des résultats, nous ne distinguerons pas les gaines en AU4G de celles en Mg-Zr; la nature des gaines est seulement mentionnée dans les tableaux récapitulatifs.

γ) - Sur les courbes montrées en exemple sur la figure 13, on constate bien que, d'une part f_0 est pratiquement indépendant du nombre de Reynolds, d'autre part, que les courbes \overline{m}_0 (Re_0) sont toutes incurvées vers le bas. Cependant, dans tous les cas, la courbure est suffisamment faible pour qu'en pratique on puisse les assimiler à un segment de droite tout aussi représentatif des variations de \overline{m}_0 sur une plage relativement étendue du nombre de Reynolds. Un tel segment de droite, de pente $(-n)$ est représentatif d'une variation de \overline{m}_0 proportionnellement à Re_0^{-n} .

Nous avons comparé les valeurs de f_0 et \overline{m}_0 relatives aux différentes gaines pour un même nombre de Reynolds. Nous avons choisi pour celui-ci une valeur voisine de celles des réacteurs type EDF₂ et EDF₃, soit $Re_0 = 700.000$. Les valeurs de f_0 et de \overline{m}_0 sont indiquées dans le tableau N°12.

Nous avons également porté dans le tableau N°12, les valeurs de la pente $(-n)$ au point où $Re_0 = 700.000$.

Dans le cas des gaines "minces", nous donnons les valeurs de f_0 obtenues, les unes lorsque la cellule était équipée des barres d'arrivée de courant et des thermocouples, les autres après retrait de ces causes de perturbation. Nous avons pu remarquer en effectuant quelques essais, que la présence de barres d'arrivée de courant et de thermocouples dans l'écoulement était sans influence sur les répartitions et les valeurs absolues de \overline{m}_0 .

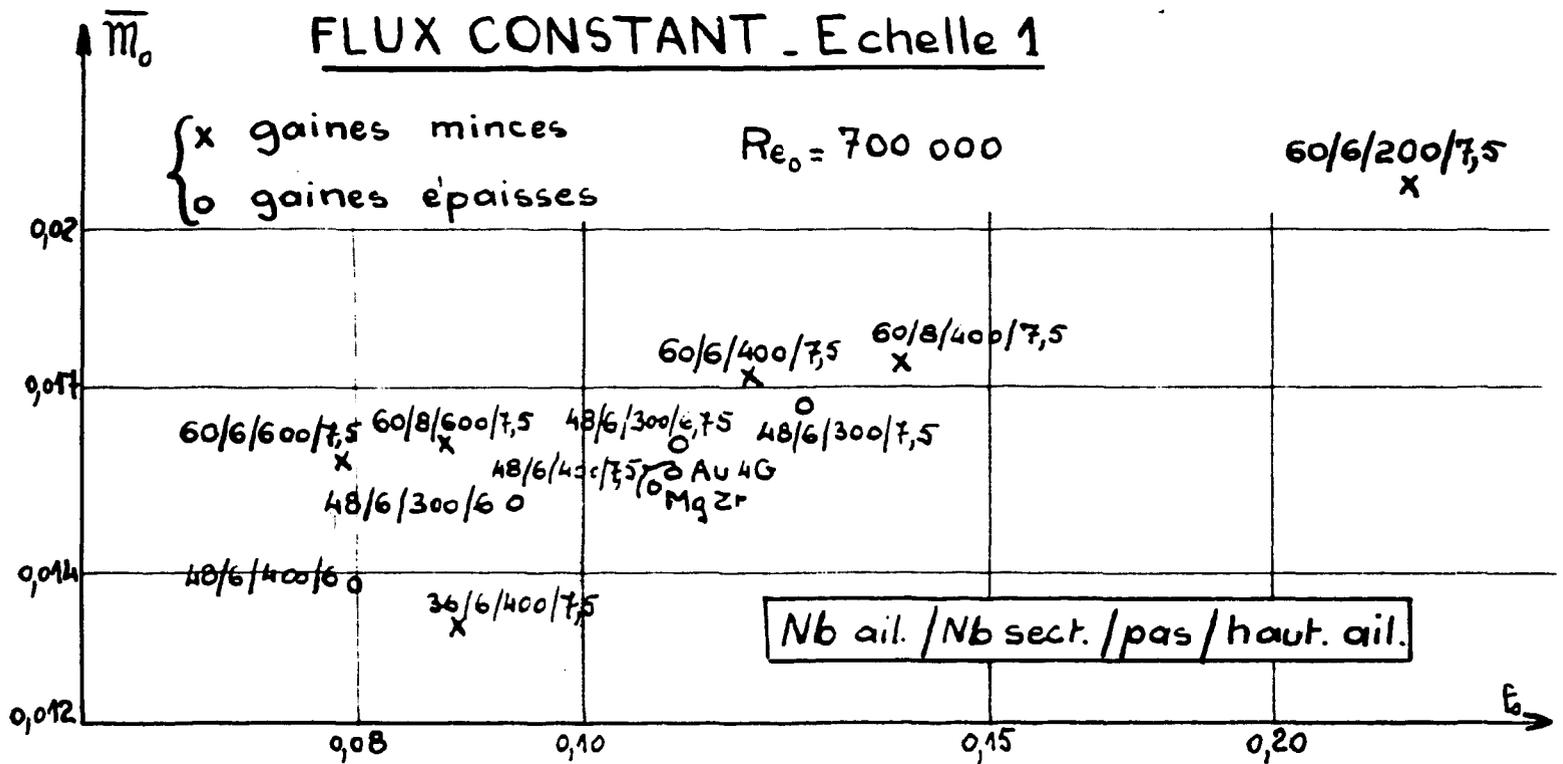


Figure 14

Sur la figure 14 sont portées les valeurs de \bar{m}_0 et de f_0 du tableau N°12 (coordonnées logarithmiques). Pour les gaines "minces" sont utilisées les valeurs f_0 "sans thermocouple". Les gaines épaisses n'ont pas été expérimentées sans thermocouples. Cependant, comme pour les gaines "minces" il apparaît que l'écart entre f_0 "avec thermocouples" et f_0 "sans thermocouple" est systématiquement de 5 % environ, nous avons retiré 5 % aux valeurs f_0 "avec thermocouples" relatives aux gaines "épaisses", et ce sont les nouvelles valeurs obtenues que nous avons portées sur la figure 14.

3 - Essais "isothermes".

Nous avons donné au Chapitre III la définition d'un nombre

de Margoulis global calculé uniquement à partir des températures d'entrée et de sortie du gaz, et de la température moyenne de l'eau circulant à l'intérieur des gaines.

Les résultats donnés sont relatifs à un ensemble de gaines que l'on peut classer en 3 séries (leurs caractéristiques géométriques sont données dans les tableaux N°15, 15 bis et 15 ter) :

TABLEAU N° 15

ESSAIS "ISOTHERMES"

- 1) hauteur d'ailette variable ($Re_o = 120.000$)
gaine 48 ailettes, 8 secteurs, pas 400 mm.

ϵ_m	l	e_b	e_p	f_o	$\overline{\pi}_o$
3,12	7,5	1,21	0,57	0,158	0,0293
3,06	6,7	"	0,45	0,132	0,0263
3,02	6	"	0,54	0,11	0,0240
2,97	5	"	0,65	0,084	0,0212
2,92	4	"	0,76	0,068	0,0179
2,86	3	"	0,88	0,0535	0,0143
2,82	2,2	"	0,97	0,0450	0,0111
2,78	1,5	"	1,05	0,0355	0,0082
2,75	1	"	1,10	0,0305	0,00645
2,72	0,5	"	1,16	0,0228	0,00383
	0	-	-	0,0208	0,00285

TABLEAU N°15 bis

ESSAIS "ISOTHERMES"

II) Profil des ailettes constant.

Re₀ = 100.000

N	ϵ_m	n	S	l	e _p	e _b	s ₁₀₀	ép. rai- nure	Métal	f ₀	\overline{m}_0	Pente n (R ₀ , R _e)
68	2,265	12	1055	6	0,28	1,04	6112	1,15	Mg-Zr	0,0482	0,01265	0,31
67	2,27	6	690	6	0,27	1,12	6081	1,75	Mg-Zr	0,0501	0,0127	0,22
67	2,27	8	690	6	0,35	1,02	6100	1,15	Mg-Zr	0,0572	0,01345	0,25
67	2,27	12	690	6	0,24	1,01	6099	1,75	Mg-Zr	0,0677	0,0136	0,36
67	2,27	16	690	6	0,31	1,04	6117	1,75	Mg-Zr	0,0756	0,0137	0,33
66	2,27	8	610	6	0,33	1,03	6101	1,15	Mg-Zr	0,0643	0,0141	0,36
65	2,275	6	506	6	0,43	1,05	6052	1,75	Mg-Zr	0,0599	0,0137	0,24
65	2,275	8	506	6	0,41	0,97	6073	1,75	Mg-Zr	0,0781	0,01465	0,38
65	2,275	12	506	6	0,42	0,96	6085	1,15	Mg-Zr	0,0859	0,0145	0,28
64	2,28	4	442	6	0,44	1,05	6042	1,15	Mg-Zr	0,0550	0,0131	0,22
64	2,28	6	442	6	0,40	1,04	6043	1,15	Mg-Zr	0,0692	0,01445	0,34
64	2,28	8	442	6	0,21	1,05	6062	1,75	Mg-Zr	0,0884	0,0148	0,41
62	2,29	6	360	6	0,47	1,11	6002	1,75	Mg-Zr	0,0835	0,01485	0,28
62	2,29	12	360	6	0,37	1,16	6053	1,15	Mg-Zr	0,1277	0,0156	0,40
60	2,295	4	310	6	0,31	1,20	6029	1,75	Mg-Zr	0,0805	0,0141	0,38
60	2,295	6	310	6	0,26	1,20	6016	1,75	Mg-Zr	0,0992	0,01585	0,25
60	2,295	8	310	6	0,28	1,23	6008	1,75	Mg-Zr	0,1168	0,0161	0,45
60	2,295	12	310	6	0,36	1,21	6032	1,75	Mg-Zr	0,153	0,0166	0,45
58	2,22	4	264	6	0,42	1,06	6000	1,75	Mg-Zr	0,0982	0,01485	0,26
52	2,345	4	202	6	0,36	1,14	5974	1,75	Mg-Zr	0,127	0,0161	0,27
52	2,345	6	202	6	0,47	1,17	5953	1,75	Mg-Zr	0,157	0,0177	0,41
52	2,345	8	202	6	0,31	1,23	5977	1,75	Mg-Zr	0,196	0,0183	0,41
46	2,385	4	160	6	0,24	1,18	5923	1,15	Mg-Zr	0,148	0,0168	0,27
46	2,385	6	160	6	0,44	1,15	5926	1,75	Mg-Zr	0,218	0,0183	0,41
33	2,445	6	97	6	0,41	1,26	5830	1,75	Mg-Zr	0,216	0,0103	0,41

TABLeAU 15 ter

ESSAIS ISOTHERMES

Re₀ = 700.000

N	c _m	n	s	l	e _p	e _b	S ₁₀₀	ép. rai- nure	Métal	f ₀	$\overline{\mu}_0$	Pente n $\mu_0(R_{e_0})$
48	3,16	4	600	7,5	0,60	1,50	5929	2,5	AU-4G	0,0565	0,0122	0,35
48	3,12	4	400	7,5	0,41	1,22	5983	2,5	AU-4G	0,0825	0,0135	0,38
48	3,12	6	400	7,5	0,35	1,38	6011	2,5	Mg-Zr	0,108	0,0145	0,32
48	3,12	8	400	1,5	(0,37)	(1,21)	5990	2,5	AU-4G	0,134	0,0136	0,45
48	2,88	6	300	6	0,80	1,33	5902	2,5	Mg-Zr	0,0903	0,0149	0,39
60	2,33	6	300	7	0,50	1,73	5794	2,3	Mg-Zr	0,101	0,0159	0,39
80	1,74	6	300	6	0,36	(0,70)	5971	2,5	Mg-Zr	0,108	0,0183	0,40
48	2,60	4	200	7,5	0,34	1,13	5836	2,5	AU-4G	0,180	0,0176	0,41
48	2,60	6	200	7,5	0,38	1,28	5845	2,5	AU-4G	0,209	0,0134	0,44

NOTA : Les valeurs entre parenthèses sont des cotes relevées sur plans qui ne correspondent pas obligatoirement à la réalité.

- 11 gaines avec ailettes de hauteur différente, jusqu'à hauteur nulle (tube lisse), en pratique ces gaines ont été obtenues à partir d'une seule gaine dont on a usiné les ailettes.
- 25 gaines pour lesquelles la section de passage du fluide dans les sous-canaux (entre les ailettes) est la même; seuls varient le pas et le nombre de secteurs, variations combinées de telle manière que la longueur du sous-canal soit la même pour certains groupes de gaines.
- 9 autres gaines n'ayant pas entre elles de caractère commun particulier.

Toutes les gaines ont été expérimentées de la même manière: même diamètre intérieur $D_0 = 40$ mm, même diamètre en base d'ailette ($D_1 = 43,6$ mm), même diamètre du canal ($D_c = 100$ mm). Le nombre de Reynolds Re_0 a varié de 10^5 à $7 \cdot 10^5$.

Pour chacune des gaines, nous avons mesuré f_0 et \overline{M}_0 en fonction de Re_0 . Les courbes de variations obtenues sont analogues à celles de la figure 6, obtenues dans les essais avec flux de chaleur constant. Nous avons relevé les valeurs de f_0 et de \overline{M}_0 correspondant à $Re_0 = 120.000$ pour la première série de gaines, et à $Re_0 = 700.000$ pour les deuxième et troisième séries.

Dans les tableaux N° 15, 15 bis et 15 ter, sont données les valeurs de f_0 et de \overline{M}_0 ainsi que la pente $-n$ obtenues pour chacune des gaines.

Les résultats relatifs à ces 3 séries de gaines sont reportés successivement sur les figures 16, 17, 18, 19 et 20.

ESSAIS ISOTHERMES

HAUTEUR D'AILETTES VARIABLE
(gaine 4B ail, 8sect, pas 400mm)

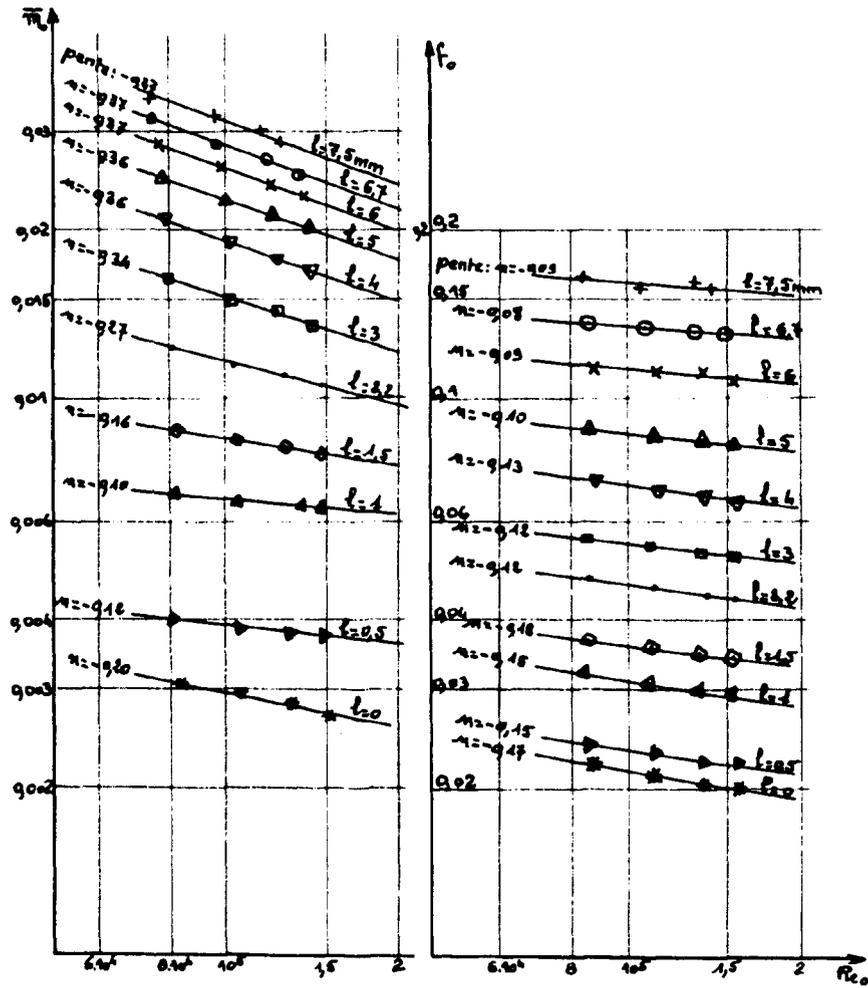


Figure 16

ESSAIS ISOTHERMES

HAUTEUR D'AILETTES VARIABLE
(Gaine 4B ail, 8sect, pas 400mm)

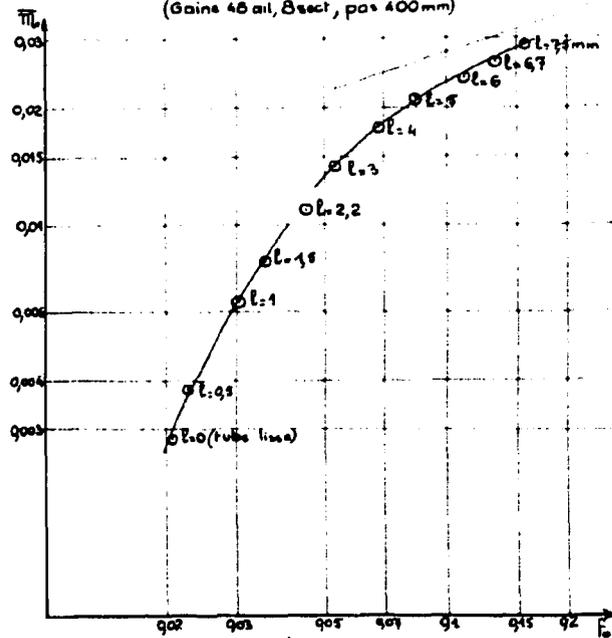


Figure 17

ESSAIS ISOTHERMES. PROFIL DES AILETTES CONSTANT.
VARIATION DU PAS ET DU NOMBRE DE SECTEURS

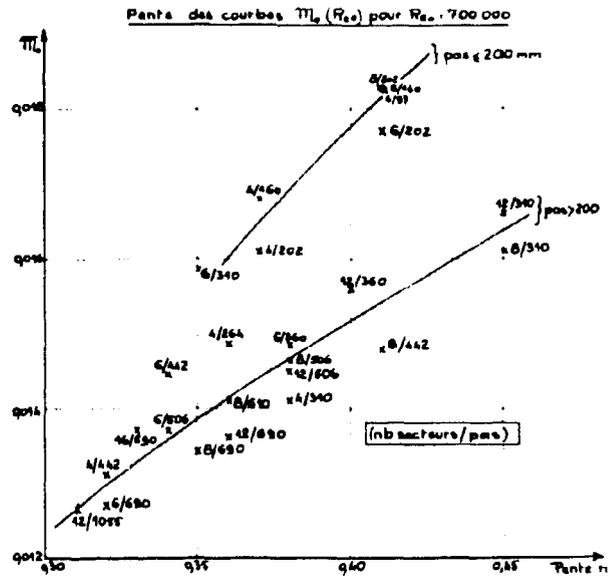


Figure 18

ESSAIS ISOTHERMES. PROFIL DES AILETTES CONSTANT.
VARIATION DU PAS ET DU NOMBRE DE SECTEURS.

$Re_0 = 700\ 000$

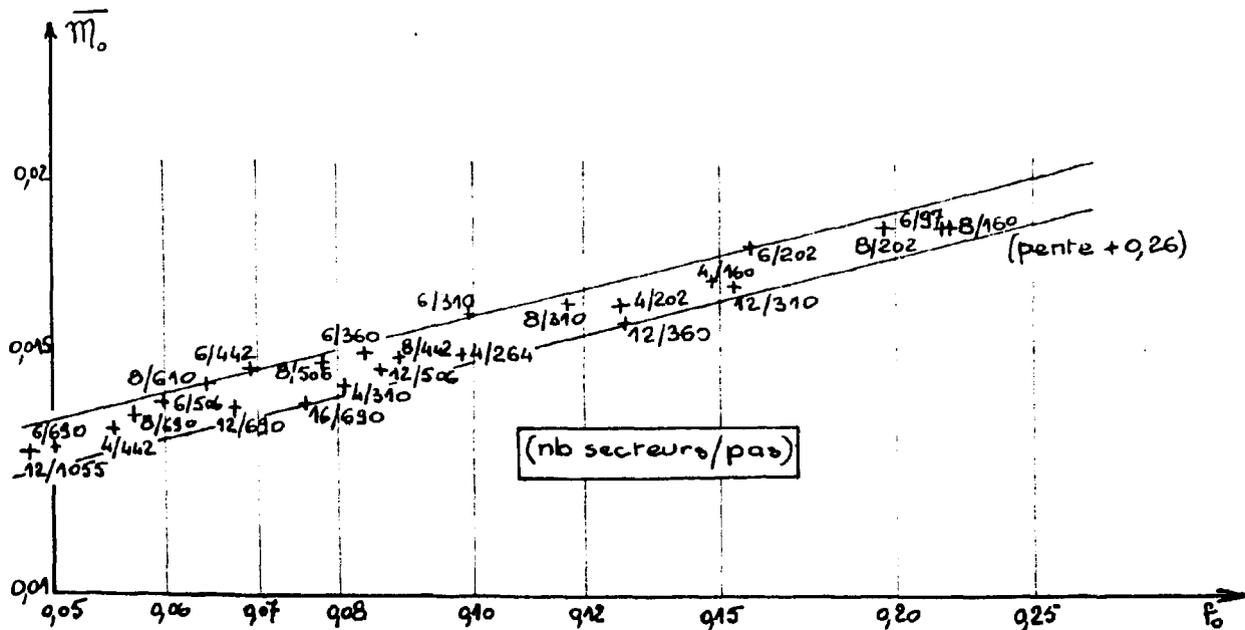


Figure 19

a) - Influence de la hauteur des ailettes.

a) - Sur la figure 16, on constate que f_0 décroît quand Re_0 croît. Ce résultat n'a été observé qu'aux bas nombres de Reynolds. Ce n'est que pour les nombres de Reynolds plus élevés que f_0 tend à devenir constant.

β) - Sur la figure 16 également, on observe autour de certaines valeurs de la hauteur d'ailette des changements nets de pente (-n) des courbes \overline{M}_0 (Re_0), ce qui permet de supposer que les phénomènes changent brusquement de nature.

Autour de $l = 2,2$ mm, il est probable que l'on quitte l'écoulement en chevron pour passer à un écoulement parallèle à l'axe de la gaine sur paroi rugueuse. Quand la hauteur est nulle, on retrouve les lois de variation du tube lisse : f_0 et \overline{M}_0 proportionnels à $Re_0^{-0,2}$.

b) - Variation du pas et du nombre de secteurs,
le profil des ailettes restant constant.

L'examen des résultats relatifs à la deuxième série de gaines (sous-canal constant), suggère les remarques suivantes :

a) - Sur la figure 18, nous avons porté les valeurs de \overline{M}_0 correspondant à chacune des 25 gaines expérimentées en fonction de la pente (-n) des courbes \overline{M}_0 pour $Re_0 = 700.000$. Dans l'ensemble, les points se groupent suivant deux directions, l'une correspondant à des valeurs du pas supérieures à 200 mm, l'autre à des valeurs égales ou inférieures à 200 mm. L'augmentation de n en même temps que celle de \overline{M}_0 s'explique par le rôle joué par l'efficacité des ailettes; la pente n est d'autant plus grande que l'efficacité des ailettes est plus faible, c'est-à-dire, puisque dans le cas présent la géométrie de l'ailette et du sous-canal est inchangée, que le coefficient d'échange thermique

local sur la paroi des ailettes est plus grand.

En somme, ce coefficient d'échange local constitue un pivot : quand il croît, M_0 croît, l'efficacité des ailettes diminue, donc n croît.

Il faut donc supposer que lorsque le pas varie, le coefficient d'échange local augmente quand le pas diminue.

L'existence de deux courbes au lieu d'une seule suppose que le phénomène aérodynamique dans les sous-canaux change brusquement de nature pour une valeur du pas légèrement supérieure à 200 mm. probablement (soit une valeur de l'angle moyen d'inclinaison des ailettes comprise entre 35 et 40°).

β) - On doit noter une autre conclusion importante. Il paraît remarquable sur la figure 19 que les points s'inscrivent entre deux lignes très proches l'une de l'autre (ces deux lignes pouvant être assimilées à des droites que l'on peut tracer parallèles), leur distance se chiffrant par une variation de 8 % sur $\overline{M_0}$ pour une même valeur de f_0 .

4 - Conclusions communes aux résultats des essais sur les trois types de cellules.

a) - Essais à flux constant : échelle 2,5 et échelle 1.

Dans la mesure où les lois de similitude sont bien respectées en ce qui concerne les essais à grande échelle (similitude sur la géométrie, sur les conditions aérodynamiques et thermiques, et sur l'efficacité des ailettes^(*)), les valeurs

(*) Les conditions de similitude sur l'efficacité des ailettes sont réalisées quand on raisonne à même nombre de Reynolds Re_0 , lorsque la quantité $\frac{\lambda}{\lambda_g} \times P_r^\alpha$ garde la même valeur. (λ et λ_g sont les coefficients de conductibilité du fluide et de la gaine, P_r le nombre de Prandtl du fluide).

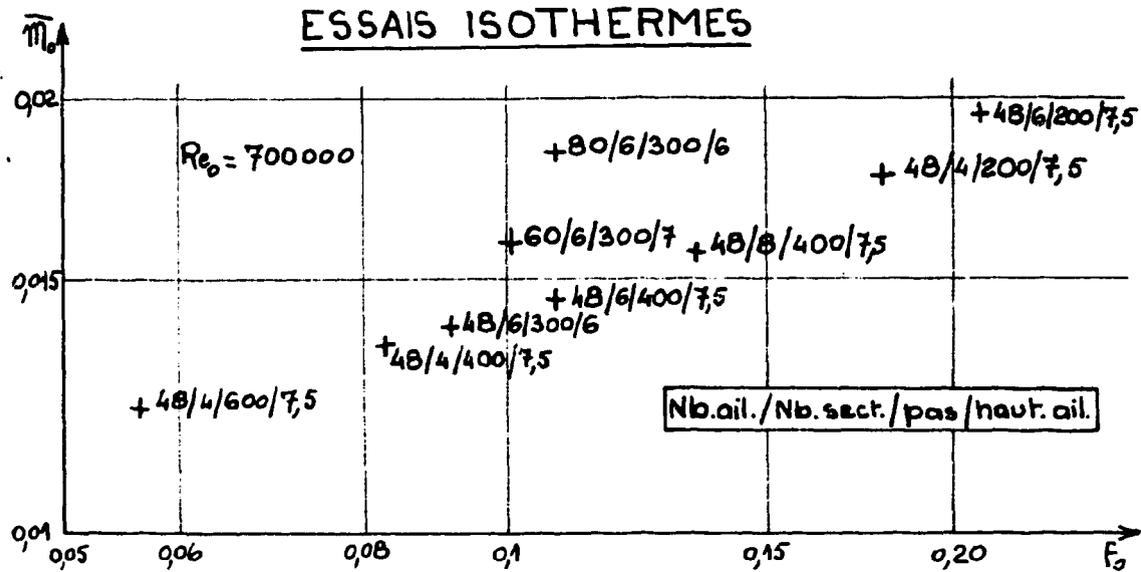


Figure 20

absolues de \overline{m}_0 et de f_0 devraient être égales à celles obtenues sur les mêmes gaines à l'échelle 1 avec gaz sous pression.

Sur la figure 21, nous portons les résultats obtenus dans les deux cellules et relatifs au même profil de gaine (48 ailettes, 6 secteurs, pas 400 mm, hauteur d'ailette 7,5 mm) à une légère différence près cependant sur l'épaisseur des ailettes (0,57/1,21 à "l'échelle 1" et 0,6/1,4 à "l'échelle 2,5"). Les résultats à "l'échelle 2,5" sont pris sur la figure 9, et ceux à "l'échelle 1" sur la figure 13.

On constate que les résultats coïncident de façon très satisfaisante.

COMPARAISON ENTRE ESSAIS A GRANDE ECHELLE ET ESSAIS A L'ECHELLE 1

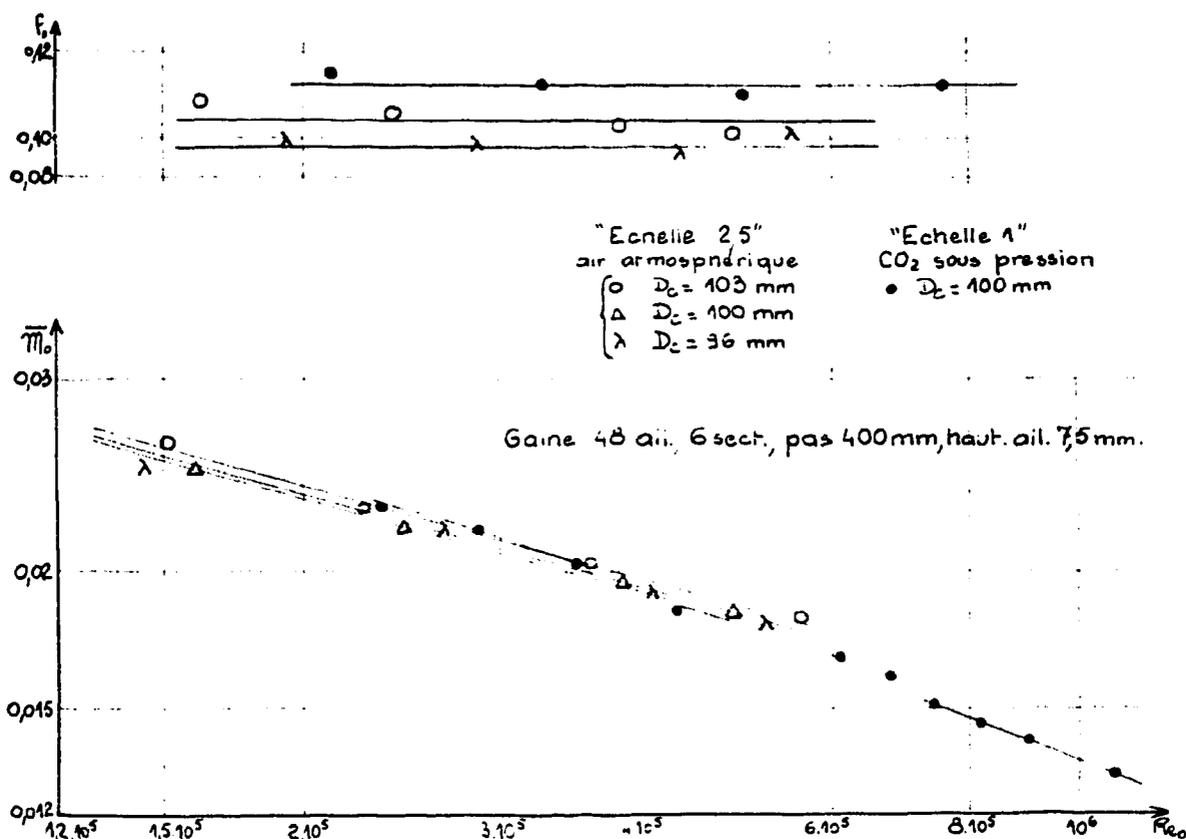


Figure 21

b) essais à flux constant et essais isothermes.

Lorsque les essais à température constante ont été lancés, nous n'attendions des résultats que des indications d'ordre qualitatif permettant une discrimination rapide entre les performances de différentes gaines. Pour cette raison, les essais avaient débuté en utilisant de l'air à la pression atmosphérique avec des nombres de Reynolds faibles (ne dépassant pas $1,5 \cdot 10^5$). En fait, on s'est aperçu qu'il était possible de tirer un parti plus complet de ces résultats d'essai.

Certes, dans ces essais les lois de similitude ne sont pas en tout point respectées: sur le contour intérieur de la gaine

on a une condition de température constante et non une condition de densité de flux de chaleur constante. On ne doit donc pas s'attendre à trouver les mêmes valeurs absolues. Cependant, il est concevable, en se fondant sur le fait que la similitude sur les conditions aérodynamiques est bien respectée, d'envisager une comparaison d'ordre quantitatif sur les valeurs relatives.

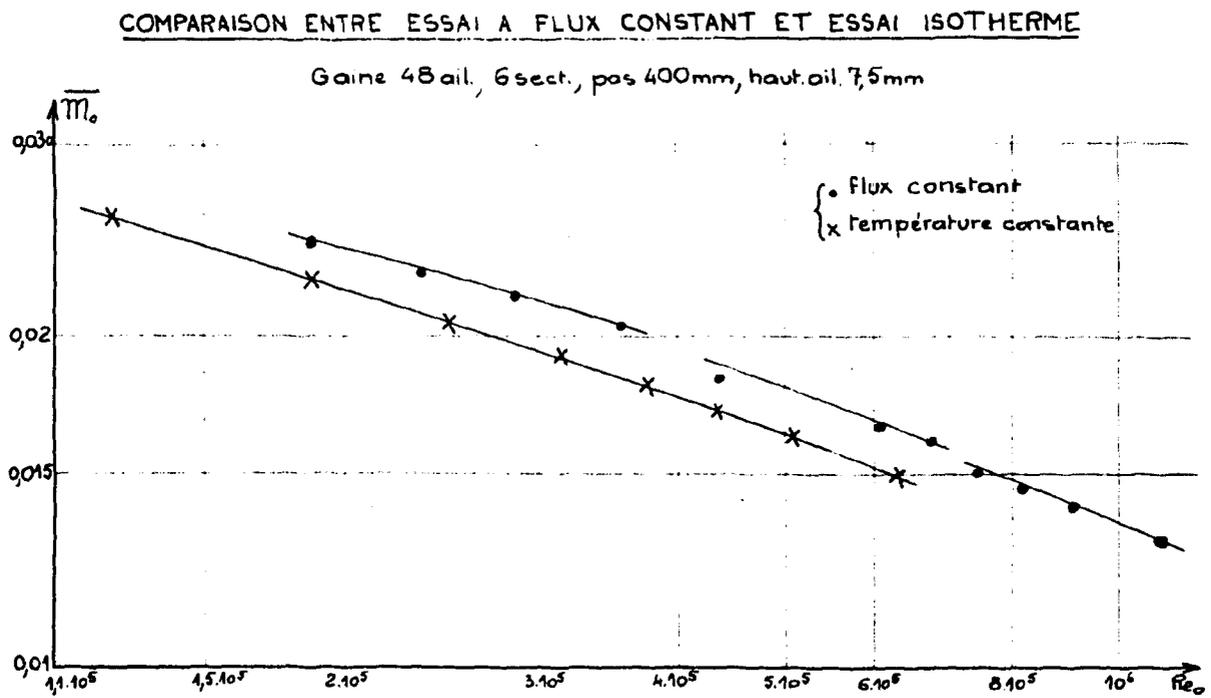


Figure 22

Sur la figure 22 sont portées donc les courbes de variation de \overline{m}_0 en fonction de Re_0 , relatives à une même gaine mais correspondant aux deux modes de chauffage. On constate que ces

courbes sont voisines et de plus, sensiblement parallèles. Ce résultat a été observé également dans d'autres cas. Il s'ensuit que, sans aller jusqu'à considérer que les valeurs de $\overline{\mu}_0$ en essais "isothermes" doivent être retenues en valeur absolue (car bien que voisines, les courbes observées sont écartées l'une de l'autre d'une grandeur qui dépasse probablement l'imprécision des mesures), on peut prendre en considération les écarts relatifs entre les valeurs $\overline{\mu}_0$ des différentes gaines.

Nous avons ensuite recalé ces valeurs de $\overline{\mu}_0$ avec les quelques valeurs obtenues dans les essais à flux constant, valeurs considérées comme absolues. Il a été alors procédé de la manière suivante:

Nous avons reproduit sur la figure 23 les résultats des essais à flux constant "échelle 1" qui avaient déjà été portés sur la figure 14. Sur la figure 23, nous avons également porté des résultats d'essais isothermes; mais au lieu de porter la valeur de $\overline{\mu}_0$ véritablement obtenue dans ces essais, nous avons systématiquement majoré celle-ci d'un même pourcentage de façon à retrouver les valeurs obtenues à flux constant. Pour fixer ce pourcentage, il est nécessaire de considérer simultanément l'ensemble des valeurs. Pour cette raison, nous avons utilisé directement les figures où sont représentées d'une part, les valeurs relatives aux essais à flux constant (figure 14) et d'autre part, celles relatives aux essais "isothermes" (figure 20). Nous avons fait subir à la figure 20 une translation parallèle à l'axe des ordonnées (axe des $\overline{\mu}_0$), ce qui revient dans une représentation logarithmique à faire varier toutes les valeurs $\overline{\mu}_0$ d'un même pourcentage. Par cette translation, on essaie de faire coïncider deux à deux les points relatifs aux quelques gaines essayées à la fois à flux constant et à température constante. Comme cette coïncidence ne peut être rigoureuse simultanément pour tous les points, nous nous sommes donc ingéniés à placer les points les uns par rapport aux autres de façon à obtenir une

10 et 24). Sur la figure 25, sont portés l'ensemble des points : résultats des essais à grande échelle et à l'échelle 1 , et résultats des essais "isothermes" recalés (4 profils de gaine expérimentés à la fois dans la cellule "isotherme" et dans "une cellule à flux constant" ont permis ce recalage).

Sur la figure 25, on constate que les points représentatifs des gaines expérimentées se placent à l'intérieur d'une bande relativement étroite et très allongée. Ce résultat peut provenir du choix particulier du domaine dans lequel varient les paramètres géométriques étudiés. Cependant, les principaux paramètres (nombre de secteurs, pas, hauteur d'ailettes) ont varié à l'intérieur d'une plage relativement étendue :

$4 < n < 8$ secteurs, $200 < \text{pas} < 600$ mm et $6 < \text{hauteur ailette} < 10,2$ mm.

Le résultat constaté sur la figure 25 tend donc à montrer qu'à nombre d'ailettes donné les courbes iso-"nombre de secteurs", iso-"pas" et iso-"hauteur d'ailettes" sont sensiblement confondues. Dans ces conditions, la largeur de la bande ne dépend que du nombre d'ailettes. Ce même résultat pour les courbes iso-"nombre de secteurs" et iso-"pas" a déjà été constaté sur la figure 19.

Si l'on compare les résultats en s'en tenant à une première approximation, on peut aller plus avant dans les conclusions et dire que les courbes iso-"nombre de secteurs", iso-"pas" et iso-"hauteur d'ailettes" sont pratiquement confondues suivant une même courbe, quand on raisonne à nombre d'ailettes donné. Nous avons tracé sur la figure 25 deux courbes correspondant aux nombres d'ailettes 48 et 60, courbes que nous n'avons cependant pas prolongées dans le domaine des "pas courts".

TABLEAU N° 24

COMPARAISON entre RESULTATS sur les TROIS
TYPES de CELLULE d'ESSAIS.

Re_o = 400.000

N	n	S _{mm}	l _{mm}	f _o	$\overline{\mu}_o$ 10 ³
<u>I/ - Essais à grande échelle</u>					
48	6	400	10,2	0,1675	24,3
48	6	400	7,5	0,1025	19,75
48	4	400	10,2	0,137	20,2
48	4	400	7,5	0,0873	17,1
48	4	400	6	0,0645	14,85
48	8	400	10,2	0,25	24,0
48	8	400	7,5	0,128	19,7
<u>II/- Essais à l'échelle 1 (flux constant)</u>					
36	6	400	7,5	0,088	15,2
48	6	300	6	0,093	17,8
48	6	300	6,75	0,110	19,6
48	6	300	7,5	0,125	21,0
48	6	400	6	0,0795	16,8
48	6 (AU4G)	400	7,5	0,109	19,5
48	6 (MgZr)	400	7,5	0,107	19,0
60	6	200	7,5	0,23	26,6
60	6	400	7,5	0,118	21,2
60	6	600	7,5	0,0785	18,4
60	8	600	7,5	0,087	19,4
<u>III/- Essais "isothermes"</u>					
48	4	200	7,5	0,18	22,2
48	4	400	7,5	0,0825	16,6
48	4	600	7,5	0,0565	14,6
48	6	200	7,5	0,209	25,1
48	6	300	6	0,0903	18,2
48	6	400	7,5	0,108	17,6
48	8	400	7,5	0,154	20,2
60	6	300	7	0,101	19,6
80	6	300	6	0,108	22,8

COMPARAISON ENTRE ESSAIS A FLUX CONSTANT (grande échelle et échelle 1, ET ESSAIS ISOTHERMES.

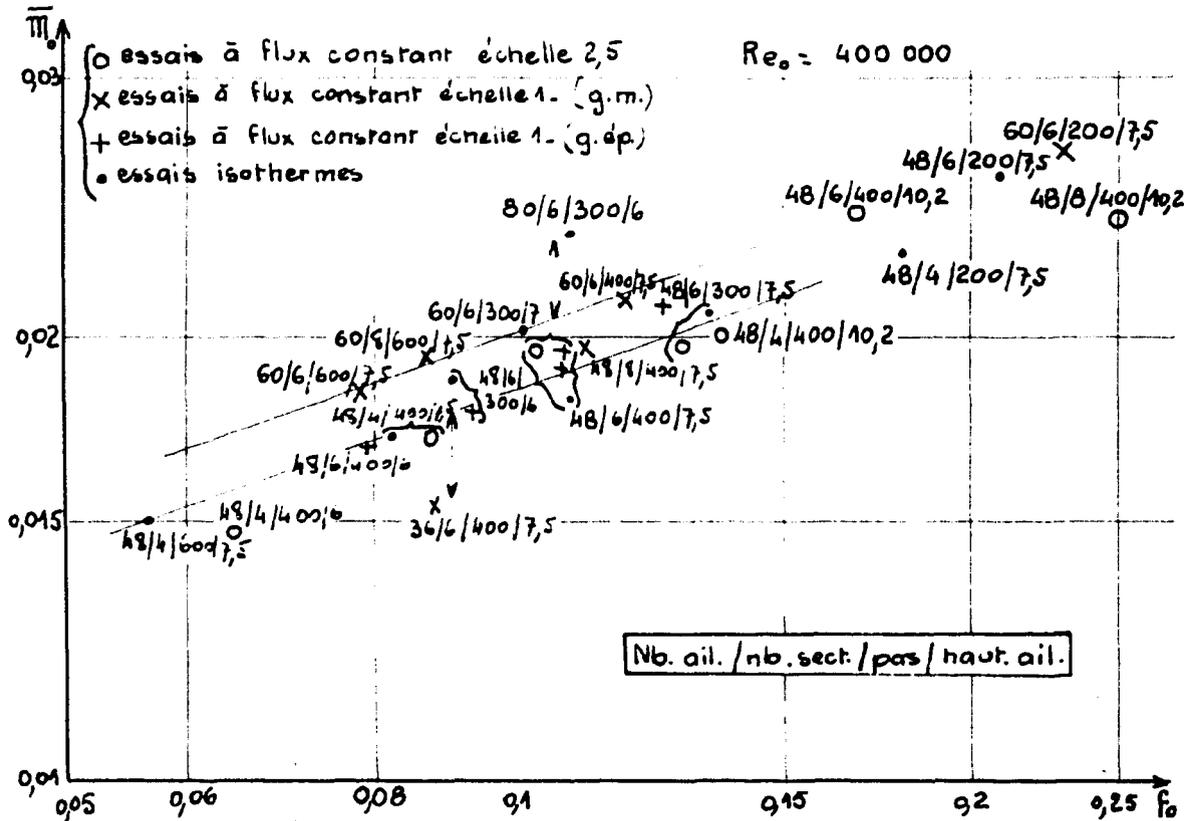


Figure 25

Il y a bien une dispersion non négligeable des points autour de chacune de ces courbes. Elle est due certes au fait que ce qui vient d'être affirmé n'est pas rigoureusement exact, mais elle peut être due aussi à l'imprécision expérimentale.

Les deux courbes de la figure 25 sont représentées par des droites que nous avons tracées parallèles entre elles. Leur distance correspond à une variation de $\overline{f_0}$ de 9 % pour une même valeur de f_0 . Si l'on regarde les valeurs extrêmes du nombre d'ailettes expérimentées (36 et 80), on constate que pour l'ensemble des valeurs 36, 48, 60 et 80 du nombre d'ailettes N,

le nombre de Margoulis $\overline{\mathcal{M}}_0$ pour une même valeur de f_0 est proportionnel à N^β , β étant constant. Dans le cas de la figure 25, soit pour $Re_0 = 400.000$, on a $\overline{\mathcal{M}}_0$ sensiblement proportionnel à $N^{0,4}$.

II - SINGULARITES THERMIQUES.

Nous rappelons la définition des facteurs de singularités circonférentielle et longitudinale données au chapitre III.

- facteur de singularité circonférentielle $f_c = \frac{\overline{\mathcal{M}}_{0s}}{\mathcal{M}_{0G}}$,
égal au quotient de la moyenne arithmétique
des valeurs du nombre de Margoulis \mathcal{M}_{0s} sur les génératrices
de sortie dans une section droite, à la valeur \mathcal{M}_{0G} mesurée
sur une des génératrices médianes.

- facteur de singularité longitudinale $f_l = \frac{\mathcal{M}_{0\min}}{\overline{\mathcal{M}}_{0G}}$,
égal au quotient du nombre de Margoulis minimum
sur la génératrice médiane de mesure, à la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}}_{0G}$
sur cette même génératrice.

La valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}}_0$ pour l'ensemble de la gaine correspondant à une moyenne des valeurs $\overline{\mathcal{M}}_{0G}$ sur les différentes génératrices médianes des différentes gaines, il s'ensuit qu'en première approximation (c'est-à-dire en ne tenant pas compte de l'existence de dissymétries éventuelles du phénomène autour de la gaine, la valeur du nombre de Margoulis minimum minimorum sur l'ensemble des gaines est égal à

$$\overline{\mathcal{M}}_0 \times f_l \times f_c .$$

1 - Singularités circonférentielles.

Le calcul se prête mal à l'évaluation de l'amplitude des singularités circonférentielles. A la rigueur il peut intervenir, mais malgré tout de façon très grossière, pour

donner le sens d'évolution de cette amplitude, soit en fonction du débit pour une même gaine, soit d'une gaine à une autre pour un même débit. Nous considérerons successivement ces deux aspects.

a) - Variation de f_c en fonction du débit.

On peut, à priori, prévoir quel doit être le sens de variation, bien qu'il y ait superposition de deux phénomènes dont les effets tendent à jouer en sens inverse.

α) - il existe un phénomène de conduction dans l'épaisseur de la gaine qui tend à amortir l'écart de températures entre les génératrices d'entrée et de sortie. Lorsque le débit du gaz augmente, le coefficient d'échange thermique augmente; il s'ensuit que, pour un flux de chaleur donné, l'écart des températures entre les génératrices d'entrée et de sortie prend relativement plus d'importance par rapport à l'écart des températures entre la gaine et le gaz qui, lui, diminue. Donc, on devrait s'attendre à une diminution du facteur f_c de singularité circonférentielle lorsque le débit augmente.

β) - Supposons que la valeur du flux de chaleur reste constante. L'échauffement $\Delta \tau$ du gaz dans le sous-canal est proportionnel à l'inverse de la vitesse débitante (v) dans le sous-canal. M_0 étant proportionnel à Re_0^{-n} ou à v^{-n} (vitesse débitante dans l'écoulement principal), il s'ensuit que l'écart entre les températures t_0 de la gaine et θ du gaz est proportionnel à v^{n-1} . Si l'on suppose qu'il existe un rapport constant entre v et V quel que soit le débit (ce qui n'est pas loin d'être exact); il s'ensuit que l'échauffement relatif $\frac{\Delta \tau}{t_0 - \theta}$ est proportionnel à V^{-n} , donc diminue

quand la vitesse augmente. Il s'ensuit que l'on devrait observer corrélativement une augmentation de f_c lorsque le débit augmente.

Comme l'effet dû à la conduction (α) doit être sensible surtout aux faibles débits, alors que l'effet (β) doit conserver la même importance pratiquement quel que soit le débit, on devrait au total observer, d'abord une diminution puis une augmentation de f_c en fonction de Re_0 .

Les essais à grande échelle ont été effectués avec des nombres de Reynolds compris entre 10^5 et $5 \cdot 10^5$. Sur la figure 2b, nous donnons les valeurs de f_c en fonction de Re_0 .

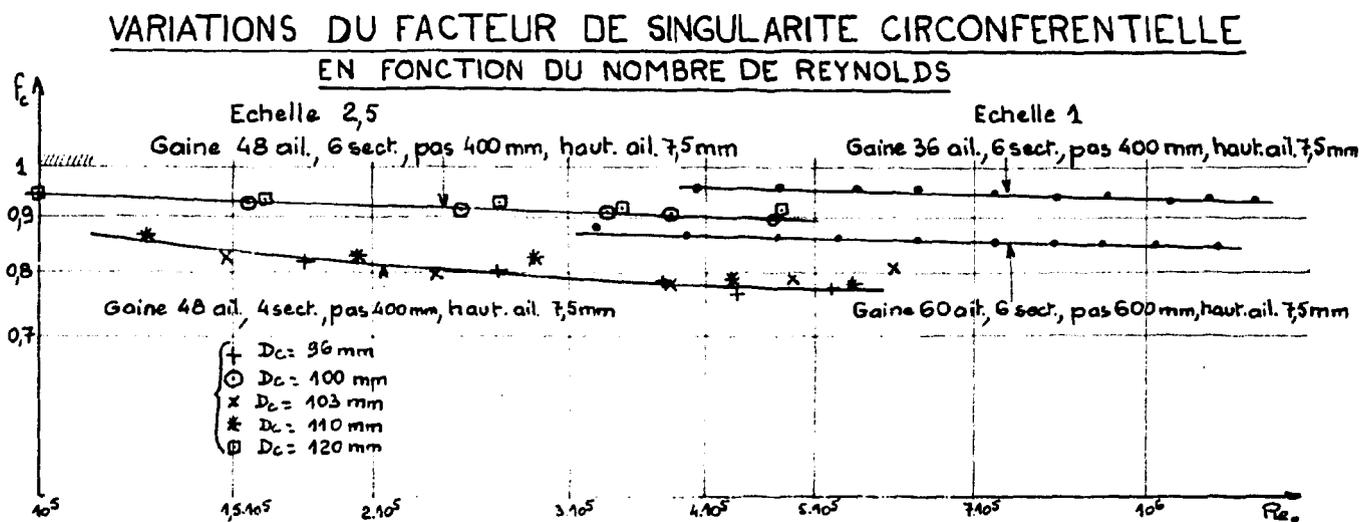


Figure 2b

pour les deux gaines "48 ailettes, pas 400 mm, hauteur d'ailette 7,5 mm" 4 et 6 secteurs. On observe une diminution de f_c en fonction du débit, ce qui laisse supposer que l'on est dans la plage des débits où le phénomène de conduction joue un rôle prépondérant. Sur la même figure sont portés des résultats relatifs à deux gaines essayées à l'échelle 1 (36 ailettes, 6 secteurs, pas 400 mm; et 60 ailettes, 6 secteurs, pas 600 mm). Re_0 varie jusqu'à $1,2 \cdot 10^6$. La diminution de f_c est moins accentuée et f_c tend à devenir constant. On n'observe pas cependant de remontée de f_c pour les grandes valeurs de Re_0 comme on s'y attendait; sans doute ce phénomène se produit-il pour des valeurs de Re_0 encore plus élevées. Dans ces conditions, l'hypothèse présentée plus haut (β) laisse supposer que la valeur pratiquement constante observée pour f_c entre $Re_0 = 0,6 \cdot 10^6$ et $1,2 \cdot 10^6$ constitue en réalité une valeur minimum pour f_c .

b) - Valeur de f_c attachée à chaque type de gaine

Les valeurs de f_c que l'on est amené à utiliser dans la pratique sont relatives à des nombres de Reynolds élevés (Re_0 de l'ordre de $0,7 \cdot 10^6$ ou plus) pour lesquels f_c a atteint sa valeur minimum.

α) - Essais à grande échelle.

Dans un premier temps, nous donnerons cependant les résultats obtenus pour un nombre de Reynolds inférieur ($Re_0 = 0,4 \cdot 10^6$) dans les essais à grande échelle, pour lequel f_c n'a pas atteint de valeur minimum - ce qui a été observé pour la totalité des gaines expérimentées -. Nous rappelons que pour ces gaines variaient : le nombre de secteurs, la hauteur des

ailettes et le diamètre du canal. Dans le tableau N°27, sont portées les valeurs de f_c correspondant à chaque cas.

Les résultats montrent - ce que d'ailleurs un raisonnement simple permettait d'attendre - une variation sensible de f_c quand le nombre de secteurs varie, et une variation par contre négligeable quand varie la hauteur des ailettes.

La légère variation de f_c liée au diamètre d'un canal semble imputable à l'imprécision des mesures. C'est pour cette raison que nous avons porté dans une colonne supplémentaire du tableau 27 une valeur moyenne de f_c pour chaque gaine.

β) - Essais à l'échelle 1.

Nous donnons dans le tableau 28 les valeurs de f_c (qui sont constantes au delà de $Re_o = 700.000$) correspondant aux différentes gaines (résultats relatifs aux gaines "minces" seulement).

Pour comparer les résultats entre eux, nous avons effectué un calcul très schématique tendant à évaluer l'échauffement relatif du gaz dans les sous-canaux en fonction des dimensions de ceux-ci. La valeur de f_c ainsi calculée devait en première approximation être proportionnelle à celle obtenue par l'expérience. Sur une colonne supplémentaire du tableau 28, sont portées ces valeurs f_c calculé. Il semble que l'on obtienne une cohérence entre les résultats assez satisfaisante, sauf peut-être pour la gaine "60 ailettes, 6 secteurs, pas 200 mm" (voir également la figure <9).

VALEURS du FACTEUR de SINGULARITE CIRCONFERENCELLLE (f_c)
pour les GAINES EXPERIMENTEES à GRANDE ECHELLE (échelle 2,5).

nb. de secteurs	hauteur ailette	Diamètre du canal	f_c	f_c moy	
4	10,2	110	0,792) 0,805	
	"	103	0,816		(
	7,5	110	0,801) 0,79	
	"	103	0,778		(
	"	96	0,784)
	6	110	0,830) 0,82	
	"	103	0,820		(
	"	96	0,812)
"	90	0,804	(
6	10,2	110	0,92) 0,92	
	"	103	0,92		(
	7,5	110	0,905) 0,92	
	"	103	0,915		(
	"	100	0,924)
	"	96	0,932		(
8	10,2	110	0,957) 0,96	
	"	103	0,960		(
	7,5	110	0,954) 0,95	
	"	103	0,951		(
	"	96	0,953)
	"	90	0,955		(

TABLEAU N°27

TABEAU N°28

Valeurs du facteur de singularité circonférentielle (f_c)
pour les gaines expérimentées à l'échelle 1 (gaines "minces")

Nb. ail.	Nb sec.	pas	haut. ail.	f_c exp.	f_c calculé
60	6	600	7,5	0,865	0,866
60	8	600	"	0,96	0,911
60	6	400	"	0,92	0,902
60	8	400	"	0,965	0,932
60	6	200	"	0,88	0,933
36	6	400	"	0,94	0,925

il ne faut cependant pas attacher trop de poids aux résultats de ce calcul qui est trop schématique; ils ne sont là qu'à titre indicatif. Nous considérons que ce sont les valeurs expérimentales

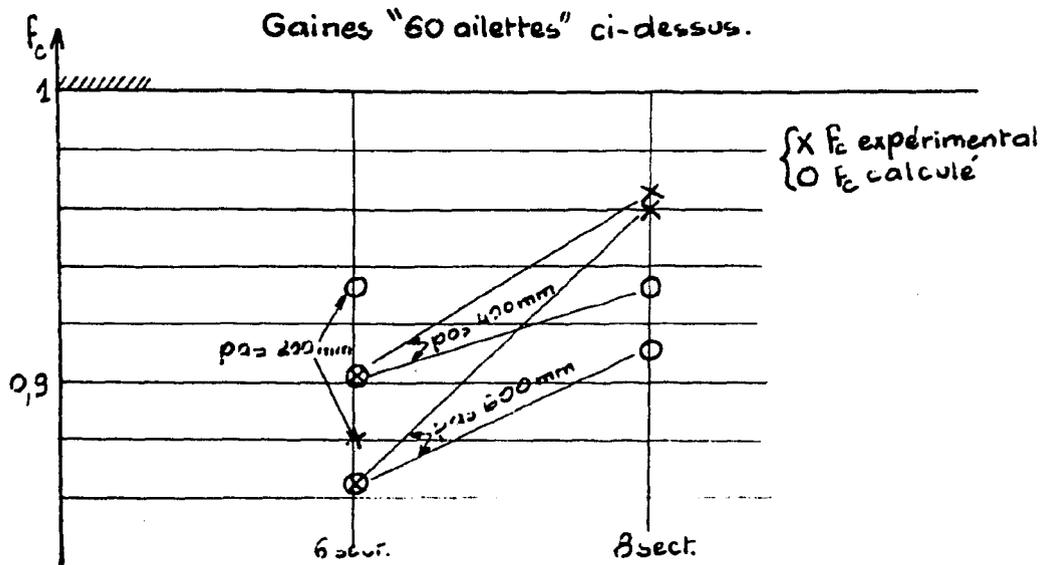


Figure 29

qu'il faut retenir, même si l'imprécision des mesures n'est pas négligeable. La cohérence des résultats expérimentaux avec ceux du calcul tend seulement à montrer que cette imprécision n'est probablement pas excessive.

2 - Singularités longitudinales.

Il est impossible par le calcul de déterminer la place et l'amplitude des singularités longitudinales le long des gaines. Nous avons dit au début qu'il y avait superposition de deux phénomènes complexes, l'un caractérisé par une hétérogénéité des températures dans le fluide, l'autre par des oscillations de vitesses dans l'écoulement.

Il est apparu cependant que ces singularités présentaient des caractères permanents le long de l'abscisse, ce qui a permis de définir un facteur de singularité longitudinale.

Nous avons montré comment il paraissait justifié de rapporter la valeur minimum de \mathcal{M}_0 observée sur une génératrice médiane, à la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}}_{0G}$ sur la même génératrice médiane, en effectuant cette opération pour chaque gaine d'un train de gaines, et de considérer ensuite que c'est la valeur minimum minimorum de f_1 , qui est celle de l'une des gaines du train de gaines expérimenté, qu'il y a lieu de retenir dans le calcul du point chaud.

Nous donnons des résultats relatifs aux essais effectués à l'échelle 1 avec les gaines "épaisses" pour lesquelles nous disposons d'une longueur de 4 cartouches, chacune des cartouches ayant une génératrice médiane équipée de thermocouples. Pour chacun des 6 types de gaines expérimentés, nous avons obtenu une répartition longitudinale de \mathcal{M}_0 analogue à celle déjà présentée sur la figure 5 b.

a) - f_1 indépendant du débit.

Les singularités longitudinales ne dépendent pas du débit: leur position et leur amplitude restent inchangées. Nous avons pris un exemple dans les résultats d'essais à grande échelle pour lesquels nous disposons d'une plus grande densité de points de mesure. Sur la figure 30, sont représentées les variations de \overline{m}_0 en fonction de l'abscisse pour 5 valeurs du nombre de Reynolds. Il est remarquable de constater qu'en abscisse et en amplitude, les points gardent entre eux la même position relative. Ainsi, ces répartitions longitudinales de \overline{m}_0 apparaissent rigoureusement affines les unes par rapport aux autres. Ce résultat a été également constaté dans les essais à l'échelle 1.

SINGULARITES LONGITUDINALES EN FONCTION DU DEBIT

(Echelle 2,5. Gaine 48ailettes, 6secteurs, pas 400mm, $l = 7,5mm$)

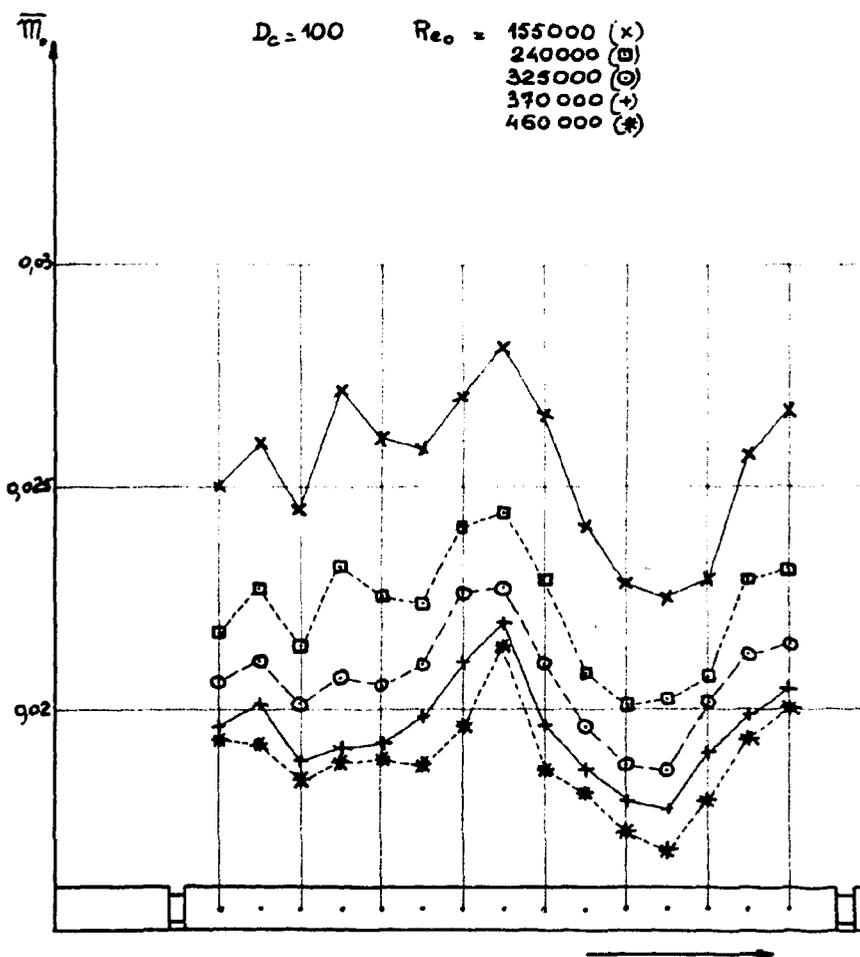


Figure 30

On peut cependant noter, à titre de remarque, que vu sous l'angle statistique nous avons pu discerner sur les résultats d'essais obtenus à l'échelle 1, que f_1 avait une très légère tendance à diminuer quand le nombre de Reynolds augmente (environ 1 % quand Re_0 passe du simple au double dans la plage des nombres de Reynolds expérimentés).

b) - Valeur de f_1 attaché à chaque type de gaine

Nous avons relevé les valeurs de $f_1 = \frac{\mathcal{N}_0 \text{ mini}}{\mathcal{N}_0 \bar{G}}$ pour chacune des gaines d'un même train de cartouches. (Nous avons laissé de côté la première gaine pour laquelle le phénomène a une allure différente et qui de toute manière, n'est pas la gaine la plus chaude dans le canal de pile). Comme il a été dit plus haut, nous n'avons retenu que la valeur minimum minimorum. Cette valeur minimum a été calculée à partir de l'indication donnée par un thermocouple; nous l'appellerons valeur minimum "mesurée".

Sur le tableau N°31, nous avons porté les valeurs minimum de f_1 "mesurées" obtenues pour chaque type de gaine, en indiquant dans une autre colonne sur quelle gaine du train de gaines expérimenté, ce minimum minimorum a été observé.

En réalité, chaque génératrice de mesure ne possède qu'un nombre très limité de thermocouples (un thermocouple tous les 10 cm). Il en résulte que la valeur de \mathcal{N}_0 n'est pas un minimum le long de la gaine, justement là où se trouve un thermocouple pour la mesurer.

On ne connaît donc pas la valeur de f_1 vraiment minimum le long de la génératrice de mesure. Cependant, si l'on regarde

TABLEAU N°31

FACTEUR de SINGULARITE LONGITUDINAL (f_1)

ESSAIS à l'ECHELLE 1 - 48 AILETTES - 6 SECTEURS

pas	hauteur ailette	f_1 "mesuré"	f_1 "à adopter"	n° gaine
400	7,5 (AU-4G)	0,95	0,93	2
400	7,5 (Mg-Zr)	0,94	0,92	3
400	6	0,95	0,93	3
300	7,5	0,95	0,93	3
300	6,75	0,94	0,92	2
300	6	0,94	0,92	3

l'ensemble des résultats, il est remarquable de constater que les valeurs de f_1 mesuré sont très voisines les unes des autres (entre 0,94 et 0,95). Or, ayant essayé 6 géométries différentes, il serait bien extraordinaire que dans aucun des 6 cas, le minimum sur \mathcal{M}_0 ne se soit trouvé très près d'un thermocouple de mesure. On est en droit alors de supposer que la véritable valeur minimum de f_1 ne doit pas être éloignée de celle mesurée.

Ce point de vue se trouve renforcé si l'on regarde l'ensemble de tous les résultats obtenus dans l'étude des gaines à chevrons: dans aucun cas on a constaté sur une gaine en géométrie indéfinie, ou sur un train de cartouches alignées, de valeur de \mathcal{M}_0 minimum vraiment basse susceptible d'attirer particulièrement l'attention.

Il y a un autre point dont il faut à priori tenir compte. Les gaines dont les résultats sont donnés ici ont une paroi relativement épaisse. On peut concevoir alors que la conduction tende à amortir les singularités longitudinales. Or, d'une part le calcul montre que cet amortissement ne peut qu'être très faible, d'autre part, il n'a pas été constaté de différence sur la valeur de f_1 pour des profils de gaines identiques expérimentés avec paroi mince.

Dans ces conditions, si l'on tient compte des deux observations précédentes, nous estimons que l'écart entre la véritable valeur minimum de \mathcal{M}_0 sur génératrice médiane et celle donnée par le facteur f_1 "mesuré" ne doit pas excéder 2 %. Il suffit alors de considérer des valeurs de f_1 diminuées de ϵ %. C'est ainsi que dans la colonne du tableau n°31, nous avons porté les nouvelles valeurs de f_1 qui sont celles qu'il y a lieu d'adopter dans le calcul du "point chaud" de la gaine.

3 - Facteur de "dissymétrie"

La détermination d'un tel facteur ne peut reposer que

sur une observation statistique des résultats. Or, le nombre de thermocouples, surtout dans les essais à l'échelle 1, est apparu insuffisant pour pouvoir effectuer une détermination en ce sens. Nous nous en tiendrons donc à une évaluation sommaire.

Le point le plus chaud de la gaine est nécessairement sur une génératrice de sortie.

Considérons alors dans l'ensemble des résultats à l'échelle 1 (gainés "minces") les valeurs de \mathcal{M}_0 mesurées sur chacune de ces gainés (3 et 4 valeurs dans le cas respectivement d'une gaine "6 secteurs et d'une gaine "8 secteurs").

De la même manière que pour les singularités longitudinales, il apparaît que les dissymétries observées ne dépendent pratiquement pas du débit. Dans ces conditions, nous ne relèverons les valeurs de \mathcal{M}_0 sur les génératrices de sortie que pour une seule valeur du nombre de Reynolds; nous avons pris chaque fois la valeur la plus voisine de $Re_0 = 700.000$.

Sur le tableau N°32, nous avons porté pour chacune des 6 gainés "minces" expérimentées les 3 ou 4 valeurs de \mathcal{M}_0 , en indiquant, en %, l'écart entre les valeurs extrêmes. On constate que cet écart maximum n'excède pas 10 %. Dans l'hypothèse où les mesures seraient parfaitement exactes, on pourrait considérer qu'au maximum la valeur minimum de \mathcal{M}_0 n'est pas inférieure de plus de 5 % ($\frac{10}{2}$ %) à la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}_0}$ qui entre dans le calcul du facteur de singularité circonférentielle. Et on donnerait alors au facteur de "dissymétrie" la valeur de $f_d = 0,95$.

En réalité, le problème est plus complexe.

TABLEAU N°32

ESSAIS à FLUX CONSTANT (échelle 1)

VALEURS de μ_0 sur les GENERATRICES de SORTIE (Re₀ 700.000)

N	n	pas mm	μ_{cs}	écart maximum
60	6	600	0,0144 0,0142 0,0140	()) 3 %
60	8	600	0,0102 0,0157 0,0104 0,0148	()) 10 %
60	6	400	0,016 0,0156 0,0103	()) 5 %
60	8	400	0,0144 0,0140 0,0131 0,0136	()) 6 %
60	6	200	0,0106 0,0185 0,0180	()) 9 %
36	6	400	0,0130 0,0128 0,0124	()) 5 %

L'évaluation qui vient d'être faite porte sur une section droite située à une abscisse où \mathcal{M}_0 sur la génératrice médiane n'est pas minimum. Comme chaque valeur de \mathcal{M}_0 est à associer aux deux valeurs de \mathcal{M}_0 sur les deux génératrices médianes adjacentes à la génératrice de sortie considérée, il est possible que la valeur \mathcal{M}_{0s} minimum parmi les 3 ou 4 valeurs mesurées dans la section droite correspondent à des valeurs de \mathcal{M}_0 sur les génératrices médianes adjacentes plus faibles elles aussi.

Supposons alors que la section droite considérée se trouve en une abscisse où la valeur \mathcal{M}_0 relevée sur la génératrice médiane de mesure est minimum. Les deux éventualités qu'on peut rencontrer sont les suivantes :

a) Les valeurs minima de \mathcal{M}_0 sur les différentes génératrices médianes se présentent dans la même section droite, et on est en droit d'admettre que les valeurs de \mathcal{M}_{0s} sur les génératrices de sortie sont confondues. Dans ces conditions $f_d = 1$ et leur valeur commune est égale à $\overline{\mathcal{M}_0} \times f_c \times f_1$.

β) Les valeurs de \mathcal{M}_0 sur les autres génératrices médianes ne sont pas minimum à la même abscisse que celle correspondant à la génératrice médiane de mesure. A cette abscisse, elles sont alors nécessairement plus élevées. Il doit s'ensuivre que les valeurs \mathcal{M}_{0s} , en particulier la plus basse d'entre elles doivent être également plus élevées que celles qui correspondraient au cas (a) envisagé précédemment. En somme, la valeur \mathcal{M}_{0s} la plus basse considérée ici serait, ou égale, ou supérieure à la valeur calculée par l'expression $\overline{\mathcal{M}_0} \times f_c \times f_1$. Dans ces conditions, le facteur de dissymétrie f_d serait égal ou supérieur à 1. nous sommes alors loin de la valeur 0,95 dont il a été question plus haut.

Ce second point de vue (β) est le plus probable et c'est celui que nous retiendrons. Nous adopterons la valeur $f_d = 1$. On aurait pu prendre f_d plus grand que 1 si les ----- valeurs moyennes $\overline{\pi}_G$ sur les génératrices médianes avaient été les mêmes. Or, nous avons vu sur la figure 8 que ces valeurs pouvaient être légèrement différentes (écart de 5 % maximum dans l'exemple considéré). Dans ces conditions nous nous garderons d'être trop optimiste et nous adopterons la valeur 1.

Bien qu'adoptant la valeur 1, nous ne supprimerons pas pour autant la notion de facteur de dissymétrie. L'appréciation qui vient d'être faite est très grossière. Il n'est pas impossible que d'autres résultats à venir nous conduisent à revenir partiellement sur ce qui vient d'être dit.

CONCLUSION

Après avoir, dans l'introduction :

- exposer ce qu'on entendait par gaine à ailettes en chevrons,
- énuméré les principaux paramètres géométriques qui les caractérisent,
- présenté la méthode de travail et les différentes dispositions expérimentales utilisées,
- précisé l'étendue des résultats présentés,

nous avons successivement dans cinq chapitres :

- décrit les différents types de cellules d'essai,
- donné les définitions des principales grandeurs utilisées (nombre de Reynolds, coefficient de perte de charge, nombre de Margoullis),
- présenté les caractères propres aux écoulements en chevrons ainsi que la méthode utilisée pour en aborder l'étude,
- analysé la précision des mesures,
- enfin, donné l'ensemble des résultats expérimentaux.

La méthode utilisée dans l'étude des écoulements en chevrons repose sur l'existence de régimes aérodynamique et thermique pseudo-établis le long d'un train de gaines : le paramètre "abscisse" le long du canal se trouve ainsi éliminé. Le nombre de Margoullis défini au Chapitre 11 oscille autour d'une valeur moyenne (figure 5 b), en sorte qu'il est possible d'étudier séparément :

- les valeurs moyennes du coefficient d'échange, qui caractérisent les qualités intrinsèques de chaque type de gaine.
- les valeurs minimum (singularités thermiques) que prend le coefficient d'échange sur la surface de la gaine, là où nécessairement se trouvent les points les plus chauds dans le canal de pile.

La valeur moyenne \overline{M}_0 adoptée est égale à la moyenne des valeurs M_0 mesurées sur les différentes génératrices médianes de la gaine (à mi-distance des plans de symétrie de la gaine).

A. - Tous les résultats expérimentaux relatifs aux valeurs moyennes sont groupés dans les tableaux n°10, 12, 15, 15 bis, 15 ter et 24.

Les trois cellules utilisées, bien que très différentes entre elles, ont donné des résultats parfaitement comparables. Ce résultat était attendu dans la comparaison entre cellules à grande échelle et à l'échelle 1, pour lesquelles les lois de similitude ont été respectées: en particulier, géométrie semblable et mêmes conditions thermiques à la paroi de la gaine (flux de chaleur constant). La comparaison entre essais avec température de paroi de gaine constante (essais dits "isothermes") et essais avec flux de chaleur constant était plus délicate puisque les conditions thermiques à la paroi étaient très différentes. Cependant un recalage des résultats des essais "isothermes" par rapport à ceux des essais à flux constant a été possible.

Tous les paramètres géométriques ont varié; entre autres : le nombre des ailettes de 36 à 80, le nombre de secteurs de 4 à 16, le pas de 100 à 1000 mm, soit l'angle d'inclinaison des ailettes de 9° à 60°, la hauteur des ailettes de 0 à 10 mm. Sont restés constants dans tous les essais, le diamètre en base d'ailettes (43,6 mm) et la forme de la gaine au droit des plans d'entrée et de sortie du fluide dans les sous-canaux entre les ailettes (rainure d'entrée et de sortie identiques, larges de 2,5 mm).

Nous donnons ci-dessous les conclusions principales :

- 1 - Le coefficient de pertes de charge f_0 est indépendant du débit (ou du nombre de Reynolds Re_0) (figure 6 a).
(Définitions de f_0 et de Re_0 données au Chapitre II).

- 2 - Le nombre de Margoulis moyen \overline{m}_0 varie par contre sensiblement en fonction du nombre de Reynolds, cette variation étant d'autant plus accentuée que Re_0 est grand (figure 6 b).
- 3 - f_0 et \overline{m}_0 sont indépendants du diamètre du canal dans le domaine de variation ($90 \text{ mm} < D_0 < 120 \text{ mm}$) quel que soit le nombre de Reynolds. Il s'ensuit que les caractéristiques aérothermiques de chaque gaine peuvent être caractérisées par une seule valeur de f_0 et une seule courbe de variation de \overline{m}_0 en fonction de Re_0 , quelles que soient les conditions d'emploi de cette gaine.
- 4 - Dans l'énumération des caractéristiques aérothermiques des différentes gaines, nous avons pris une seule valeur de f_0 et de \overline{m}_0 correspondant à une valeur donnée du nombre de Reynolds (nous avons choisi $Re_0 = 700.000$, valeur voisine de celles envisagées pour les réacteurs EDF₂ et EDF₃). Il est possible dans une plage étendue de variations de Re_0 de considérer que \overline{m}_0 varie proportionnellement à Re_0 porté à une puissance - n. Les valeurs de n correspondant à chaque gaine sont également données dans les tableaux récapitulatifs.
- 5 - Les résultats (f_0 et \overline{m}_0) relatifs à toutes ces gaines sont groupés sur les figures 16, 19, 23 et 25. La conclusion principale à retenir est la suivante : les courbes iso-"nombre de secteurs", iso-"pas", iso-"hauteur d'ailettes" sont confondues quand on considère un même nombre d'ailettes ; les deux courbes tracées sur la figure 25 sont chacune représentatives de l'ensemble des gaines expérimentées ayant un même nombre d'ailettes (courbe "48 ailettes", courbe "60 ailettes", etc...).

B - Les singularités thermiques peuvent être classées en deux sortes : les singularités circonférentielles et les singularités

longitudinales.

Les singularités circonférentielles proviennent d'une hétérogénéité des températures sur le pourtour de la gaine, liée à l'existence de génératrices "d'entrée" froides et de génératrices de "sortie" chaudes. Les singularités longitudinales proviennent d'une hétérogénéité des températures et des vitesses dans le fluide de refroidissement.

Il y a lieu de souligner le caractère permanent de ces singularités tout au long de la gaine, en sorte qu'il est possible de définir un facteur de singularité circonférentielle f_c et un facteur de singularité longitudinale f_l à partir de la valeur moyenne $\overline{\mathcal{M}_0}$ telle que nous l'avons définie.

Le facteur de singularité circonférentielle f_c est indépendant de l'abscisse. Il s'ensuit que la valeur minimum de \mathcal{M}_0 sur la gaine (valeur nécessairement sur une génératrice de "sortie") est calculable par une expression de la forme :

$$\mathcal{M}_{0\min} = \overline{\mathcal{M}_0} \cdot f_c \cdot f_l$$

Cependant, les phénomènes autour de la gaine présentent des dissymétries. Nous avons introduit un facteur de "dissymétrie" f_d dans le but de tenir compte de l'incidence éventuelle d'une telle dissymétrie au point où \mathcal{M}_0 est minimum.

L'analyse de ces dissymétries est très complexe. Compte-tenu du jeu de certaines compensations autour de la valeur \mathcal{M}_0 minimum, il paraît normal d'adopter une valeur très voisine de 1.

FIN