

ÉCHANGES PAR DIFFUSION TURBULENTE ENTRE DEUX CONDUITS COMMUNICANTS LE LONG D'UNE GÉNÉRATRICE. CAS DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES A GRAPPE

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 22 novembre 1968

PAR J.-L. DU BOUSQUET
ET J. BOURÉ *

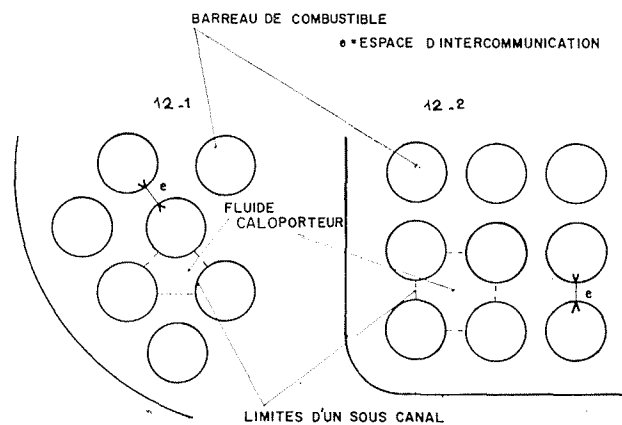
Introduction

Dans certains types de réacteurs nucléaires « dits à grappe », les éléments combustibles disposés en faisceaux déterminent des sous-canaux communicants par lesquels s'écoule le fluide caloporteur (fig. 1). Des données nécessaires pour le projet de tels réacteurs (calcul des éléments et de sécurité) sont les lois des échanges entre les sous-canaux précédemment définis. Plusieurs mécanismes entrent en jeu dans ces échanges : échanges par diffusion turbulente, échanges sous l'effet de gradients de pression entre deux sous-canaux adjacents (en particulier dans le cas où l'écoulement est diphasique); nous citerons également, bien que ne faisant pas partie de cette étude, les entreprises et les promoteurs de mélange : pièces métalliques disposées le long des barreaux de combustible ou dans les sous-canaux (vrilles, etc.).

Cette étude peut être fractionnée en trois étapes : étude des échanges par diffusion turbulente en simple phase (liquide), puis en double phase et en dernier lieu échanges transversaux dus à des gradients de pression (ces derniers sont généralement désignés sous le nom de crossflow).

En écoulement simple phase et sans promoteurs de mélanges, les échanges entre sous-canaux adjacents identiques s'effectuent par diffusion turbulente. L'étude expérimentale portant sur deux sous-canaux adjacents dont on a au maximum simplifié la géométrie, permet ici, à l'aide d'un modèle, de

déterminer un « coefficient moyen de diffusion » qui rend compte localement de la valeur des échanges. Nous étudions en particulier l'influence de la vitesse de l'écoulement (nombre de Reynolds) et celle de la largeur de l'espace d'intercommunication entre les deux sous-canaux « entrefer » sur ce coefficient. Une interprétation « aux moyennes » en considérant chaque canal comme un élément monodimensionnel permet l'introduction des résultats précédents dans les codes de calcul de ces réacteurs; les différentes étapes du calcul nous ont permis en plus de préciser les conditions de validité d'une telle interprétation.



1/ Coupe d'une grappe : 12-1 à pas triangulaire. — 12-2 à pas carré.
Tube assembly cross-section : 12-1 triangular pitch. — 12-2 square pitch.

* Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Service des Transferts thermiques.

But de l'étude et méthodes utilisées

Dans les codes de calcul déjà existants, chaque sous-canal d'une grappe est traité monodimensionnellement, les échanges étant traduits en particulier par des équations intéressant les valeurs moyennes de chaque sous-canal.

La théorie de la diffusion, basée sur l'hypothèse que le flux de la substance diffusant à travers l'unité de surface est proportionnel au gradient de concentration en cette substance compté normalement à l'élément de surface considéré (loi de Fick) permet d'écrire pour un milieu isotrope ayant un coefficient de diffusion constant l'équation de la diffusion [1] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Plusieurs méthodes permettent d'accéder expérimentalement au coefficient de diffusion :

1. Méthode par bilans : connaissant la répartition de la substance diffusant au temps t et au temps $t + \Delta t$, on peut déterminer localement le flux de cette substance à travers l'unité de surface dans une direction donnée et en utilisant la loi de Fick en déduire le coefficient de diffusion;
2. Méthode par résolution de l'équation de la diffusion [1] : dans le cas où l'on connaît la loi de répartition du coefficient de diffusion (en particulier lorsque ce dernier est constant), on peut par comparaison entre les répartitions de concentration expérimentales connues à des temps t_1 et t_2 , et la résolution de l'équation de la diffusion prenant pour condition initiale $C_{(t_1)}$, déterminer le coefficient de diffusion (la comparaison pouvant être effectuée graphiquement ou numériquement). Cette méthode « globale » permet dans le cas où $t_2 - t_1$ est petit et qu'à l'instant t_1 la substance diffusante est confinée dans un espace restreint, de déterminer un coefficient local de diffusion n'intéressant alors que la zone dans laquelle la substance a diffusé (Slember [2] en particulier utilise cette méthode).

Nous utiliserons la méthode globale en prenant pour base les hypothèses suivantes :

- la vitesse de l'écoulement est uniforme dans la section et égale à la vitesse moyenne;
- le coefficient de diffusion est constant dans la section;
- on néglige la diffusion moléculaire devant la diffusion turbulente;
- on néglige le terme de diffusion axiale (suivant z).

On se considère dans un système d'axes se déplaçant à la vitesse de l'écoulement, ce qui réduit l'équation (1) à :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Le traceur utilisé est un sel (ClNa en solution), dont on détermine la concentration après prélèvement par une mesure électrique; la condition initiale pour le calcul est celle de l'injection du traceur dans l'écoulement.

Expérimentalement, le temps pendant lequel a lieu la diffusion est déterminé, connaissant la vitesse moyenne de l'écoulement V et l'éloignement entre les cotes d'injection Z_1 et de prélèvement Z_2 :

$$t_{ex} = \frac{Z_2 - Z_1}{V}$$

La résolution de l'équation (2) de la diffusion ayant été faite (chapitre III) avec un coefficient $D = D_{th}$, on obtient en fonction du temps la répartition des concentrations $C_{x,y}^t$, ou plus exactement l'exploitation se faisant sur un réseau maillé : C_{x_i, y_j}^t .

On détermine le temps théorique t_{th} , moment où les répartitions expérimentales et théoriques des concentrations sont les plus proches; on obtient alors le coefficient de diffusion expérimental :

$$D_{ex} = D_{th} \cdot \frac{t_{th}}{t_{ex}}$$

Deux points de la méthode utilisée doivent être précisés : l'utilisation de valeurs adimensionnelles, et la détermination de t_{th} par comparaison des surfaces de concentration.

1. On appelle concentration normalisée en un point courant $C_{N(x,y)}$ (valeur adimensionnelle) la valeur en ce point du rapport entre la concentration réelle en ce point et la concentration au même instant en un point choisi comme référence; ce dernier a été choisi être le point de coordonnées x, y , correspondant au point d'injection. Un tel changement permet d'éliminer comme variable la concentration réelle de la solution injectée; la prenant égale à 100 dans tous les cas d'initialisation du programme de calcul, la comparaison entre les courbes expérimentales et théoriques se fait sur ces concentrations normalisées.

2. Détermination de t_{th} .

Après avoir vérifié qualitativement la concordance d'allure entre les surfaces de concentration expérimentales et théoriques, on calcule pour chaque répartition $C_{N(x_i, y_j), t}^{th}$ en un nombre de points donné (10) la valeur de l'écart entre la surface expérimentale et la surface théorique au temps t :

$$E_{(t)} = \sum_i \sum_j \left[C_{N(x_i, y_j)}^{th} - C_{N(x_i, y_j), t}^{ex} \right]^2$$

On trace ensuite la courbe $E_{(t)}$ qui présente un minimum et on adopte comme temps théorique le temps correspondant à ce minimum.

La valeur $E_{(t_{th})}$ permet également d'estimer avec quelle précision la courbe théorique approche la courbe expérimentale, validant ainsi les hypothèses retenues.

L'installation d'essai

Nous décrivons ici la totalité de l'installation, bien qu'une partie seulement n'ait été utilisée que pour les expériences en simple phase.

1. Les sections d'essai.

Nous disposons de deux sections d'essai de 1 800 mm de long, en plexiglass; la première représentée figure 3 simule de façon simplifiée deux sous-canaux adjacents d'une grappe de combustible; l'espace d'intercommunication ou « entrefer » entre les deux sous-canaux est variable de 1 à 8 mm, grâce à des baguettes interchangeables; l'autre est rectangulaire de section 15 × 30 mm et constitue le cas limite de la première (entrefer de 15 mm) figure 2. Des orifices placés le long des deux sections d'essai permettent l'introduction de sondes; un embrèvement dans les baguettes permet d'y faire glisser un feillard métallique isolant les deux sous-canaux sur une longueur désirée (ajustable).

2. La boucle d'étude.

— Le circuit hydraulique et les principaux équipements de l'installation.

La section d'essai est disposée verticalement, l'écoulement y est ascendant.

— Le circuit hydraulique : l'installation fonctionne en circuit ouvert, chaque sous-canal isolé à la base est alimenté en eau à partir d'une cuve à niveau constant et au moyen d'une pompe, en air (cas des manipulations en double phase) à partir d'un cadre d'air comprimé; les débits sont réglables et mesurés au moyen de rotamètres; en sortie de la section d'essai, à sa partie supérieure, est situé un dispositif de séparation qui isole de nouveau les deux sous-canaux; l'écoulement, après une éventuelle séparation des phases par gravité, va à l'égout pour l'eau et à l'atmosphère pour l'air en passant par des rotamètres qui déterminent ainsi les débits en sortie. A la base de la section d'essai un dispositif étanche permet la manœuvre du feillard isolant des deux sous-canaux.

— La mesure du taux de vide par rayons X.

Rappelons la définition du taux de vide : c'est le rapport dans une section entre le volume occupé par la phase gazeuse et le volume total.

Dans le cas d'un écoulement diphasique, le taux de vide est une variable dont il est important de connaître la valeur et la répartition; par atténuation d'un pinceau de rayons X, on la détermine suivant le profil de la section d'essai à n'importe quelle cote.

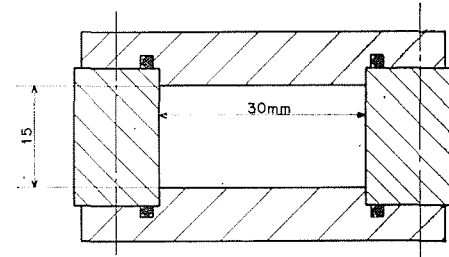
3. L'équipement pour l'injection, le prélèvement et la détermination de la concentration en traceur.

Les sondes (sondes de prélèvement et dispositif d'injection) sont montées dans des porte-sonde assurant et repérant les déplacements suivant les deux directions d'un plan (normal à l'écoulement).

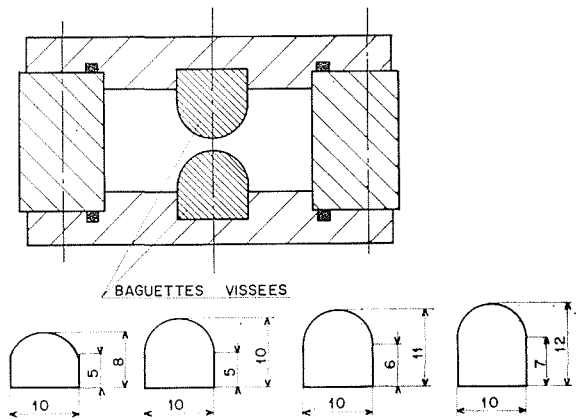
L'injecteur est un tube coudé dans le sens du courant dont la section intérieure est de 2,25 mm²; la solution saline est préparée et stockée dans un bac en acier inoxydable muni d'un agitateur à pales; le circuit d'injection comporte un rotamètre permettant la mesure du débit, l'écoulement est assuré par pressurisation du bac à l'aide d'air comprimé : le réglage du débit s'effectuant en agissant sur cette pression par un manodétendeur régulateur.

La géométrie des canaux impose la présence d'une sonde de prélèvement pour chaque sous-canal, les cellules de conductivité étant reliées à un seul

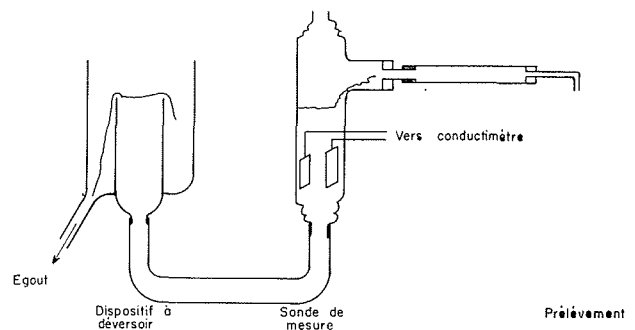
COUPE DU CANAL RECTANGULAIRE



2/ Coupe du canal à intercommunication variable. Variable intercommunication channel cross-section.



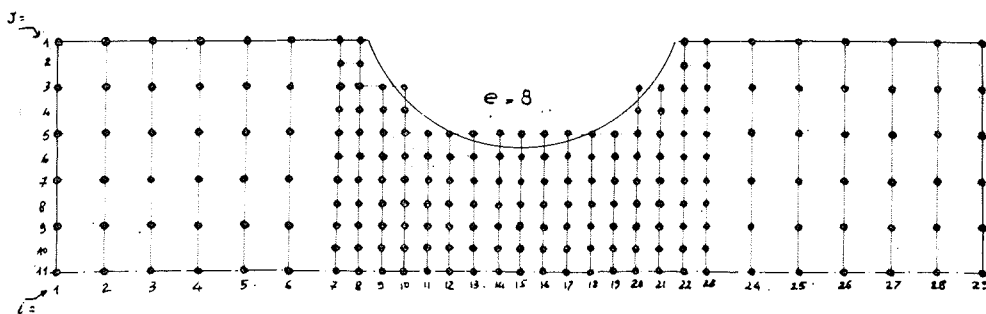
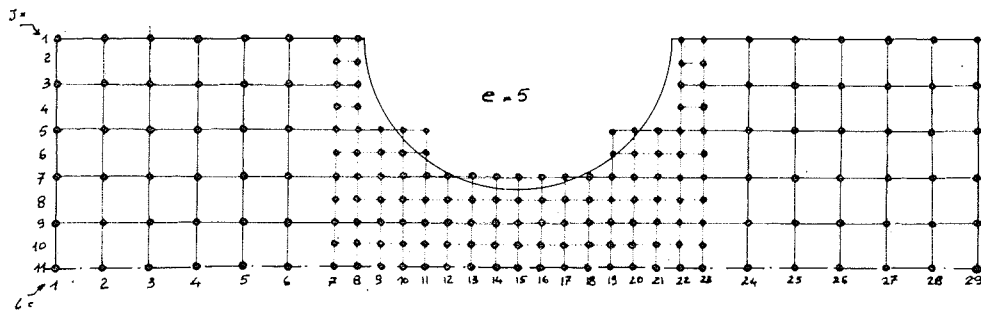
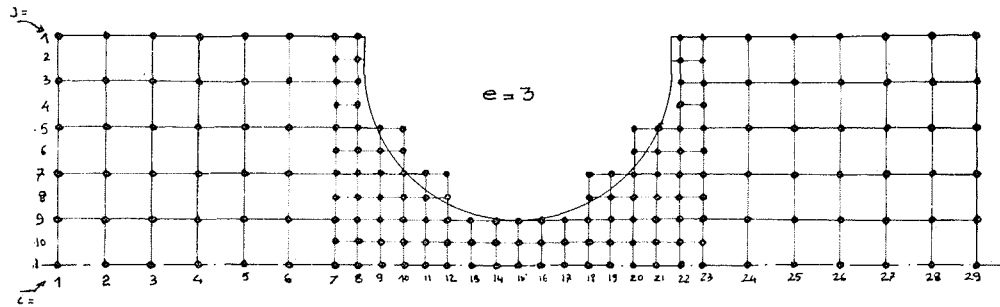
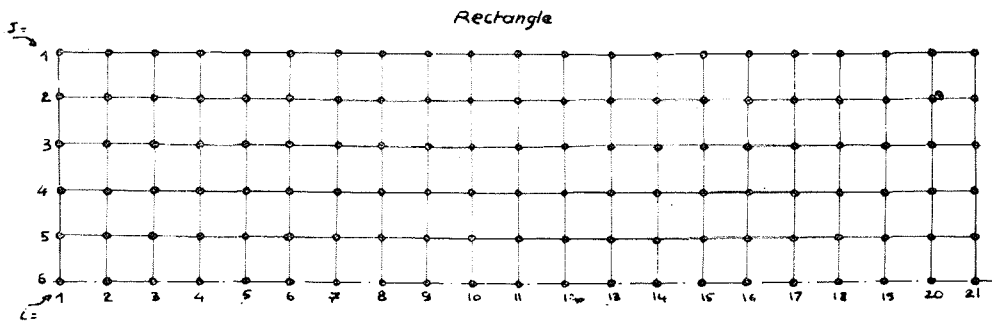
3/ Section des baguettes. Bar cross-section.



4/ Dispositif de prélèvement. Sampling system.

conductimètre à l'aide d'un commutateur deux positions.

La sonde est constituée en trois parties distinctes (fig. 4); un minitube coudé placé face à l'écoulement, ce dernier assurant lui-même le débit convenable de prélèvement; une cellule de mesure de conductivité ayant un double rôle de séparation des phases et de mesure de la conductivité de la phase liquide, et un dispositif à déversoir permettant de maintenir les électrodes de mesure dans les conditions convenables de fonctionnement, (le niveau de l'eau au-dessus des électrodes doit être minimal pour diminuer le temps de réponse du système mais suffisant pour que sa variation n'ait pas d'influence sur la valeur de la conductivité mesurée).



5/ Maillage analogique.
Analog network.

Résolution de l'équation de la diffusion

Nous avons à résoudre l'équation :

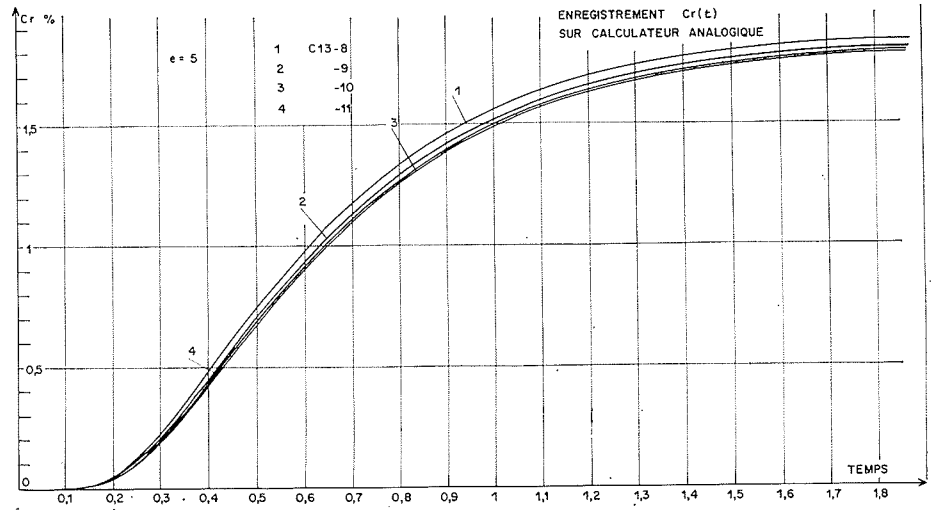
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

pour les données correspondant aux divers sections et essai.

Une solution analytique de ce problème pour de telles conditions aux limites présentait de grandes

difficultés, aussi a-t-on préféré la solution de systèmes linéaires obtenus par discrétisation sur les variables x, y ou x, y et t selon les méthodes; par raisons de symétrie on limite le calcul à moitié de la section (voir plus loin les maillages). Deux méthodes ont été utilisées pour cette résolution : l'une utilisant des calculateurs analogiques (trois Pace 231-R et un calculateur EAI 8800), l'autre utilisant un calculateur arithmétique (IBM 360-40).

L'utilisation de deux méthodes correspondait à des besoins aux différents moments de l'étude; au début le calcul analogique a présenté l'avantage



6/ Enregistrement $C_r(t)$ sur calculateur analogique.
Analog computer recording. $[C_r(t)]$.

d'obtenir des résultats plus rapides sur un maillage simplifié; l'exploitation ultérieure nécessitait un travail important. Les résultats obtenus sur calculateur arithmétique ont permis de préciser ceux obtenus précédemment; ils facilitent des opérations d'exploitation (calcul direct des concentrations normalisées, calcul de moyennes, perforation automatique sur carte de résultats pour des dépouillements ultérieurs). Ce dernier mode de calcul a nécessité beaucoup plus de temps de mise au point, dû en particulier à la présence du rétrécissement.

1. Résolution sur calculateur analogique [3].

Le problème étant posé sous la forme (2) les conditions aux limites étant $(\partial C/\partial n) = D$ aux frontières, n étant la normale à la paroi.

Pour résoudre ce problème nous sommes amenés à ne garder qu'une seule variable indépendante et à discrétiser par rapport aux deux autres. L'équation aux dérivées partielles est alors approchée par un système d'équations différentielles. La discrétisation a été faite par rapport aux variable d'espace, les dérivées partielles par rapport à ces variables étant approchées suivant la méthode des différences

finies centrées. Les maillages choisis sont représentés (fig. 5) pour les différents cas de géométrie.

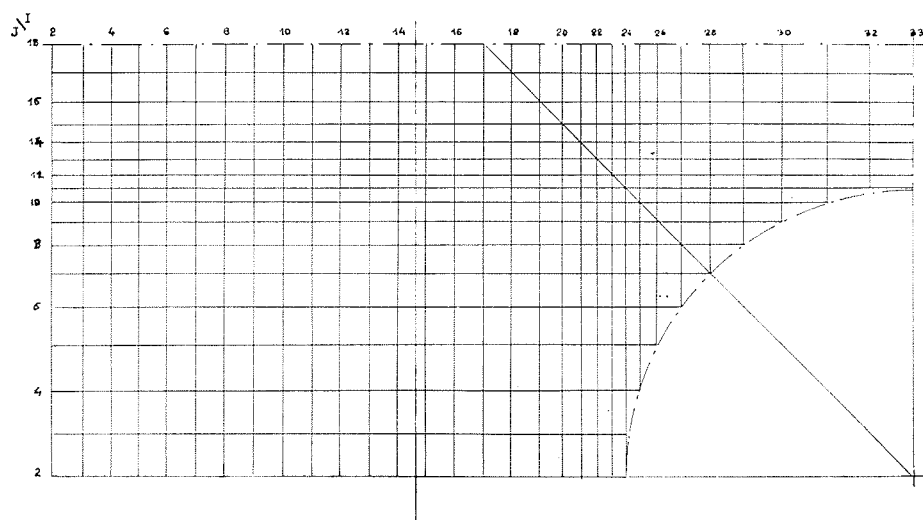
Les résultats sont donnés sous la forme $C_{i,j}(t)$ soit une courbe pour chaque nœud du maillage.

On donne en exemple (fig. 6) trois courbes obtenues pour une condition initiale donnée en trois nœuds du maillage. A ce stade il reste encore deux opérations à faire : passer en variables adimensionnelles et donner les résultats sous la forme exploitable $C_i^N(x_i, y_j)$; ce dépouillement a été effectué en prenant à intervalles de temps fixes les relevés de $C_{i,j}(t)$ et ensuite pour chaque répartition $C_t(x_i, y_j)$ on passe aux variables normalisées comme nous l'avons expliqué précédemment.

Un manque de précision de la méthode est dû en particulier à cette exploitation de caractère manuel.

2. Résolution sur calculateur arithmétique [4].

L'équation (2) est discrétisée par rapport aux trois variables x, y et t , les pas en x et y étant variables pour que le maillage épouse au mieux les formes des contours (fig. 7). La discrétisation fait intervenir les valeurs en cinq points du maillage aux



7/ Maillage de la section à espace d'intercommunication variable (1/4 seulement du canal est représenté).
Mesh system for the cross-section with a variable intercommunication space (one-quarter only of channel shown).

temps $k-1$ et k pour le calcul au temps k et conduit à un système linéaire implicite comportant autant d'équations que de nœuds du maillage. La condition aux limites $[\partial C/\partial n] = 0$ se traduit par l'annulation de certains coefficients dans les équations des nœuds intéressés. La convergence des itérations est accélérée par l'utilisation d'une méthode de sur-relaxation. Cette méthode de résolution est exposée en détail ainsi que le programme Fortran correspondant en [4].

Les résultats sont présentés sous la forme $C_i^N(x_i, y_i)$ et donc directement exploitables; en outre, la sortie sur carte perforée rend aisée l'introduction des données pour le programme de calcul du coefficient de diffusion. De sorte que maintenant seule la méthode utilisant le calculateur arithmétique est utilisée.

Nous ne donnerons pas ici les résultats de ces calculs car ils ne sont que des intermédiaires permettant d'obtenir la valeur du coefficient de diffusion, résultats récapitulés dans le chapitre suivant.

Résultats obtenus

L'ensemble des essais a été réalisé avec une injection de traceur au centre de l'un des deux sous-canaux. Des expériences préliminaires ont montré que, dans la gamme de débit utilisé, le débit en traceur n'influe pas sur la répartition de la concentration normalisée. L'importance d'un bon positionnement de la sonde d'injection pour une détermination précise du coefficient de diffusion peut s'apprécier par le fait qu'il suffit d'un déplacement de 3/10 mm pour fausser de façon importante les résultats (écart de l'ordre de 20 % sur le coefficient de diffusion). Des essais complémentaires à des niveaux de prélèvement différents ont été effectués et ont conduit à des valeurs identiques pour le coefficient de diffusion.

Les résultats obtenus pour les différentes géométries sont récapitulés sur les figures 8 et 9 donnant respectivement $\psi(\mathcal{R})$ à entrefer donné et $\psi(e)$ à nombre de Reynolds donné. ψ est une forme adimensionnelle du coefficient de diffusion que l'on rencontre habituellement; $\psi = (D/V \cdot dh)$ où V est la vitesse moyenne de l'écoulement et dh le diamètre hydraulique.

Les résultats intermédiaires (répartition de concentration dans la section, courbes donnant le temps théorique t_{th}) sont donnés dans le rapport [5], rapport qui développe également en détail la plupart des points traités ici (en particulier le dispositif expérimental y est décrit complètement).

A titre d'exemple, on donne figures 10 et 11 deux courbes de répartitions de concentration correspondant à deux essais caractéristiques pour les canaux d'entrefer 5 et 3 mm. Des manipulations concernant les canaux avec un faible entrefer (entre 1 et 3 mm) sont en cours.

On remarque, pour les canaux déjà étudiés, une faible influence du nombre de Reynolds sur le coefficient adimensionnel ψ , le coefficient ψ décroissant en même temps que l'entrefer; au vu des premiers résultats, cette dernière tendance pourrait être remise en cause pour les canaux de faible entrefer.

Interprétation au sens des moyennes

Comme nous l'avons dit précédemment, l'introduction du phénomène de mélange entre les sous-canaux d'une grappe dans un réacteur nucléaire ne peut se faire commodément dans les codes de calcul qu'en considérant chaque sous-canal comme un élément monodimensionnel. Les paramètres entrant en jeu sont alors les moyennes des données locales dans chaque sous-canal et les lois qui régissent leur évolution ne doivent faire intervenir que ces moyennes.

Equations aux moyennes :

Par analogie avec la loi de Fick, dans le cas d'échanges entre deux éléments monodimensionnels, on pose qu'il y a proportionnalité entre le flux de substance passant d'un élément à l'autre et l'écart de la concentration moyenne en cette substance entre les deux éléments considérés.

Dans le cas de deux sous-canaux ayant un espace d'intercommunication e , C_1 et C_2 étant les concentrations moyennes, v étant une vitesse transversale de passage comptée positivement du canal 1 vers le canal 2, on a pour un élément de longueur de canal dz le débit d'intercommunication :

$$|q| = |v \cdot e \cdot dz|$$

L'application de la loi de Fick donne (les indices 1 et 2 correspondant respectivement aux deux sous-canaux adjacents) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} - \frac{ev}{S_1} (C_2 - C_1) &= 0 \\ \frac{dC_2}{dt} = \frac{ev}{S_2} (C_2 - C_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

S_1 et S_2 étant les sections respectives des sous-canaux. Nous les considérons par la suite égales, et posons :

$$\frac{e \cdot v}{S} = \omega$$

On résoud facilement le système 3 :

$$C_1 = (C_1)_0 + \frac{(C_2 - C_1)_0}{2} (1 - e^{-2\omega t})$$

$$C_2 = (C_2)_0 - \frac{(C_2 - C_1)_0}{2} (1 - e^{-2\omega t})$$

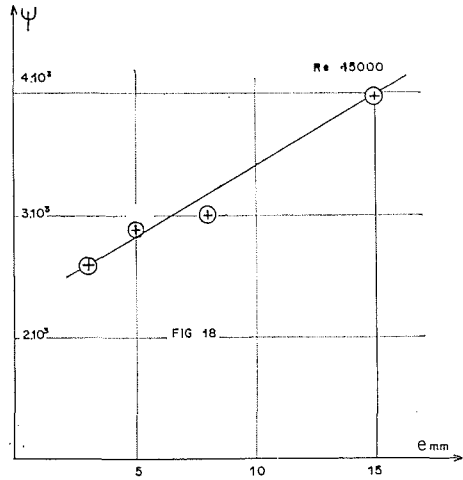
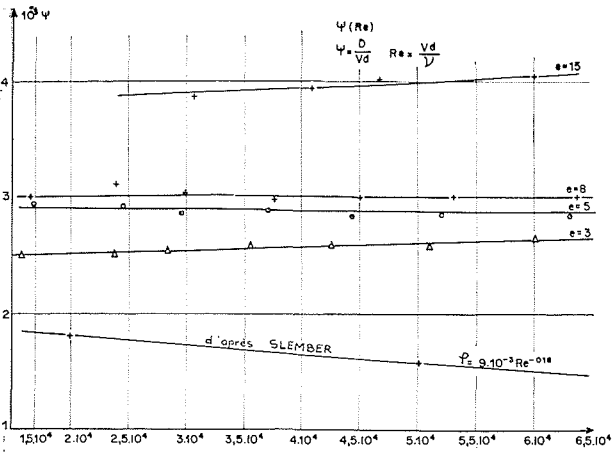
l'indice 0 correspond aux concentrations initiales $t = 0$.

On ne peut accéder facilement dans la manipulation aux valeurs moyennes $C_1(t)$ et $C_2(t)$; aussi le modèle bidimensionnel basé sur l'équation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right]$$

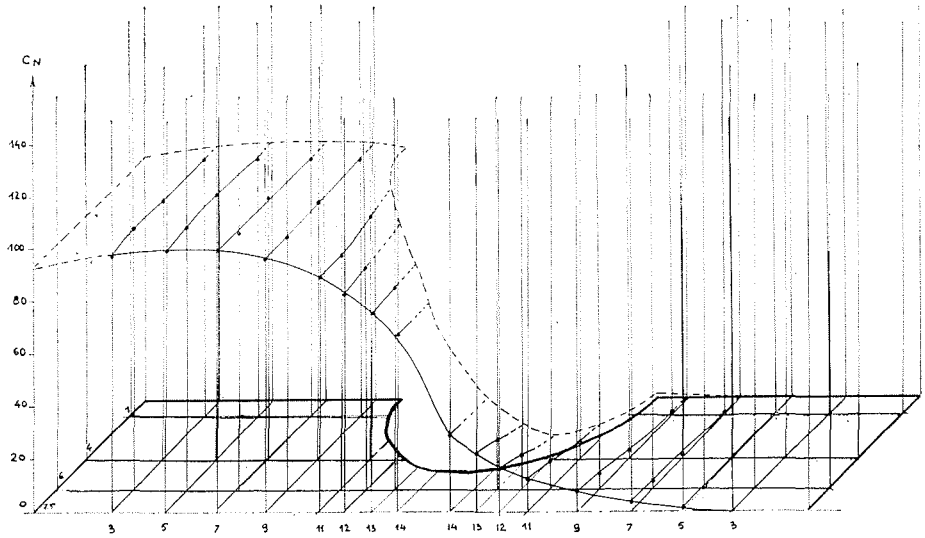
qui nous permet de déterminer le coefficient de diffusion D et qui donne une bonne approximation des résultats expérimentaux, va également nous servir à déterminer la vitesse transversale de passage dans le modèle « monodimensionnel ».

Soit $C_{x,y}^D(t)$ la solution de l'équation de la diffu-

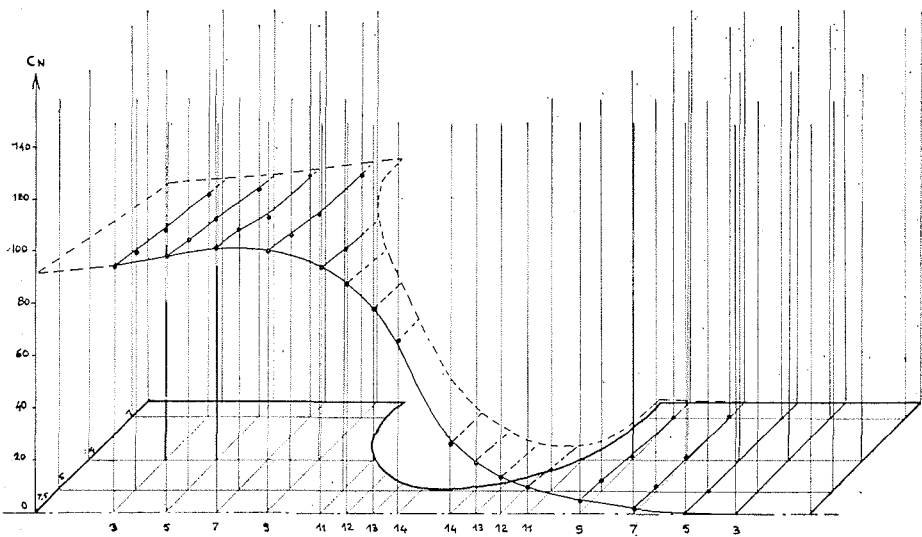


8/

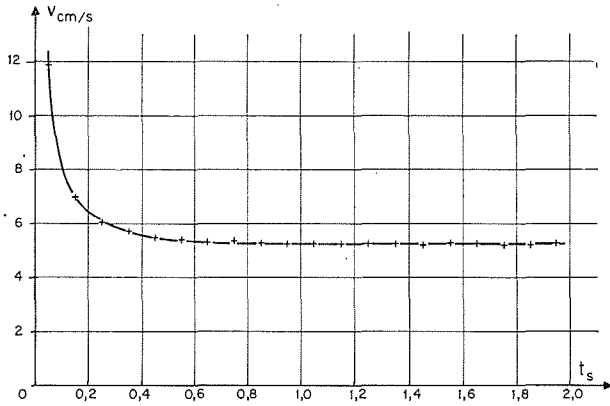
9/ Influence de l'entrefer / Effect of clearance.



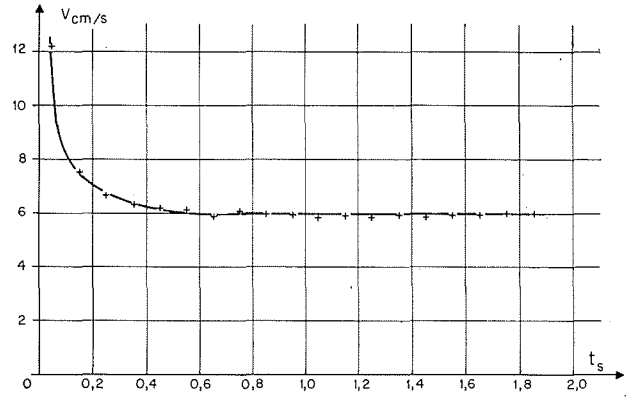
10/ Echanges entre deux sous-canaux.
Etude de la diffusion (N° 6-5.
T = 0,158 s, V = 3,63 m/s).
Transfers between two sub-channels.
Diffusion study (No. 6-5. T = 0.158 s,
V = 3.63 m/s).



11/ Echanges entre deux sous-canaux.
Etude de la diffusion (N° 1-3.
T = 0,483 s, V = 1,19 m/s).
Transfers between two sub-channels.
Diffusion study (No. 1-3. T = 0.483 s,
V = 1.19 m/s).



12/ $e = 5$ Initialisation 1.
 $e = 5$ Initialisation 1.



13/ $e = 3$ Initialisation 1.
 $e = 3$ Initialisation 1.

sion calculée en prenant un coefficient de diffusion D ; on définit les moyennes par sous-canal :

$$\left. \begin{aligned} C_1^D(t) &= \frac{1}{S_1} \iint_{S_1} C_{x,y}^D(t) dx dy \\ C_2^D(t) &= \frac{1}{S_2} \iint_{S_2} C_{x,y}^D(t) dx dy \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

l'expression de la vitesse transversale est donnée à partir de ce système par l'expression suivante :

$$v = \frac{S \left\{ \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{S} \iint_{S_1} C_{x,y}^D(t) dx dy \right] \right\}}{e \left\{ \frac{1}{S} \left[\iint_{S_1} C_{x,y}^D(t) dx dy - \iint_{S_2} C_{x,y}^D(t) dx dy \right] \right\}}$$

en remarquant que :

$$C^{D=D_1}(t) = C^{D=nD_1} \left(\frac{t}{n} \right)$$

le report dans l'expression de v permet de déduire la relation :

$$V_{nD_1}(t) = n \cdot V_{D_1}(t)$$

on en déduit également que le rapport D/v est indépendant de D et ne dépend que de la géométrie; il a les dimensions d'une longueur, soit $L = (D/v)$; on trouve les résultats suivants :

a) La vitesse v calculée à partir de (4) est constante à partir d'un certain temps dépendant des conditions initiales (voir fig. 12 et 13) ce qui veut dire que le système « monodimensionnel » basé sur cette hypothèse est utilisable lorsque la répartition de la substance diffusante présente une certaine « régularité ».

b) Lorsque v est constant, le calcul de L lié à la valeur trouvée expérimentalement pour D ou ψ permet de déterminer la valeur de v à prendre en compte pour le calcul des réacteurs; on utilise pour présenter les résultats la forme V/v , V étant la vitesse moyenne de l'écoulement. On choisit cette forme car on trouve expérimentalement qu'elle donne un résultat indépendant du nombre de Reynolds de l'écoulement. Les résultats sont récapitulés dans le tableau A.

Tableau A

e (mm)	3	5	8	15
$\psi (\mathcal{R}) = 40\,000$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
dh (cm)	1,34	1,47	1,64	2,0
$(V/v) \cdot 10^{-3}$	2,41	2,25	2,11	1,52
L (cm)	8,4	9,6	10,4	12,2

Conclusion

En simple phase, un modèle bidimensionnel donne une bonne évaluation des résultats expérimentaux concernant les échanges par diffusion turbulente entre deux sous-canaux adjacents d'un réacteur nucléaire à grappe. L'utilisation de ce modèle permet en outre de tester la validité d'une représentation monodimensionnelle (nécessaire pour les codes de calcul); les limites d'utilisation d'une telle méthode, qui ne tient pas compte des répartitions locales, sont précisées; elles correspondent au cas où les moyennes ne sont alors plus des notions représentatives pour chaque sous-canal.

Références

[1] CRANK (J.). The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press (1957).
 [2] SLEMBER (R. J.). — Mass Transfer by Eddy diffusion in the wide direction of a rectangular channel. WAPD-T 653 (1958).
 [3] CHAIGNE, CHARETON, DI FALCO et POULARD. — Résolution de l'équation de la diffusion au moyen d'un calculateur analogique à courant continu. Communication présentée au Symposium international sur le calcul analogique appliqué à l'énergie nucléaire. A.I.C.A. Versailles (septembre 1968).

[4] VERNIER (Ph.), BROISE (B.) et Mme REY (M.H.). — Diffusion entre deux sous-canaux d'une grappe de combustible. Programme CONVDIF. Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Service des Transferts Thermiques (juillet 1968).

[5] DU BOUSQUET (J.L.) et ANDREOLETY (D.). — Etude expérimentale du mélange par diffusion turbulente en simple phase entre deux sous-canaux d'une grappe. Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Service des Transferts Thermiques. Rapport à paraître.

Discussion

Président : M. J. Yvon

M. le Président donne la parole à M. du Bousquet qui présente la communication et après avoir remercié ce dernier de son exposé, il ouvre la discussion.

Le mode d'approche employé suppose la diffusivité constante, remarque M. HUFFENUS. Ceci n'est évidemment pas vrai pour un écoulement turbulent. A-t-on une idée des écarts qu'introduit cette hypothèse ?

Cette hypothèse, répond M. du Bousquet, n'est pas la seule introduite; on a également supposé la répartition de vitesse uniforme suivant la section du canal et ce sont ces deux hypothèses qui nous ont permis d'établir un modèle simple.

M. DENIAU demande si dans la mesure du coefficient de diffusion, à partir d'une source ponctuelle, la distance utilisée entre le capteur et la source était suffisante pour avoir un coefficient de diffusion indépendant des conditions d'émission.

M. du Bousquet répond :

« On injecte dans un régime qui est établi puisque l'on se trouve loin de l'entrée du canal; l'injection est faite à quarante diamètres environ de cette entrée du canal, mais la présence de l'injecteur modifie sensiblement la répartition des vitesses. Dans la référence que j'ai citée, l'injection n'était pas faite au moyen d'un tube coudé, placé dans l'écoulement, mais à travers la paroi par un trou traversant celle-ci. »

A propos des programmes de calcul préparés par M. VERNIER et signalés par le conférencier, M. THIRRIOT souhaiterait obtenir quelques précisions.

« Que pensez-vous, dit-il, de la méthode aux éléments finis pour représenter les frontières formées de lignes courbes ? »

« La méthode de calcul numérique est-elle celle des directions alternées ou bien une méthode purement de relaxation ? Que vaut alors le coefficient optimal de surelaxation ? »

« Quelle est l'influence des pas variables sur la convergence et la stabilité des algorithmes ? »

M. VERNIER répond que le schéma de calcul employé se rattache à la méthode de Crank-Nicholson à dix points, c'est-à-dire que, si on se place au point (x, y, t) , au temps t , on a cinq points, au temps $t + \Delta t$, on a cinq autres points; la dérivée $\delta C / \delta t$ est exprimée au temps moitié, ou à un temps intermédiaire. La méthode est donc implicite, et on est conduit à la résolution d'un système linéaire dépendant des concentrations obtenues au temps t . A chaque instant, le système linéaire que nous avons à résoudre possède une matrice tridiagonale par bloc : il y a cinq éléments à chaque ligne. Ce système linéaire a été résolu par surelaxation, au moyen de la méthode classique.

Le facteur de surelaxation ω a été déterminé expérimentalement sur un temps de calcul court en prenant plusieurs valeurs; on a ensuite exploité le programme avec la meilleure valeur de ω . On s'est aperçu, par exemple, que les meilleures valeurs de ω , avec cette géométrie, étaient de l'ordre de 1,2 alors que, dans le cas de la géométrie rectangulaire, les valeurs de $\omega = 1$ donnaient de meilleurs résultats.

Il n'a pas été fait d'étude théorique justifiant cette méthode; on est arrivé empiriquement à optimiser le maillage pour éviter toute instabilité spatiale dans la répartition des concentrations. On a surtout essayé de réaliser un programme facile à écrire et à mettre en œuvre sans erreur, au détriment peut-être du « temps de calcul ».

En ce qui concerne la comparaison entre calcul numérique et calcul analogique, M. du Bousquet indique que des maillages différents ont été utilisés suivant les deux modes de calcul : maillage à pas variable en calcul numérique, maillage à pas régulier en calcul analogique; les résultats comparés pour un même cas traité par les deux méthodes ne nous ont pas permis de déceler des écarts très significatifs.

D'une manière générale, si l'on s'intéresse à ce qui se passe en cinq ou six points, le calcul analogique est très intéressant parce que le temps de calcul est de l'ordre de quelques secondes, disons de la minute. Si l'on s'intéresse à ce qui se passe en tous les points en fonction du temps, le calcul numérique est préférable.

M. THIRRIOT signale, qu'à titre d'essai, il a réalisé le couplage d'un petit calculateur analogique (réseau à résistances) à un petit calculateur numérique.

Revenant aux problèmes propres à la mécanique des fluides, M. le professeur FORTIER pose la question suivante :

« Le calcul que vous avez présenté est, en fait, un calcul en régime laminaire. Pensez-vous qu'en utilisant la valeur de la diffusivité turbulente que vous avez déterminée, on peut prévoir la répartition des températures dans la même géométrie, mais avec des conditions aux frontières thermiques différentes ? »

Pour des conditions aux limites très différentes, répond M. du Bousquet, notre modèle donnant la répartition locale serait sans doute mis en défaut. Nous avons voulu par nos essais caractériser l'influence d'un certain nombre de paramètres tels que vitesse de l'écoulement, entrefer, etc. En analysant globalement les échanges entre sous-canaux, on relie ces échanges aux valeurs moyennes des paramètres dans chaque sous-canal, les conditions aux limites ont alors moins d'importance.

M. le Président remercie M. du Bousquet et les personnes qui sont intervenues dans la discussion.

Abstract

Turbulent diffusion transfer between two pipes communicating along a generatrix, considering the case of a reactor with bunched fuel elements

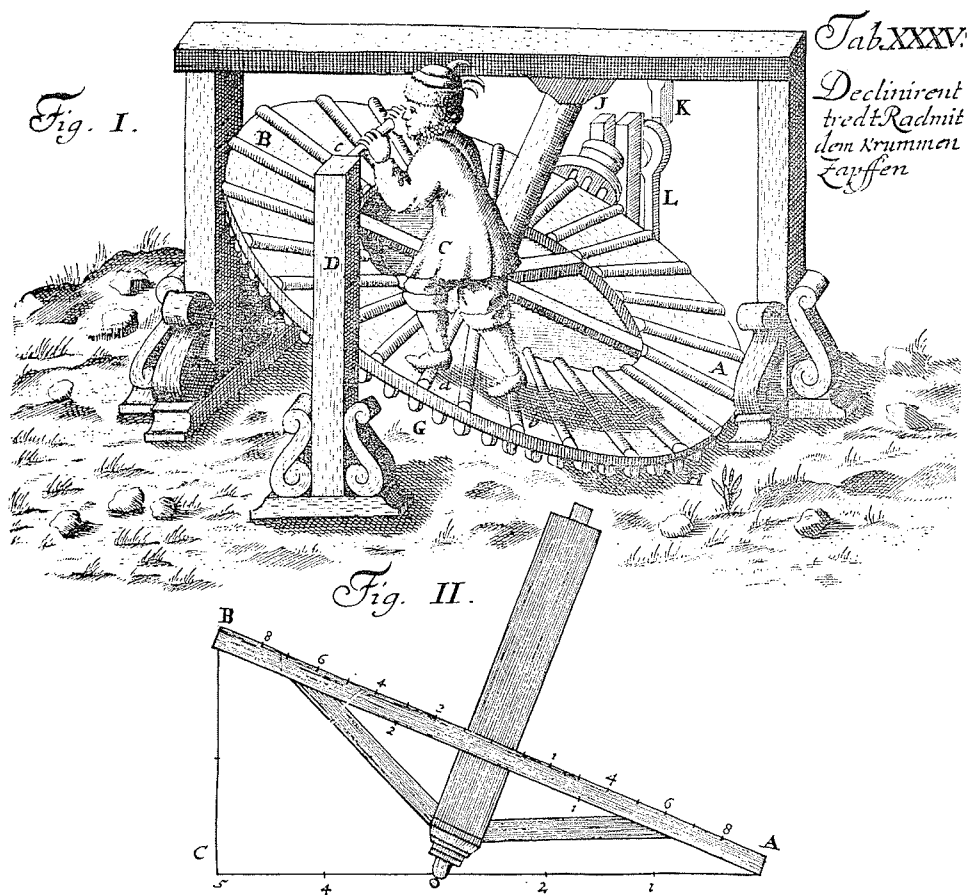
by J.-L. du Bousquet * and J. Bouré * \

The design calculations for bunched reactor fuel rod systems require a knowledge of the transfer relationships applicable to the sub-channels between the fuel rods, in which the cooling fluid circulates.

The single-phase (liquid) exchanges taking place between two identical adjacent sub-channels are studied experimentally with the aid of a perspex test section, the main points of interest being the effect of intercommunication space and flow velocity on the transfer relationships.

A simple local analysis based on the diffusion equation reveals the mixing effects involved and yields an average diffusion coefficient. An interpretation based on the consideration of the average value of each parameter in each sub-channel enables the introduction of this research data into the nuclear reactor design standards, either in the form of a transverse mixing velocity or of a characteristic length coupled with an average diffusion coefficient.

Further research with a single phase is still in progress on the subject of restricted intercommunication spaces, also some research with two-phase flow (water/air).



* Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Service des Transferts thermiques.