

DAPNIA-SEA-96-04

03/1996

**Du plomb comme fluide caloporteur dans le coeur
d'un réacteur à neutrons rapides**

DAPNIA

B. Bonin

Le DAPNIA (Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée) regroupe les activités du Service d'Astrophysique (SAp), du Département de Physique des Particules Élémentaires (DPhPE) et du Département de Physique Nucléaire (DPhN).

Adresse : DAPNIA, Bâtiment 141
 CEA Saclay
 F -91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Du plomb comme fluide caloporteur clans le coeur d'un réacteur à neutrons rapides

B. Bonin, annexe au compte-rendu de la réunion CESEN du 30 Septembre 1994

Introduction

On assiste actuellement à un regain d'intérêt pour le plomb comme fluide caloporteur dans les réacteurs nucléaires, pour deux raisons :

1) Le sodium liquide utilisé dans les réacteurs à neutrons rapides pose des problèmes de sûreté;

2) Dans le cas d'un hybride spallation-fission, il est tentant d'utiliser le plomb à la fois comme caloporteur et comme cible de spallation.

Récemment, C. Rubbia a présenté un projet d'hybride à neutrons rapides utilisant le plomb (ref. 1). La présente note a pour but de discuter la validité de certains aspects de ce projet et, de façon plus générale, de vérifier les limites de l'usage du plomb liquide dans le circuit primaire d'un RNR ou d'un hybride spallation-fission.

Caractéristiques d'un bon fluide caloporteur

Outre les contraintes spécifiques de neutronique et de sûreté liées à son utilisation dans un réacteur nucléaire, un bon fluide caloporteur doit avant tout évacuer efficacement la puissance du coeur. La densité de puissance maximale du réacteur est en effet limitée par la capacité de transfert de la chaleur du fluide réfrigérant. Cette évacuation de la chaleur comporte trois étapes bien distinctes (Fig. 1) :

1) Un échange de chaleur a d'abord lieu entre le crayon combustible et le fluide au niveau du coeur (la source chaude). L'échange est associé à une chute de température entre la paroi du crayon et le fluide;

2) On a ensuite transport de chaleur par le fluide, entre source chaude et source froide. Ce transport se fait surtout grâce à la circulation du fluide, et ce dernier est bien sûr à une température différente au niveau des deux sources;

3) Il y a enfin un nouvel échange de chaleur entre le fluide primaire et la paroi de l'échangeur, ce dernier jouant ici le rôle de source froide.

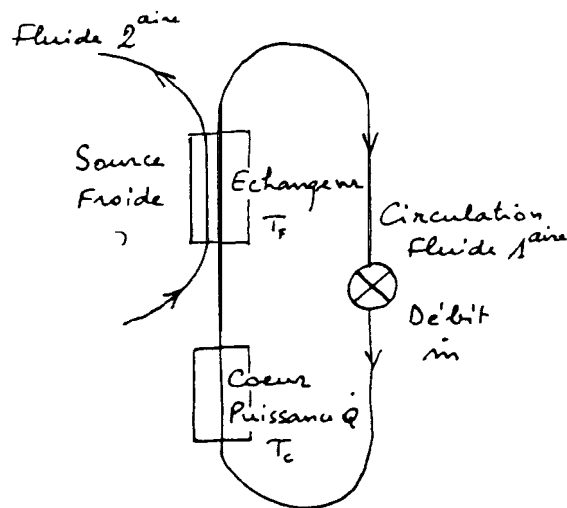


Figure 1 Figure 1. Le circuit primaire d'un réacteur.

Pour un transport de chaleur efficace, le fluide doit satisfaire deux critères principaux:

i) Posséder de bonnes caractéristiques d'échange thermique au niveau du cœur et de l'échangeur. Il est en effet souhaitable de minimiser la chute de température à l'interface entre le fluide et les parois.

ii) Le fluide doit aussi avoir de bonnes caractéristiques de *transport* de la chaleur. Pour minimiser les gradients de température dans le circuit primaire, il doit posséder une forte capacité calorifique C_p , et avoir une bonne fluidité afin de circuler facilement entre les éléments combustibles.

La puissance \dot{Q} du cœur et l'écart de température ΔT entre source froide et source chaude du circuit primaire étant fixés, le débit du fluide caloporteur est imposé par

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p \cdot \Delta T} \quad (1)$$

et la vitesse moyenne du fluide à l'entrée du cœur en découle via la relation

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot S} \quad (2)$$

où S est la section transversal totale des canaux pour le fluide.

La température maximale et le débit permis avec un fluide caloporteur de type "métal liquide" &ant par ailleurs limités par la corrosion ou les caractéristiques mécaniques des matériaux de structure, les critères i et ii ci-dessus définissent les termes d'un compromis portant sur le débit, le gradient de température, et le volume disponible pour le passage du liquide.

Les métaux liquides comme fluides caloporteurs

L'intérêt des métaux liquides comme fluides caloporteurs est lié à leurs bonnes caractéristiques de transfert thermique et aux hautes températures permises par ces fluides, ce qui donne au réacteur un rendement thermique accru. Leur point d'ébullition et leur tension de vapeur sont généralement élevés, ce qui permet un travail à basse pression. Pour un RNR, l'intérêt des métaux liquides provient aussi de leur pouvoir modérateur faible.

Les propriétés thermiques de quelques fluides sont résumées dans le tableau ci-dessous (refs. 2, 5) :

	Eau liquide (200 °C)	Sels fondus (700 °C)	Lithium (500 °C)	Sodium (700 °C)	Plomb (700 °C)
Densité ρ (Kg/m ³)	714	3280	485	780	10140
Chal. Spéc. Cp (J/Kg.K)	5.7 10 ³	1.3 10 ³	4.2 10 ³	1.3 10 ³	1.5 10 ²
Cond. Ther. κ (W/m.K)	0.54	1.2	49.6	60	15
Viscosité η (Pa.s)	9.6 10 ⁻⁵	7 10 ⁻³	3.2 10 ⁻⁴	1.8 10 ⁻⁴	1.4 10 ⁻³

Les propriétés nucléaires du liquide caloporteur doivent aussi être prises en considération. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous (refs. 3, 6) :

	Lithium nat.	Sodium nat.	Plomb nat.
Pouvoir modérateur	0.0173	0.0057	0.00018
Sect. eff. capture (mbarn, pour des n de 1 MeV)	19.5 (260 mbarn pour ⁶ Li, dont l'abondance nat. est 7.5 %)	0.25	3 environ (dû au ²⁰⁷ Pb présent dans Pb nat. (23%))
Activité induite (en Curie/g, pour un réacteur de 1 GW th)	0.03	0.20	0.09

Comparison de quelques fluides caloporteurs du type "métal liquide" :

Li : Le lithium liquide possède d'excellentes caractéristiques thermiques : basse température de fusion (180°C), forte chaleur spécifique. Malheureusement, il brine à l'&, réagit avec l'eau, et est corrosif. Son irradiation n'induit pratiquement pas de radioactivité?. Ses caractéristiques neutroniques sont assez mauvaises : outre un fort pouvoir modérateur, l'isotope ⁶Li contenu en abondance dans le lithium naturel (7.5 %) absorbe les neutrons.

Na : Le sodium liquide a de bonnes caractéristiques thermiques : basse température de fusion (98°C), faible viscosité, bonne conductibilité thermique, forte chaleur spécifique. Ses caractéristiques neutroniques sont assez bonnes, avec une section efficace d'absorption et un pouvoir modérateur relativement faibles. Il pose des problèmes de sûreté liés aux feux de sodium, à son coefficient de vide positif¹, et à l'assez forte activité induite par son irradiation.

Pb :

L'intérêt principal du plomb comparé au sodium couramment utilisé dans les réacteurs rapides vient du fait qu'il réagit très peu avec O et H₂O vapeur. Contrairement au cas du sodium, il n'y a donc pas de risques de feu ou d'explosion en cas de fuite sur le circuit primaire de refroidissement.

D'autre part, le plomb liquide dissout l'uranium et le thorium : en cas de fusion du cœur, le matériau fissile se disperser probablement dans le plomb, ce qui permet de minimiser le risque de criticité.

Ces deux caractéristiques représentent clairement des avantages du point de vue de la sûreté des réacteurs.

¹ Le coefficient de vide d'un réacteur, défini ici par le rapport $-\frac{\Delta k}{\Delta \rho / \rho}$ caractérise la sensibilité du coefficient de criticité k du réacteur à une variation de la densité ρ du fluide caloporteur. Un coefficient de vide positif correspond à une augmentation de la réactivité du cœur en cas de diminution de la densité moyenne du fluide, due par exemple à la présence de bulles dans ce dernier. Cette ébullition risquant de s'accroître du fait de l'échauffement du cœur, le système risque alors d'être instable. A contrario, un coefficient de vide négatif stabilisera le système.

La basse tension de vapeur du plomb est un autre avantage non négligeable. Cette caractéristique est particulièrement intéressante dans le cas d'un hybride spallation-fission, car le problème de la fenêtre entre le coeur et l'accélérateur se résout moins difficilement si le coeur est à basse pression (avec du plomb, on a même envisagé de ne pas mettre de fenêtre du tout).

Le premier tableau ci-dessus montre que le plomb possède d'assez médiocres caractéristiques thermiques, comparé au lithium et au sodium. Sa faible chaleur spécifique impose des débits importants pour évacuer une puissance donnée. De plus, sa forte viscosité ne facilite pas sa circulation. Sa température de fusion assez élevée (327 °C, contre 98°C pour le sodium) implique peut-être un risque de bouchage des canalisations dans certains cas particuliers. Je crois savoir qu'il y a eu dans le passé des accidents graves dus à la thermohydraulique du plomb. Étaient-ils dus à des bouchages? L'eutectique plomb-bismuth fond beaucoup plus bas (125°C avec 56% de bismuth), ce qui résoudrait peut-être ce problème, si son prix n'était pas aussi élevé. Autre inconvénient de cet eutectique : dans un flux élevé de neutrons, le Pb-Bi donne du ^{210}Po très radiotoxique (émetteur alpha).

Le plomb a de bonnes caractéristiques neutroniques : peu d'activation, peu d'absorption, peu de modération. Le coefficient de vide du plomb semble être négatif, au moins pour une géométrie de coeur classique et un combustible thorium. L'introduction de plutonium dans le combustible cause une augmentation de ce coefficient. Celle-ci est probablement sans conséquence pour la sûreté : les risques de vaporisation du plomb sont faibles, vu sa température d'ébullition très élevée (1743°C à pression atmosphérique).

La question de la tenue du plomb liquide au rayonnement a été partiellement explorée : le plomb supporte les hauts flux de neutrons. Il n'y a pas de problèmes d'activation avec les neutrons de fission. Cependant, si le plomb était utilisé comme cible de spallation, les résidus de spallation pourraient être radiotoxiques. Cet aspect là n'a guère été examiné jusqu'ici.

Les problèmes de corrosion par le plomb fondu représentent une inconnue importante. Les risques de corrosion des aciers peuvent être minimisés par l'emploi d'aciers au vanadium, par l'adoption de températures de travail inférieures à 600 °C, d'un plomb à faible teneur en oxygène actif, et d'un débit inférieur à 3 m/s. De même, les pompes à plomb liquide n'ont pas fait l'objet de beaucoup de développements technologiques significatifs en Occident. Les pompes électromagnétiques fondées sur l'effet Faraday donnent satisfaction sur des boucles thermohydrauliques de puissance réduite (ref. 7), mais il n'est pas évident que ces composants puissent être extrapolés à l'échelle des circuits d'un véritable réacteur nucléaire. Dans ces deux domaines (corrosion, pompes à plomb), ce sont probablement les russes qui ont actuellement le plus d'expérience. Les deux points ci-dessus peuvent être liés : la corrosion risque de provoquer l'entraînement de particules (débris oxydés) irradiées qui s'accumulent en certains points du circuit de refroidissement. Les pompes sont des points d'accumulation tout désignés, ce qui rendra peut-être leur conception et leur dépannage difficiles.

Caractéristiques de l'échange coeur-fluide

Un bon fluide caloporteur doit échanger la chaleur de façon efficace avec les éléments combustibles qui sont le siège principal de la dissipation.

La section ci-dessous vise à déterminer l'ordre de grandeur de l'écart de température entre la paroi du combustible et le fluide caloporteur, afin d'établir une comparaison entre le plomb et d'autres fluides.

En régime établi, l'échange thermique combustible-fluide est régi par une loi de Fourier :

$$\dot{Q}/A = h.(T_{paroi} - T_{fluide}) \quad (3)$$

où Q/A est le flux de chaleur (en W/m^2) au niveau de la paroi de l'élément combustible, et où T_{fluide} est une température moyenne du fluide caloporteur au voisinage des crayons combustibles.

Tout le problème réside dans la détermination du coefficient de transfert thermique h . Pour des métaux liquides, possédant une très grande conductivité thermique en comparaison des autres fluides caloporteurs, en particulier l'eau des REP (un facteur 100), le coefficient de transfert thermique h de l'équation (3) est indépendant de la viscosité. Il est donné sous forme d'un nombre sans dimension, le nombre de Nusselt $Nu = h.De / \kappa$, où De est le diamètre effectif du canal dans lequel circule le fluide et κ la conductivité thermique du fluide. Nu dépend bien sûr de la vitesse de circulation du fluide. Pour des métaux liquides, Nu est habituellement paramétrisé sous la forme $Nu = f(Pe)$, où Pe est le nombre de Péclet

$$Pe = \frac{\rho.V.De.Cp}{\kappa} \quad (4)$$

La relation entre Nu et Pe pour une géométrie de coeur typique (fig. 1) avec des crayons combustibles allongés, parallèles et espacés avec un rapport période sur diamètre $P/D = 1.2$, est indépendante du fluide considéré. Elle est donnée par le graphe de la fig. 3, et par la paramétrisation (ref. 3) :

$$Nu = 4.0 + 0.33(P/D)^{3.8}(Pe/100)^{0.86} + 0.16(P/D)^{5.0} \quad (5)$$

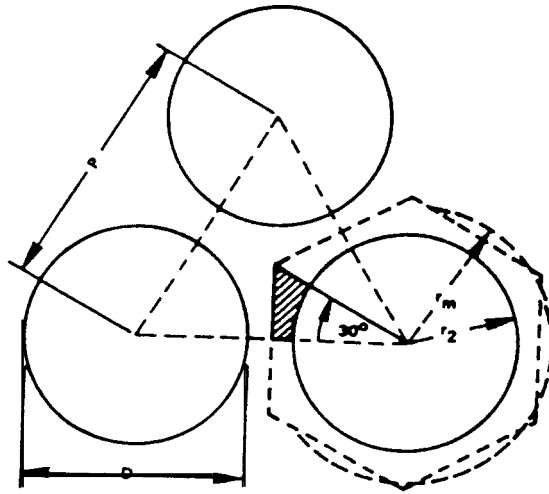


Figure 2 Section transversal d'un coeur de réacteur "typique".

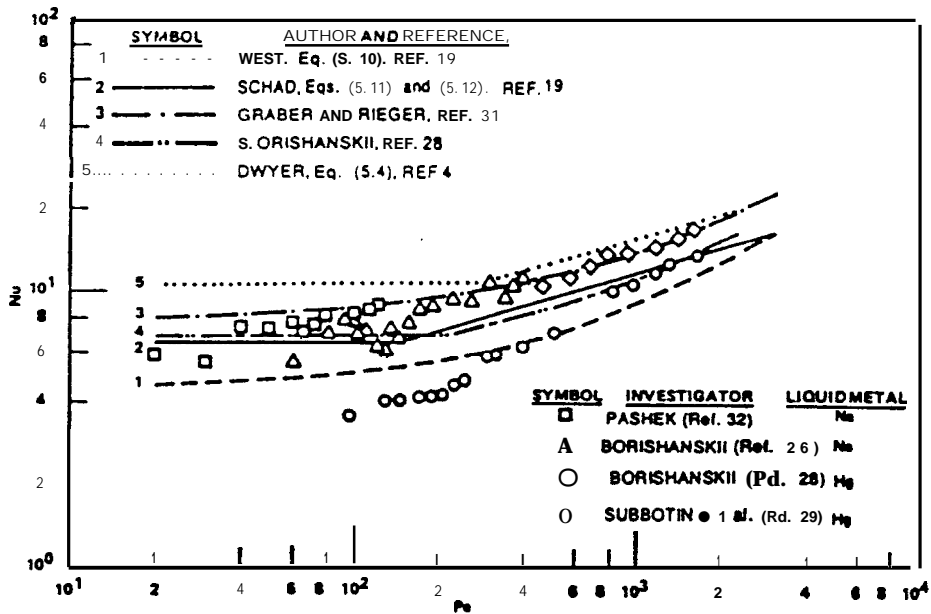


Figure 3 Relation entre les nombres de Nusselt et de Péclet pour une géométrie de coeur caractérisée par un rapport $P/l = 1.2$ (ref.3)

La puissance \dot{Q} du coeur et l'écart de température ΔT entre source froide et source chaude du circuit primaire étant fixés, la vitesse moyenne du fluide à travers le coeur

est donnée par les eqs (1) et (2). Le nombre de Péclet peut alors être déterminé via (4), et Nu est alors donné par la paramétrisation (5) ou le graphe de la fig. 3.

On en déduit le coefficient de transfert thermique $h = Nu \cdot \kappa / De$, et l'écart de température entre le combustible et le fluide $T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}} = Q / (Ah)$ où A est la surface d'échange.

Une application numérique pour le cas typique d'un réacteur dissipant $Q = 1 \text{ GWt}$, avec $\Delta T = 200^\circ\text{C}$, une section totale de canaux conducteurs $S = 2 \text{ m}^2$, un diamètre effectif de canal de $De = 6 \text{ mm}$, et une surface d'échange $A = 3 \cdot 10^3 \text{ m}^2$ est résumée dans le tableau ci-dessous pour les deux fluides sodium et plomb.

	Sodium	Plomb
Débit massique m (Kg/s)	3850	33300
Vitesse moyenne du fluide V (m/s)	2.5	1.6
Pe	250	985
Nu	6	9
h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	$6 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^4$
$T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}}$ ($^\circ\text{C}$)	5.5	15

On voit que le plomb échange nettement moins bien la chaleur que le sodium. Malgré cela, en régime stationnaire, l'écart de température paroi-fluide reste faible devant l'écart de température ΔT entre source chaude et source froide. Du point de vue de l'échange thermique, le plomb peut donc être considéré comme satisfaisant, au moins en régime stationnaire. Peut-être en va-t-il différemment en régime transitoire, mais nous n'avons pas abordé ce problème ici.

Transport de la chaleur, aspects hydrauliques

La puissance de pompage nécessaire pour assurer la circulation du fluide caloporteur est un autre critère à prendre en considération. Cette puissance dépend de la perte de charge dans les canaux de refroidissement. Avant d'évaluer celle-ci, il convient de remarquer que dans un cœur de réacteur en fonctionnement, l'écoulement est nécessairement turbulent : en effet, l'écoulement du fluide à travers les canaux sera laminaire ou turbulent selon la valeur du nombre de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot De \cdot \rho}{\eta} \quad (6)$$

où η est la viscosité absolue du fluide.

Compte tenu des équations (1,2,6), on peut récrire le nombre de Reynolds sous la forme :

$$Re = \frac{\dot{Q}.De}{C_p.\Delta T.S.\eta} \quad (7)$$

En prenant des valeurs typiques pour la puissance thermique Q (1GW), De (6 mm), S (2 m²), ΔT (200 °C), il vient Re = 64000 (Na), 70000 (Pb). Ces valeurs sont très supérieures à la valeur seuil Re = 2000 qui fixe la limite entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent, ce qui montre que dans la plupart des cas pratiques, l'écoulement du fluide est *turbulent*.

C'est seulement à des niveaux de puissance nettement plus bas (quelques dizaines de MW) et avec une géométrie spécialement resserrée pour minimiser De que l'écoulement peut rester laminaire (ce concept a-t-il été employé pour les sous-marins russes ?)

Pertes de charge

Dans ce qui suit, nous évaluons les pertes de charge réparties dues au frottement du fluide sur les parois. Les pertes de charges localisées aux extrémités de tuyaux seront négligées, car elles sont en général inférieures aux précédentes dans le cas d'un cœur typique.

En régime turbulent, la relation entre la vitesse du fluide et le gradient de pression ∇P_{ch} est donnée par la relation de Fanning :

$$\nabla P_{ch} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot V^2}{De} \quad (8)$$

où le coefficient de résistance λ est donné par le graphe de la figure 4, et peut être paramétrisé sous la forme (équation de Blasius, valable pour un conduit à parois lisses) :

$$\lambda = 0.079 \cdot Re^{-0.25} \quad (9)$$

La relation $V = f(\nabla P_{ch})$ peut donc s'écrire :

$$\nabla P_{ch} = \frac{0.16 \cdot \rho^{3/4} \cdot V^{7/4} \cdot \eta^{1/4}}{De^{5/4}} \quad (10)$$

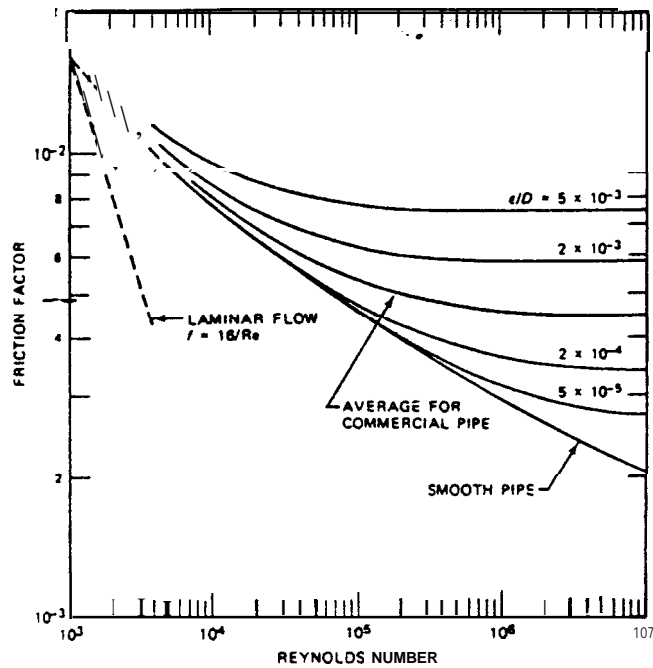


Figure 4 Le coefficient de résistance λ en fonction du nombre de Reynolds pour des tuyaux de différentes rugosités (ref. 4).

Pour une puissance et une géométrie de cœur données, identiques à celles de l'exemple précédent, on peut comparer les pertes de charge pour du plomb et pour du sodium :

	Sodium	Plomb
Vitesse moyenne du fluide v (m/s)	2.5	1.6
∇P_{ch} (Pa/m)	$2 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^4$

Pour une puissance évacuée et une géométrie de cœur comparable, on voit que les pertes de charge avec le plomb sont environ cinq fois plus élevées qu'avec du sodium.

Convection libre

Dans le projet d'hybride spallation-fission de C. Rubbia et al, la puissance thermique (1500 MW) est évacuée par convection libre du fluide du circuit primaire (ref. 1). Le présent paragraphe vise à fixer les limites du transfert de chaleur par convection libre dans un cœur de réacteur.

Le système physique modélisé est un cœur de réacteur, schématisé par un faisceau de N canaux de diamètre effectif D_e , et de section transversal totale S. On cherche à connaître l'ordre de grandeur de la puissance thermique \dot{Q} du cœur évacuable par convection libre, pour une valeur fixe, raisonnable, de l'écart de température entre source froide et source chaude ΔT . Le "moteur" de la convection est la variation de densité du fluide due à ΔT :

$$\Delta \rho = \rho \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (11)$$

où α est le coefficient de dilatation du fluide. Cette variation de densité cause dans le circuit une différence de pression

$$\Delta P_{conv} = \Delta \rho \cdot g \cdot H \quad (12)$$

où H est la distance verticale entre source chaude (le cœur) et source froide (l'échangeur).

On obtiendra un majorant de la puissance évacuable en supposant la perte de charge limitée à celle due au cœur seul, auquel cas :

$$\Delta P_{ch} = \nabla P_{ch} \cdot H_{cœur} .$$

En régime stationnaire, le gradient de pression convectif équilibre la perte de charge:

$$\Delta P_{conv} = \Delta P_{ch} .$$

Sous l'effet de ce gradient de pression, le fluide circule à travers les canaux à une vitesse $V = f(\Delta P)$. Toujours en supposant l'écoulement turbulent, la puissance Q évacuable par convection libre peut donc être calculée via le schéma suivant :

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{eq. 11} & \text{eq. 12} & \text{eq. 10} & \text{eq. 2} & \text{eq. 1} & & & & \\ \Delta T \rightarrow & \rightarrow \Delta \rho \rightarrow & \rightarrow \Delta P \rightarrow & \rightarrow V \rightarrow & A & m^3 & \rightarrow & \dot{Q} \end{array}$$

Les relations précédentes donnent :

$$\dot{Q} = \frac{S \cdot C_p \cdot \rho^{8/7} \cdot \Delta T^{11/7} \cdot \alpha^{4/7} \cdot g^{4/7} \cdot D_e^{5/7} \cdot H^{4/7}}{(0.16)^{4/7} \cdot \eta^{1/7}} \cdot \frac{H^{4/7}}{H_{cœur}^{4/7}} . \quad (13)$$

Dans le cas du plomb ($\alpha = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$), pour une géométrie de cœur donnée plus haut et en supposant une distance H entre cœur et échangeur du même ordre de grandeur que la hauteur du cœur lui-même, on aboutit à une puissance évacuable Q de 200 MW. L'utilisation du plomb en convection libre semble donc limitée à de petites

installations. Des puissances plus importantes sont accessibles si on éloigne l'échangeur du cœur. Ainsi, C. Rubbia n'hésite pas à immerger le cœur de son hybride dans une cuve de plomb profonde de 30 mètres! Est-ce un bon choix? On peut se demander s'il ne vaut pas mieux garder des dimensions de cuve plus raisonnables et ajouter des pompes pour activer la circulation du fluide caloporteur.

Conclusion

Après cette étude sommaire, on comprend que le sodium ait eu de quoi séduire les concepteurs de réacteurs à neutrons rapides. Bien que moins performant que le sodium comme caloporteur, le plomb liquide pourrait pourtant être envisagé dans ces derniers, surtout s'il s'agit d'un hybride spallation-fission. Il y aurait toute une technologie à développer avant de rendre cette option tant soit peu crédible. Les points suivants mériteraient une recherche poussée:

1) La corrosion des matériaux de structure en contact avec le plomb fondu est mal connue. Comme pour le sodium, c'est surtout la dissolution du carbone des aciers dans le métal fondu qui est à craindre et qui demandera des études.

2) La convection naturelle étant insuffisante pour assurer le refroidissement du cœur à des niveaux de puissance importants, il paraît inévitable d'avoir recours à des pompes à plomb liquide. Des pompes à sodium existent, mais les pompes à plomb demanderont probablement un développement technologique.

Les points 1) et 2) ont probablement reçu des débuts de solution en ex-URSS, et il serait utile d'y aller voir de plus près.

3) Un autre problème ouvert concerne l'utilisation combinée du plomb comme fluide caloporteur et comme cible de spallation dans un système hybride. Il reste en effet à vérifier que les résidus de spallation dans le plomb ne sont pas trop radiotoxiques. Des expériences sont en cours (entre autres au Laboratoire National Saturne) pour déterminer la nature de ces résidus et leur degré de toxicité.

Références

1. C. Rubbia "A high gain energy amplifier operated with fast neutrons", "Accelerator driven transmutation technology and applications conference", Las Vegas, Juillet 1994;

C. Rubbia et al. "Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier", CERN AT 9544 (ET), Sept. 1995.

2. Handbook of Physics

3. Y.S Tang, R.D Coffield et R.A Markley, "Thermal analysis of liquid metal fast breeder reactor" (livre publié par l'American Nuclear Society)

4. S. Glasstone et A. Sesonske, "Nuclear reactor engineering" (Van Nostrand)

5. R. Alami et P. Ageron, "Evacuation et récupération de la chaleur des réacteurs nucléaires", Dunod (1958)

6. "Reactor physical constants", rapport ANL 5800, US Atomic Energy Commission.

7. G.M. Broc et al., "Circuit au plomb liquide pour essais de composants. Essais d'endurance et étalonnage d'une pompe électromagnétique CA21 avec du plomb à 400°C." Rapport CEA SECNAU 11.504, Oct. 1980.