

Hydrotechnique des liquides industriels

QUESTION V

RAPPORT 7

TRANSFERT DE CHALEUR A PARTIR D'UNE SOURCE RADIOISOTOPIQUE DE PUISSANCE PAR FLUIDES CALOPORTEURS ORGANIQUES

J. C. CAVORET, P. LAVIGNE, A. TEYTU

Département de Transfert & Conversion d'Energie
Service des Transferts Thermiques
Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble

Dans un générateur à source radioisotopique de l'ordre de 100 W électrique, on utilise un fluide organique pour le transfert de chaleur entre la source de Cobalt 60 et la chaudière du convertisseur. Ce convertisseur à turbines fonctionne lui-même avec un liquide organique comme fluide de travail.

La source de chaleur constituée de plaquettes de Cobalt irradié, est enfermée dans un container en cuivre assurant la protection biologique. Ce bloc de cuivre est immergé dans une cuve contenant le liquide organique. La chaleur dégagée vaporise le liquide primaire qui se condense sur un fond de chaudière et réchauffe le fluide secondaire qui actionne les turbines.

Une défaillance éventuelle risquant d'avoir des conséquences dramatiques du fait de la présence d'une source de 300 000 curies, le dispositif a été étudié soigneusement sous l'angle de la sécurité. Trois dispositifs en cascade permettent de refroidir la source en secours : un premier dispositif met en service un condenseur auxiliaire, un second met à nu le cœur et un troisième permet, au cas où la sécurité n° 2 n'aurait pas fonctionné de décalorifier la cuve afin de limiter la température maximum atteinte par le cœur.

An organic fluid is used to transfer heat from the Cobalt 60 source to the converter boiler of a radio-isotope source generator with an output of about 100 W. The turbine converter operates with an organic working fluid.

The heat source, consisting of irradiated cobalt plates, is enclosed within a copper container acting as a biological shield. The copper container is immersed in a tank containing the organic liquid. The heat given out vaporizes the primary liquid, which condenses at the bottom of a boiler and heats up the secondary fluid driving the turbines.

In view of the possibly disastrous consequences of a failure — due to the presence of a source of 300 000 curies — a very thorough study has been made of the security of the system. Three emergency cascade cooling arrangements have been provided for the source : one switches in an auxiliary condenser, another exposes the core, and if the latter fails to operate, the third lowers the heat-lagging off the vessel in order to keep the maximum core temperature down to a safe level.

INTRODUCTION

Le besoin de sources autonomes de puissance électrique de l'ordre de quelques centaines de watts se fait sentir de plus en plus pour des

applications en milieux désertiques (télécommunications, balises) ou sous-marins (océanologie, recherche pétrolière). Les générateurs à source radioisotopique répondent parfaitement à ces besoins grâce à leur grande durée de vie (de l'ordre de quelques années) et à leur fiabilité.

Les générateurs de faible puissance sont généralement de type statique avec conversion thermo-électrique (séries Marguerite et Gisèle actuellement exploitées en France) mais dès qu'il s'agit d'atteindre une centaine de watts, le rendement très faible devient inacceptable. Le coût de la source et la quantité de chaleur à rejeter deviennent en effet très rapidement prohibitifs.

Dans ce cas, il faut alors envisager une conversion thermodynamique pour laquelle on peut espérer un rendement bien supérieur mais au prix d'une complication très importante du dispositif.

Nous avons voulu démontrer qu'il était actuellement possible de réaliser un générateur de 100 Watts électriques ayant une durée de vie de deux ans et utilisant comme radioéléments du Cobalt 60 sous une forme standard au C.E.A.

Les problèmes qui se posent pour une telle réalisation sont de trois ordres :

- sur le plan thermique, il s'agit de transférer la puissance fournie par les radioéléments jusqu'à son lieu d'utilisation, c'est-à-dire au niveau de la turbine, avec le minimum de pertes;

- sur le plan thermodynamique, il faut convertir en électricité la chaleur disponible avec un rendement aussi bon que possible;

- sur le plan mécanique, l'ensemble doit être fiable, robuste et d'une grande sûreté de fonctionnement.

Cette réalisation ayant été conduite en collaboration avec d'autres Sociétés, nous ne parlerons pas de la conversion thermodynamique qui était à la charge d'un constructeur de turbines spécialisé dans ce domaine de puissance et nous nous limiterons aux problèmes thermiques qui intéressent particulièrement cette assemblée. Le problème des sécurités qui est étroitement lié à la thermique du système sera également évoqué.

1. — DESCRIPTION GÉNÉRALE DU DISPOSITIF

La partie thermique du générateur appelée « cœur » comprend la source de Cobalt 60, la protection biologique, la cuve et le condenseur.

1.1. La source.

Le Cobalt 60 se présente sous la forme de plaquettes, gainées d'acier inoxydable, de $54,5 \times 19,4 \times 2,2$ mm. Ces plaquettes radioactives au nombre

de 580 ont une activité totale de 300 000 curies, soit une puissance thermique de 4 500 Watts en début de vie.

1.2. La protection biologique.

Des calculs d'absorption ont montré que pour obtenir une dose de rayonnement acceptable au contact, il fallait une épaisseur de cuivre de 435 mm ce qui nous a conduit à enfermer la source entre deux galettes de ce métal de \varnothing 640 mm.

La protection latérale est assurée par une couronne d'uranium appauvri de 135 mm d'épaisseur et de 320 mm de hauteur. La partie cuivre assure à la fois la protection longitudinale et la transmission de l'énergie alors que la partie uranium assure essentiellement la protection biologique.

L'ensemble de la source est assemblé par brides et tirants qui sont capables de maintenir liées les diverses parties quelles que soient les conditions alors qu'un chemisage soudé assure l'étanchéité et évite les fuites éventuelles de produit radioactif.

1.3. La cuve.

La source et sa protection sont plongées dans une cuve cylindrique en tôle mince d'acier inoxydable qui contient un liquide organique, du Diphenyl-Diphenyl oxyde commercialisé sous le nom de Gilotherm. La source est complètement noyée dans le liquide.

La cuve présente la particularité d'avoir une double paroi de façon à faciliter la convection naturelle : le liquide froid descend par l'espace annulaire externe et il remonte en bouillant le long du cœur.

1.4. Le condenseur.

La partie supérieure de la cuve est fermée par un couvercle soudé portant des « doigts de gants » tubulaires qui jouent le rôle de surface de condensation pour le liquide contenu dans la cuve et de surface de réchauffage pour le liquide contenu dans la chaudière supérieure. Cette chaudière est en fait la chaudière du premier étage du convertisseur. Le condenseur de ce premier étage constitue la chaudière du deuxième étage qui, lui, a un condenseur atmosphérique.

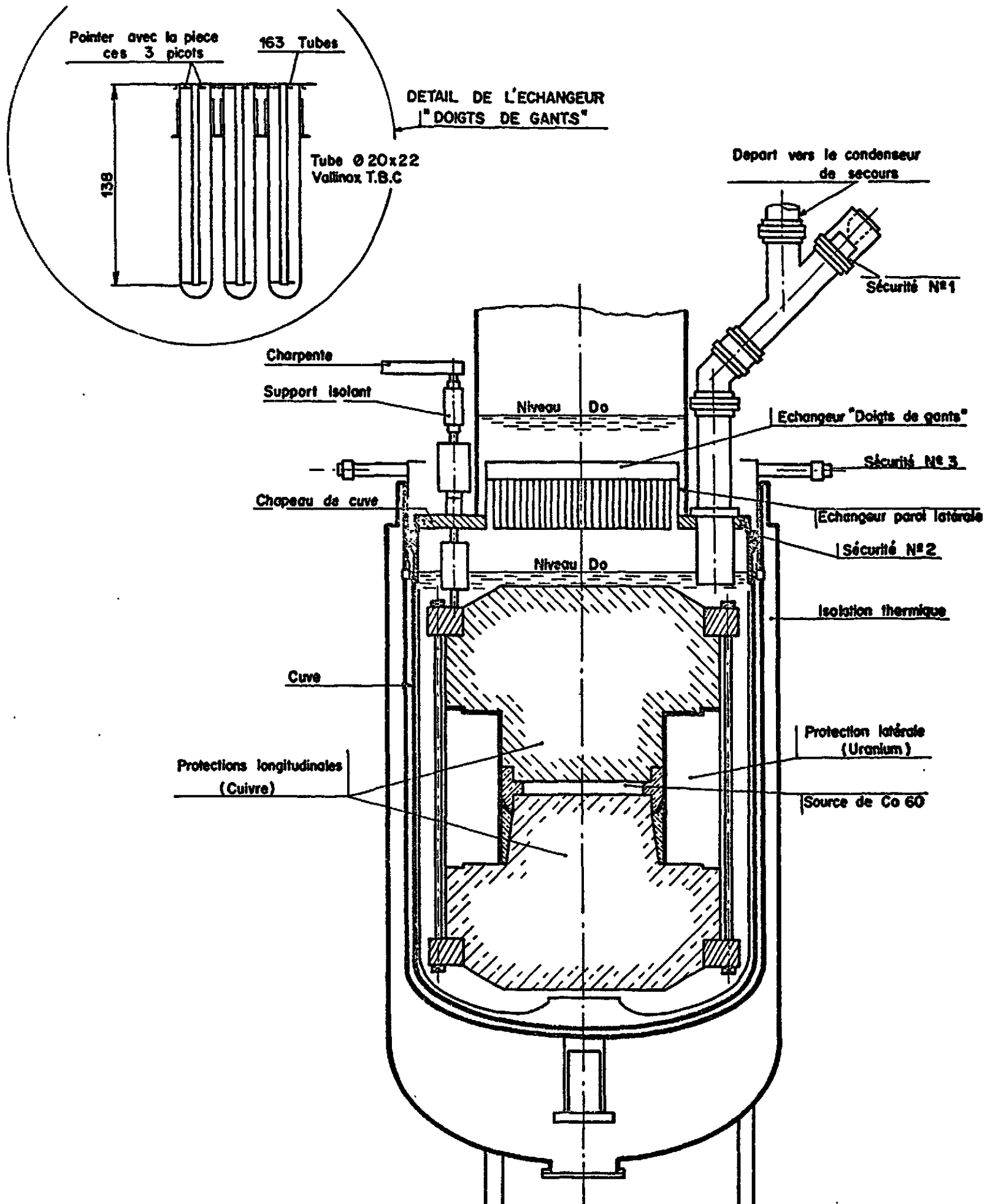


FIG. 1. — Partie thermique de Gicodyne 400.

Il est donc possible de distinguer trois circuits de fluide indépendant dans ce générateur :

— le fluide primaire réchauffé par le cœur à source radioisotopique ;

— le fluide secondaire qui actionne le premier étage de la turbine ;

— le fluide tertiaire qui actionne le deuxième étage de la turbine.

Ces trois fluides sont des liquides organiques analogues, et les pressions partielles régnant dans les différentes enceintes, toutes scellées sous vide, permettent de régler les températures d'ébullition.

2. — CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

Les paramètres imposés sont, d'une part la température du fluide secondaire au niveau de la chaudière : 200 °C, et d'autre part la puissance thermique fournie par la source : 4 500 Watts. Il s'agit de calculer à partir de là les températures maximales atteintes en divers points de la source chaude.

2.1. Température T_{pc} de la surface d'ébullition de la chaudière du premier circuit thermodynamique.

Cette surface est constituée de 163 tubes de diamètre intérieur 20 mm, de hauteur 100 mm et d'une virole de \varnothing 446 mm et de hauteur 75 mm.

La surface totale d'échange est de 11 250 cm². D'où une densité de flux thermique :

$$\varphi = \frac{4\,500}{11\,250} = 0,4 \text{ W/cm}^2$$

L'écart de température ΔT_{sat} qui provoque l'ébullition est donné par la formule de Forster et Greif :

$$\Delta T_{sat} = 14 \varphi^{-0,38} p^{-0,3}$$

avec

$$p = 0,27 \text{ bar (pression pour une température de saturation de 200°C)}$$

$$\Delta T_{sat} = 14,5^\circ\text{C}$$

d'où

$$T_{pc} = 214,5^\circ\text{C}$$

2.2. Température T_s de vapeur saturante dans le fluide primaire.

La surface de condensation légèrement supérieure à la précédente est de 12 300 cm². D'où la densité de flux :

$$\varphi = \frac{4\,500}{12\,300} = 0,36 \text{ W/cm}^2$$

Nous utilisons la formule suivante donnant le coefficient d'échange moyen en condensation sur des surfaces verticales

$$h_{\text{moy}} = \frac{4}{3} \left(\frac{g \mathcal{L} \rho^2 \lambda^3}{4\Gamma H \Delta T} \right)^{1/4}$$

avec

$$g = 981 \text{ cm. s}^2$$

$$\mathcal{L} = 315 \text{ j/g}$$

$$\lambda = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$\Gamma = 4,17 \cdot 10^{-3} p$$

$$\rho = 0,93 \text{ g/cm}^3$$

Nous obtenons

$$h_{\text{moy}} = \frac{4}{3} \left(\frac{4,7 \cdot 10^{-2}}{H \Delta T} \right)^{1/4}$$

Nous prenons $H = 10 \text{ cm}$ et

$$\Delta T = \frac{\varphi}{h_{\text{moy}}} = \frac{0,366}{h_{\text{moy}}}$$

La résolution de ce système nous donne : $\Delta T \simeq 1^\circ\text{C}$.

Compte tenu d'une légère chute de température dans l'épaisseur de la paroi, nous obtenons comme température de saturation dans le fluide primaire :

$T_s = 216^\circ\text{C}$

2.3. Température des parois externes du bloc source de chaleur.

On peut considérer que 97 % de la puissance est transférée par l'intermédiaire des deux protections en cuivre longitudinales : 39 % de l'énergie prend, en effet, naissance par auto absorption dans le Cobalt et 58 % est produite dans le cuivre.

2.3.1. Température T_{pr} de la paroi des protections longitudinales en cuivre.

La surface d'ébullition étant de 17 400 cm², la densité de flux est

$$\frac{4500}{17400} = 0,25 \text{ W/cm}^2$$

On a

$$\Delta T_{sat} = 14 \varphi^{0,38} p^{-0,3}$$

avec

$$p = 0,4 \text{ bar}$$

$$\Delta T_{sat} = 10^\circ\text{C}$$

D'où

$$\text{Température paroi} = 226^\circ\text{C}$$

2.3.2. Température des faces internes des parois longitudinales.

Compte tenu de la surface complexe de ces protections, pour obtenir un ordre de grandeur des températures au niveau du Cobalt, nous admettons que toute la puissance traverse un cylindre de cuivre de \varnothing 365 et de hauteur 425 dont la conductibilité thermique est de 3 W/cm °C.

$$\Delta T = \frac{W}{S} \cdot \frac{e}{\lambda}$$

$$\Delta T = \frac{2180}{1050} \cdot \frac{42,5}{3} = 29,4^\circ\text{C}$$

Température de la face de cuivre en contact avec le Cobalt :

$$T = 226 + 29,4 \simeq 256^\circ\text{C}$$

2.3.3. Température T_p de la gaine des plaquettes de Cobalt les plus chaudes.

Ne connaissant pas les résistances thermiques de contact dans un empilement de plaquettes, ni les résistances entre le Cobalt et sa gaine, il a fallu réaliser un essai de conduction à travers un empilement de plaquettes actives. Cet essai, réalisé dans l'air, a donné un écart global de température de 180 °C entre la plaquette la plus chaude et l'évacuateur.

La température maxi atteinte par les plaquettes peut donc être évaluée à

$$T_{max} = 256 + 180 = 436^\circ\text{C}$$

3. — LES SÉCURITÉS

La source de 300 000 curies présente un danger réel que nous n'avons pas le droit de sous-estimer. Il fallait pouvoir garantir que, quel que soit l'incident, aucune plaquette de cobalt ne risquerait de se trouver hors de la protection. Pour fixer les idées, il faut dire en effet que cette source est la plus puissante qui ait jamais été construite au monde.

La protection en cas de choc étant assurée par la conception très robuste de la source, le risque le plus redoutable est constitué par un manque de refroidissement de la source provoquant une élévation de température pouvant conduire à la fusion du cœur. La puissance dégagée est relativement faible (4 500 W) pour échauffer les 1 700 kg de cuivre et les 1 250 kg d'uranium mais si l'élévation de température est lente, elle se poursuit inexorablement en cas de non refroidissement car, et c'est une des particularités de ce type de source de chaleur, il est absolument impossible d'arrêter le dégagement thermique.

3.1. Sécurité n° 1.

La température normale du fluide primaire est de 216 °C et nous avons prévu une première intervention lorsque cette température atteint 260 °C.

Deux thermostats à pression de vapeur actionnent un vérin pyrotechnique qui vient briser une glace mettant ainsi en communication le circuit primaire avec un condenseur de secours à circulation par convection naturelle.

Le fluide primaire continue ainsi à assurer le refroidissement de la source par le condenseur de secours et la température baisse. Par contre, si une fuite du liquide primaire est à l'origine de la défaillance, le condenseur de secours est inopérant et la température continue à monter.

3.2. Sécurité n° 2.

Lorsque la température dans la cuve atteint 321 °C, la liaison entre deux viroles de la cuve réalisée en cadmium fond brutalement provoquant la chute de l'ensemble de la cuve et de son calorifuge dans une fosse aménagée à cet effet. La source se trouve alors à l'air libre et peut se refroidir par convection naturelle (température d'équilibre 150 °C).

3.3. Sécurité n° 3.

En cas de non fonctionnement de l'une des deux sécurités précédentes, il a été prévu une troisième sécurité, destinée à assurer dans tous les cas un maintien de la source à une température inférieure au point de fusion des protections.

A 360 °C deux thermostats déclenchent la mise à feu de quatre vérins pyrotechniques qui extraient les goupilles de positionnement du calorifuge. Celui-ci glisse alors le long de la cuve et tombe dans la fosse inférieure. La cuve n'étant plus calorifugée les pertes dans l'atmosphère à travers la cuve sont suffisantes pour maintenir la source à une température assez basse pour qu'il n'y ait pas de dommages.

Toutes ces sécurités ont été essayées plusieurs fois avant leur mise en place sur l'installation et ont donné entière satisfaction. Leur simplicité, la grande fiabilité des composants utilisés sont d'ailleurs une des meilleures garanties de bon fonctionnement.

4. — CONCLUSIONS

Il n'est pas possible dans le cadre de cet exposé de décrire en détail toutes les mesures faites, d'abord sur une maquette à chauffage électrique, puis sur la source elle-même. Ces essais ont demandé plusieurs mois de travail mais ont permis de connaître très exactement la puissance thermique de la source nucléaire et de mesurer le rendement global de la transmission de chaleur.

Grâce à un calorifuge particulièrement soigné et à une disposition judicieuse des différentes

parties, les pertes entre la source de chaleur et le fluide secondaire actionnant le premier étage de la turbine sont de l'ordre de 1 %, soit un rendement global de 99 % (50 W de pertes pour une puissance installée de 4 500 Watts).

Le rendement thermodynamique de la conversion n'est évidemment pas aussi bon, surtout dans cette gamme de puissance, et de gros progrès restent à accomplir dans ce domaine.

Sur le plan de la fiabilité le dispositif, installé à Serans sur un site isolé, fonctionne sans surveillance ni entretien depuis le 21 juin 1971. Il est capable de délivrer de l'énergie électrique durant deux ans, période au bout de laquelle la puissance sera encore les 3/4 de la puissance d'origine. Lorsque la source sera alors démantelée, les plaquettes de cobalt rayonneront encore plus de 200 000 curies et seront récupérables pour des applications médicales ou autres ce qui permettra de les valoriser.

En définitive, on peut dire que la construction d'un générateur à source radioisotopique est possible mais pour obtenir des puissances de quelques centaines de Watts, il est nécessaire d'améliorer le rendement du convertisseur afin de limiter l'investissement initial au niveau de la source et de rendre économiquement intéressant le procédé.

Références

- GLASSMAN, A.J., 1965. — Thermodynamic and turbomachinery concepts for radioisotope and reactor Brayton-cycle space power systems, NASA-TN-D-2968, 1965, 30 pages.
- ANONYME. — Energy systems of extended endurance in the 1-100 KW range for undersea applications, AD-681-068, 1968, 123 pages.