

**ASSEMBLAGE ET FIXATION DES STRUCTURES ISOLANTES
DE CÉRAMIQUE DANS LES CAISSONS DE BÉTON
DES RÉACTEURS À HAUTE TEMPÉRATURE**

**(ASSEMBLING AND FIXING OF CERAMIC INSULATION STRUCTURES
IN THE CONCRETE VESSELS OF HIGH TEMPERATURE REACTORS)**

P. FELTEN

*Commissariat à l'Énergie Atomique, Centre d'Études Nucléaires de Saclay,
Division d'Étude et de Développement des Réacteurs, Service des Études Mécaniques et Thermiques,
F-91190 Gif-sur-Yvette, France*

SUMMARY

A new concept using cast fused silica is proposed here to design thermal barriers of a high temperature reactor as well for the vertical walls of the hot plenum as for the hot ducts.

Cast fused silica has already been used in H.T.R.'s for horizontal structures. For vertical walls we propose a new concept based on the ordinary furnace construction techniques where the silica blocks are held together by a silica cement.

A test rig has been constructed to investigate the behaviour of such a construction versus time and under thermal cyclings. The rig is made of two cast silica walls in front of each other with a heating resistor between them which allows the hot face temperature to go as high as 850°C. The cold face is kept at a low temperature so that the temperature gradient across the walls is about the same as that of an actual thermal barrier in a reactor.

The results of these tests series will be given here.

For the hot duct insulation a different system is used. A cast silica ring is maintained in the steel cylinder defined by the liner by the mean of a closed metallic sheet, so called "annular jack", which is injected with a pressurised fluid material. This material solidifies after a while and so the "jack" is kept under pressure.

This system allows the gap between the silica ring and the liner to remain closed and puts a prestress on the silica ring. When the internal face of the silica ring is heated up this prestress balances the tensile stresses on the outer face of the silica ring.

A test ring has also been constructed to verify the behaviour of this concept versus time and with thermal cyclings. The rig is designed exactly as described here with an annular resistor to heat up the internal face of the silica ring up to 850°C, the cold face being kept at a low temperature.

The results of these tests will be given here.

As a conclusion, we will present a fully new thermal barrier concept for high temperatures using solid ceramic material.

1. Généralités

Un certain nombre de réacteurs à haute température utilisent une architecture particulière dans laquelle les échangeurs de chaleur sont logés dans des alvéoles ménagés dans l'épaisseur de la paroi du caisson en béton précontraint. Il est par conséquent nécessaire de canaliser le gaz chaud à travers les parois du caisson vers les échangeurs par ce que l'on appelle les conduits chauds.

Le sens du gaz étant en général descendant dans les réacteurs en projet, ces conduits relient la cavité chaude du réacteur située sous le coeur au bas des échangeurs.

Les problèmes de calorifugeage des réacteurs à haute température sont surtout importants dans la cavité chaude, le conduit chaud et le bas des échangeurs (figure 1).

Jusqu'à présent, les différents projets présentés utilisent soit des calorifuges à base de fibres céramiques recouvertes de plastrons métalliques soit des calorifuges de type entièrement métallique. On a également utilisé dans les parties horizontales de la cavité chaude du réacteur de FORT-ST-VRAIN, aux Etats-Unis, construit par GULF GENERAL ATOMIC, des blocs de silice alvéolaire usinés. Ce produit est connu commercialement sous le nom de Masrock.

C'est cette solution que nous envisageons d'étendre à toutes les parties chaudes du réacteur. En effet, les calorifuges fibreux présentent des inconvénients car leurs parties métalliques sont sensibles aux vibrations et aux frottements. D'autre part, leur comportement dans le temps, notamment du point de vue de la relaxation, n'est pas connu avec certitude.

Les calorifuges métalliques, par contre, sont moins faciles à mettre en oeuvre, sont lourds et ont les inconvénients généraux des métaux travaillant à ces températures élevées, à savoir, frottements, usure et éventuellement corrosion. De plus, leur conductivité augmente en général nettement avec la température.

C'est pour pallier ces différents inconvénients que nous préconisons l'utilisation de produits céramiques massiques chimiquement inertes et ayant une bonne résistance aux chocs thermiques.

Le produit sélectionné pour nos premières études est celui qui a déjà été utilisé par G.G.A., le Masrock.

Ce produit résiste exceptionnellement bien aux chocs thermiques en raison de son faible coefficient de dilatation qui est de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-6}$ $(^{\circ}\text{C m})^{-1}$. Sa conductivité thermique est également très acceptable, de l'ordre de $0,7 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ aux environs de 800°C .

Les solutions de mise en oeuvre de ce produit que l'on décrira ici sont évidemment valables pour tout autre produit céramique ayant des propriétés identiques, notamment du point de vue du coefficient de dilatation.

2. Murs horizontaux et verticaux

2.1 Zones horizontales

Les plans horizontaux à garnir à l'aide de ces céramiques ne présentent pas de difficultés particulières. Les briques sont moulées et non usinées, ce qui serait une opération très onéreuse. Les inégalités de la surface support, généralement métallique, sont rattrapées à l'aide de ciment de silice. De plus, les briques sont jointes entre elles par des joints en ciment de silice. De cette façon, on peut obtenir des surfaces relativement planes faciles à monter.

2.2 Zones verticales

Les plans verticaux présentent davantage de difficultés. Ils doivent présenter plusieurs qualités essentielles, à savoir :

- stabilité dynamique sous l'effet des mouvements du caisson (éventuellement séismes) ;
- intégrité mécanique, notamment absence de fissuration au niveau des joints cimentés ;
- bon contact avec la paroi verticale en acier pour éviter des passages de gaz derrière le mur sous l'effet du gradient de pression vertical.

Sur la figure 2, on trouvera une solution possible pour une partie courante du mur vertical. Le mur proprement-dit est constitué de grosses briques de forme générale cubique liées entre elles par du mortier. Ce mortier est un mortier à éléments colloïdaux. Il a l'avantage de perdre une grande partie de son eau non chimiquement liée à des températures inférieures à 100°C . Les joints de mortier ont une épaisseur de 3 à 4 mm. Les briques sont empilées les unes sur les autres et si l'on craint les problèmes de stabilité, on prévoit de lier le mur à la peau d'étanchéité par un système de clés installées au moment du montage du mur. Le système est prévu de telle façon que chaque clé maintienne deux briques superposées. Les clés sont donc disposées sur un réseau rectangulaire de hauteur $2h$ et de largeur h si h est la longueur de l'arête d'une brique.

On peut également imaginer des variantes avec une clé pour quatre briques.

Dans le cas où l'on ne craint pas de problèmes de stabilité dus aux séismes ou autres causes de mouvements, on peut se contenter d'un ancrage en haut du mur car la hauteur totale du mur ne dépassera pas trois mètres étant donné que dans les parties plus froides du réacteur, on pourra utiliser des calorifuges plus classiques.

Au cours du vieillissement du mur avec les cyclages thermiques, des jeux très faibles pouvant apparaître entre le ciment et la paroi d'acier, on prévoit deux dispositifs supplémentaires.

D'une part la peau d'étanchéité portera un grillage soudé par points et destiné à améliorer l'adhérence entre le ciment et la paroi d'acier.

D'autre part, à plusieurs niveaux horizontaux des cornières minces soudées sur la peau d'étanchéité au cours du montage du mur seront noyées dans le ciment pour faire une étanchéité quasi absolue et éviter tout by-pass en cas d'apparition d'un jeu même faible entre le ciment et la peau d'étanchéité métallique.

Pour soumettre ce type de structure à des conditions d'essais réalistes, un banc d'essai permettant des cyclages en température entre l'ambiante et 800°C, a été construit (Figure 3).

L'ensemble est constitué de deux murs plans de briques de céramique d'environ 0,3 m d'épaisseur montés à l'aide du ciment de silice et collés sur la paroi froide métallique à l'aide de ce même ciment.

Entre ces deux murs se trouve une résistance chauffante électrique qui permet de monter la température des faces chaudes des murs à 800°C en cinq à six heures. La paroi froide est maintenue à 50°C au maximum grâce à une circulation d'eau.

La durée de refroidissement peut être lente, de l'ordre d'une dizaine d'heures, en évacuant la chaleur par les circuits d'eau, ou rapide en refroidissant à l'aide d'un ventilateur à air. Dans ce cas, un profil type de cyclage est donné sur la figure 4.

Actuellement, cette installation est en cours de fonctionnement. Une première série de cyclages entre 20 et 500°C a été faite. L'ensemble s'est très bien comporté. Au démontage, on a trouvé que les joints de mortier entre les briques étaient intacts.

Par contre, le mortier s'était décollé de la paroi d'acier en créant un jeu d'environ deux dixièmes de millimètre.

Actuellement une série de cyclages entre 20 et 800°C est en cours. Une vingtaine de cyclages a déjà été exécutée sans dommage pour la structure.

3. Conception du tuyau chaud

Le tuyau chaud ne se prête que difficilement à une solution maçonnée du genre de celles que nous venons d'indiquer, c'est pourquoi on a recherché un type de solution différent.

Les caractéristiques auxquelles le montage doit répondre sont essentiellement :

- stabilité dynamique sous l'effet des mouvements du caisson et sous les excitations du gaz (la vitesse peut être élevée dans le tuyau) ;
- stabilité de positionnement dans le temps ;
- intégrité mécanique notamment au niveau des jonctions ;
- contact intime entre l'ensemble tuyau chaud et la peau d'étanchéité du caisson (à cause des différences de pression élevées entre l'entrée et la sortie du tuyau ;
- bonne résistance aux cyclages thermiques.

On voit que pour la plupart de ces points, un matériau massif, insensible aux vibrations et aux chocs thermiques, est préférable.

La solution préconisée ici est encore à base de silice alvéolaire (Figure 5).

L'ensemble est constitué d'anneaux de silice alvéolaire moulés et non usinés emboîtés à la suite les uns des autres.

Entre ces anneaux et la peau d'étanchéité métallique, on glisse une ou plusieurs enveloppes métalliques fermées qui sont mises sous pression à l'aide d'un fluide solidifiable suffisamment élastique après solidification pour maintenir la précontrainte sur les anneaux de silice alvéolaire.

De cette façon, on obtient les résultats suivants :

- bon positionnement des anneaux calorifuges dans le conduit ;
- obstruction des jeux entre l'anneau et la peau d'étanchéité, donc pas de fuites de gaz chauds le long de la paroi métallique ;

- stabilité dans le temps assurée par le travail du milieu de remplissage à faible température ;
- contraintes d'extension sur la face externe de l'anneau contre-balancées par la précontrainte. Par conséquent, le matériau travaillera au minimum de traction.

Les calculs ont montré que la pression d'injection minimale du vérin devait être de l'ordre de 2 MPa (20 bars) pour ne dépasser une certaine valeur en traction sur la face externe de l'anneau céramique dans les diverses conditions de fonctionnement et maintenir un bon positionnement de l'ensemble. Par contre, la pression maximale possible est très élevée à cause de la bonne résistance à la compression à froid de cette céramique et de l'adaptation des contraintes dans les parties chaudes.

Pour vérifier la tenue aux sollicitations réelles de ce concept, une installation d'essai en cyclages thermiques statiques a été conçue. On trouvera son aspect général sur la figure 6).

L'ensemble est constitué de plusieurs anneaux de silice alvéolaire empilés les uns sur les autres. L'anneau central est maintenu dans un cylindre en acier refroidi à l'extérieur et représentant la peau d'étanchéité du caisson par un vérin plat injecté d'eau sous pression pour les besoins de l'essai.

A l'intérieur de cet anneau calorifuge se trouve une résistance chauffante permettant d'amener la paroi à 850°C environ.

La face interne de la résistance est thermiquement protégée par d'autres anneaux de silice alvéolaire.

Les cyclages de température sont provoqués par coupure du chauffage et soufflage à l'aide d'un ventilateur à air.

L'instrumentation comporte des jauges de contrainte sur la face externe de l'anneau précontraint qui permettent la surveillance de la mise en pression.

De plus, les faces chaudes et froides sont équipées de thermocouples permettant de suivre l'essai et de déterminer le flux évacué par les tubes de refroidissement.

Le montage expérimental est actuellement en cours d'essai. Nous espérons pouvoir présenter une série complète de résultats au moment de la présentation de ce papier.

4. Zones de raccordement

Les zones de raccordement entre la partie courante du tuyau chaud et le mur cylindrique vertical sont délicates à traiter. Cependant, grâce à l'utilisation de briques rendues solidaires suivant des techniques simples de maçonnerie, les difficultés sont simplifiées. On envisage actuellement d'utiliser une technique faisant intervenir un anneau de céramique moulé en forme s'adaptant à l'extrémité du tuyau chaud. Son rôle sera d'abord de faire la transition entre la partie verticale et le tuyau horizontal et de protéger le métal du véricin de la température (Figure 7).

5. Conclusion

L'utilisation de céramiques dont les caractéristiques essentielles sont le faible coefficient de dilatation en température et une conductibilité thermique relativement basse peut être une solution intéressante pour les réacteurs à haute température de la génération actuelle. Cette solution a notamment l'avantage d'une grande fiabilité vis-à-vis des sollicitations dues à la température et à l'écoulement de gaz.

Les essais en cours laissent espérer que la tenue dans le temps est également excellente.

Tout ceci permet de penser que ces techniques pourront être utilisées dans des réacteurs à haute température plus avancés avec des températures de sortie plus élevées.

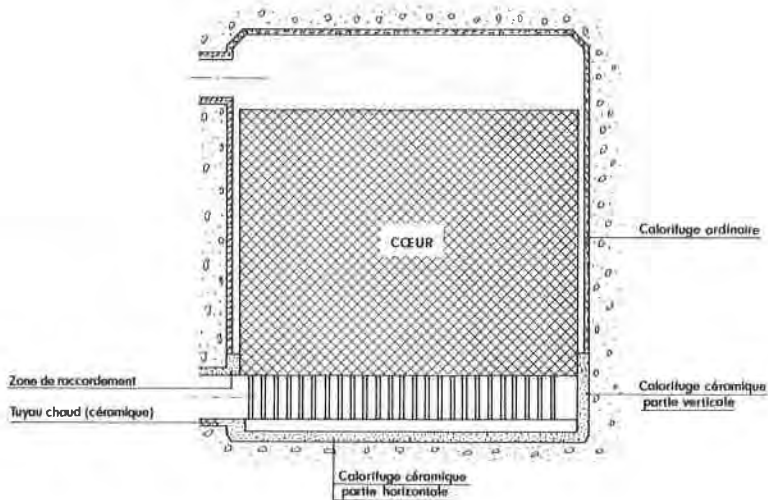


Figure 1 - Coupe schématique d'un caisson de réacteur à haute température,

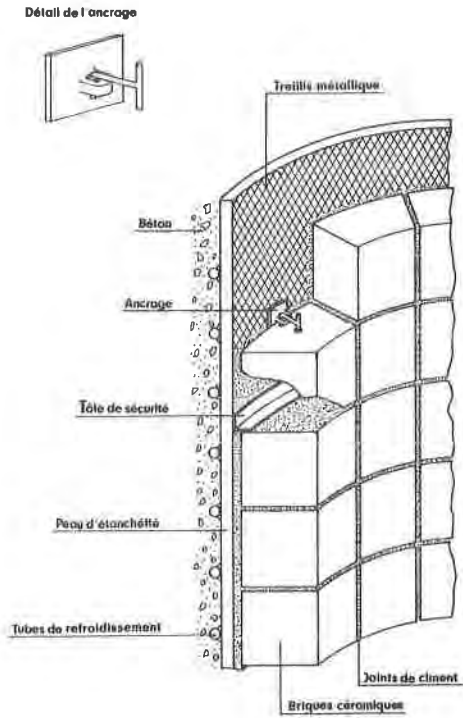


Figure 2 - Schéma d'une solution d'isolation thermique d'une paroi verticale.

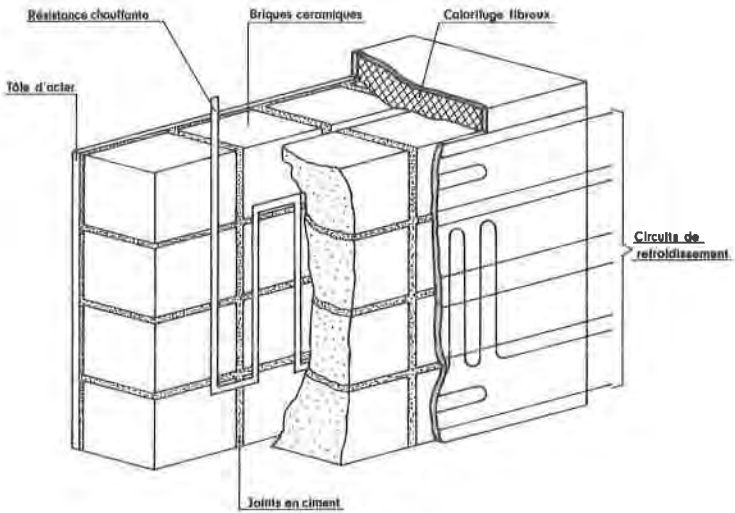


Figure 3 - Schéma du banc d'essai de murs verticaux.

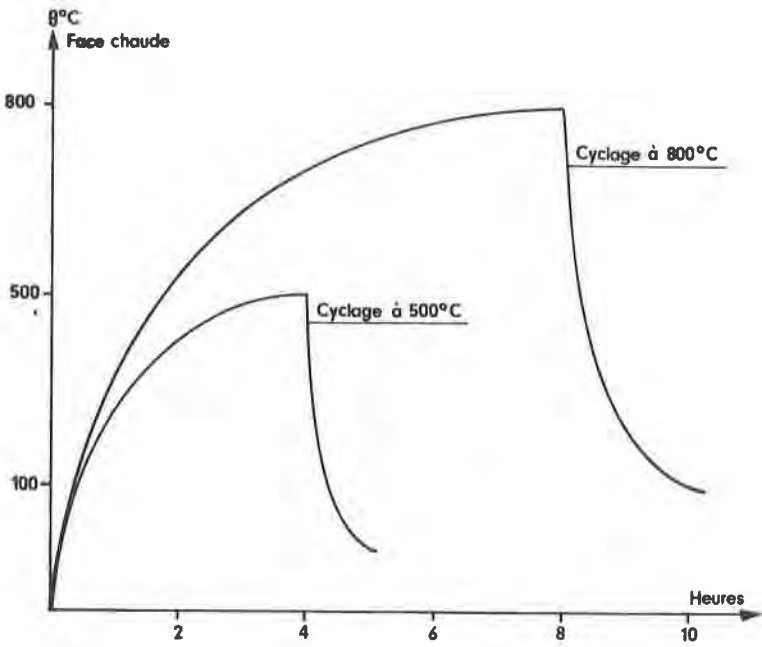


Figure 4 - Forme des cyclages de température des murs verticaux.

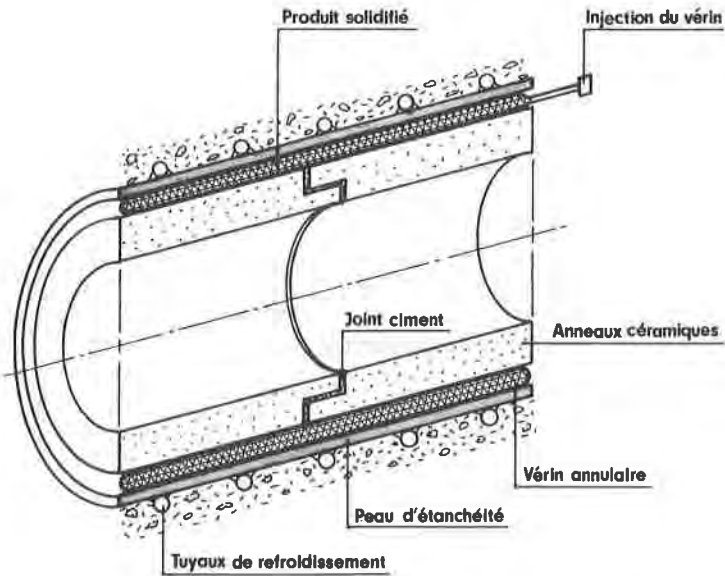


Figure 5 - Schéma d'une solution d'isolation d'un tuyau chaud à l'aide de produits céramiques.

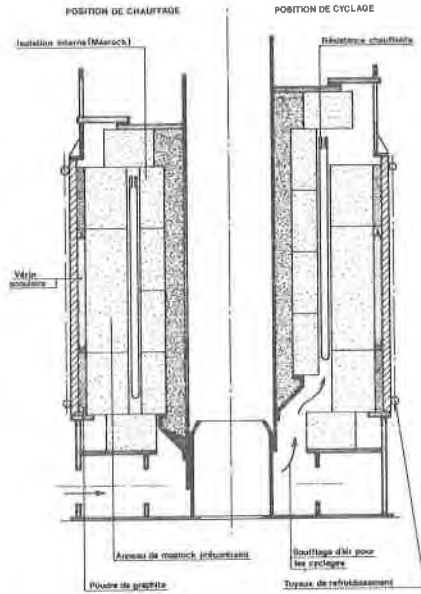


Figure 6 - Montage d'essai d'un tuyau chaud de type céramique.

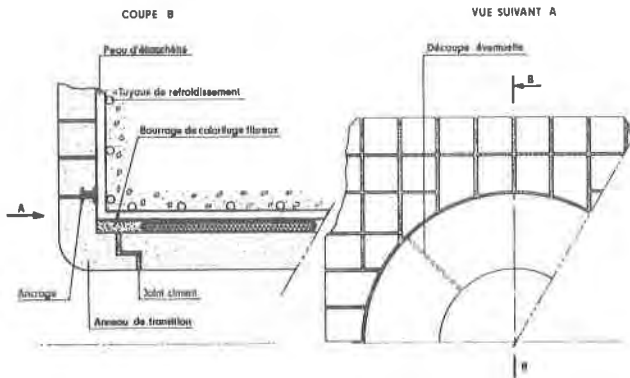


Figure 7 - Raccordement des parties horizontales et verticales.