

EMBALLAGE ET ETUI DE TRANSPORT D'ASSEMBLAGES IRRADIES DE SURVEILLANCE DU RNR DE CREYS-MALVILLE

J. GEFFROY, J. VIVIEN, M. POUARD

Département des études mécaniques et thermiques,
CEA, Institut de recherche technologique et de
développement industriel (IRDI),
Centre d'études nucléaires de Saclay,
Gif-sur-Yvette

F. LAFAURIE

Compagnie générale des matières nucléaires (Cogéma),
Vélizy-Villacoublay

G.N. DUJARDIN

USSI Ingénierie,
Bagneux

B. VERON

Novatome,
Le Plessis-Robinson

H. MICHOUX

Centrale nucléaire européenne
à neutrons rapides SA (NERSA),
Lyon

France

Abstract-Résumé

TRANSPORT PACKAGING AND SHROUD FOR IRRADIATED MONITORING ASSEMBLIES FROM THE CREYS-MALVILLE FAST REACTOR.

Certain irradiated assemblies from the Creys-Malville fast reactor are transported to hot cells for examination. With a maximum decay power of 10 kW, these assemblies are transported under liquid sodium in order to spread out the heat flux since the power is actually released over only part of the length. The requirement of transport under sodium and the constraints imposed by the examination of the fuel following transport have required certain special design characteristics. The fuel assembly is first conditioned in a tightly sealed shroud containing sodium. The shroud is then inserted into the package. The body of the package has a single compartment and consists of a thick steel cylindrical shell, the inside of which is lined by a stainless steel tube. Two annular chambers at the extremities of the cylinder contain heat insulation to prevent solidification of sodium in the regions distant from the fissile part of the assembly where the heat is released. The paper contains a thermal analysis of the package in normal transport conditions and in emergency conditions.

EMBALLAGE ET ETUI DE TRANSPORT D'ASSEMBLAGES IRRADIES DE SURVEILLANCE DU RNR DE CREYS-MALVILLE.

Certains assemblages irradiés du réacteur à neutrons rapides de Creys-Malville sont transportés vers des cellules d'examen. D'une puissance résiduelle maximale de 10 kW, ils sont transportés sous sodium de façon à étaler le flux de chaleur, la puissance étant dégagée sur une longueur restreinte. Le transport sous sodium, et les contraintes imposées par les examens du combustible après transport, ont conduit à certaines particularités de conception. L'assemblage combustible est d'abord conditionné dans un étui étanche contenant du sodium. Cet étui est ensuite introduit dans l'emballage. Le corps de l'emballage, monoalvéole, est constitué d'une virole épaisse, en acier, dont l'alvéole est chemisé par un tube en acier inoxydable. Deux chambres annulaires, aux extrémités de l'alvéole, contiennent un calorifuge dans le but d'empêcher le gel du sodium dans les zones éloignées de la partie fissile, siège du dégagement de chaleur. On présente ici une analyse thermique de l'emballage en conditions normale et accidentelle de transport.

1. INTRODUCTION

Certains assemblages irradiés de la centrale à neutrons rapides de Creys-Malville seront transportés vers des laboratoires chauds pour y subir divers examens. On les appelle «assemblages irradiés de surveillance». Les examens auront pour but de suivre le comportement des assemblages du cœur au cours de l'irradiation.

Ces assemblages de surveillance pourront être examinés après un temps limité de refroidissement pour disposer rapidement des résultats d'examen. Il est alors prévu de pouvoir les transporter à des puissances résiduelles élevées (≈ 10 kW) vers les laboratoires chauds, mais sans excéder une température maximale de 500°C sur les gaines. Comme le scénario d'évacuation des assemblages irradiés de Creys-Malville ne comprend pas de phase de démantèlement et de métrologie sur le site même du réacteur, les assemblages doivent être transportés entiers.

Cette contrainte, associée à la puissance résiduelle élevée, a conduit à retenir le procédé de transport en sodium. Pour cela, l'assemblage est d'abord mis dans un étui contenant du sodium. L'étui est ensuite obturé et placé dans un emballage. Comme il s'agit de transporter une quantité très limitée d'assemblages irradiés et bien échelonnée dans le temps, on a retenu le principe d'un emballage monoalvéole ne transportant qu'un seul assemblage à la fois (fig. 1).

2. PRINCIPES DE L'EVACUATION ET DU TRANSPORT

L'assemblage de surveillance est sorti du barrillet de stockage en sodium du réacteur et transféré par un conduit (sas de transfert) dans la cellule supérieure (fig. 2). Cette cellule est en atmosphère d'azote. Le dispositif de manutention est équipé d'un grappin souffleur qui permettrait de refroidir l'assemblage si cela était rendu nécessaire par suite d'un temps de séjour trop long en atmosphère gazeuse.

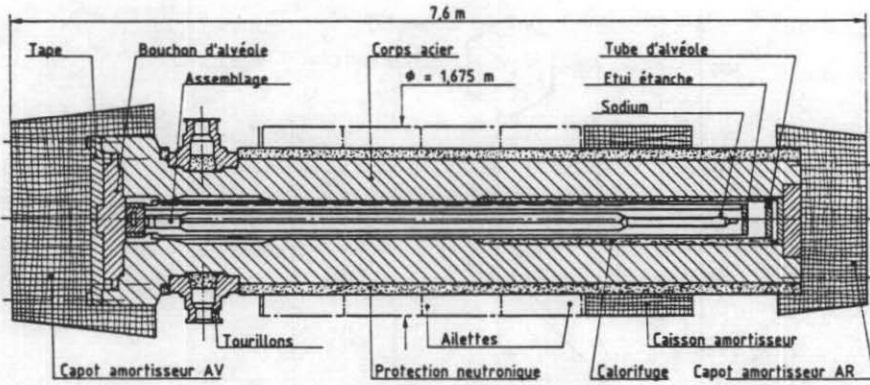


FIG. 1. Schéma de l'emballage.

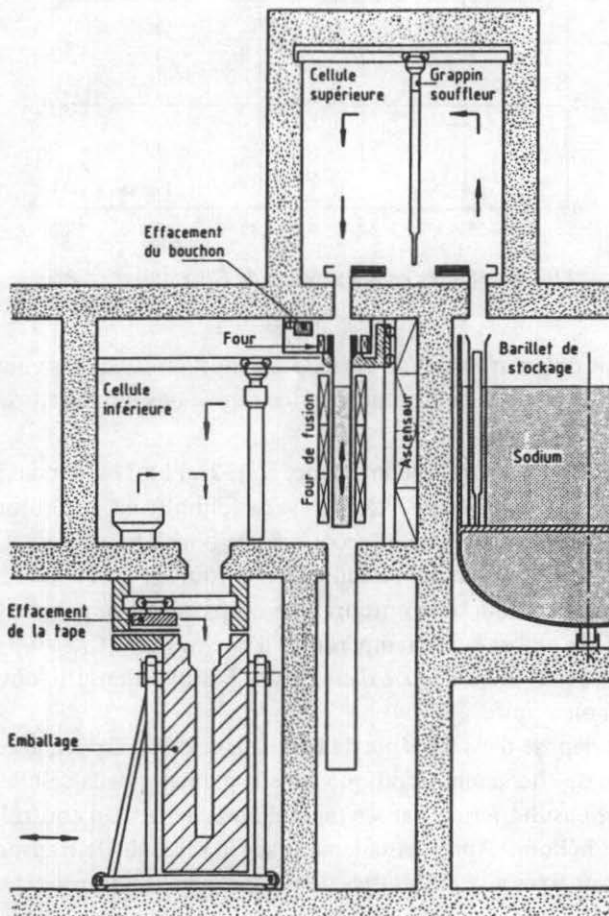


FIG. 2. Scénario d'évacuation.

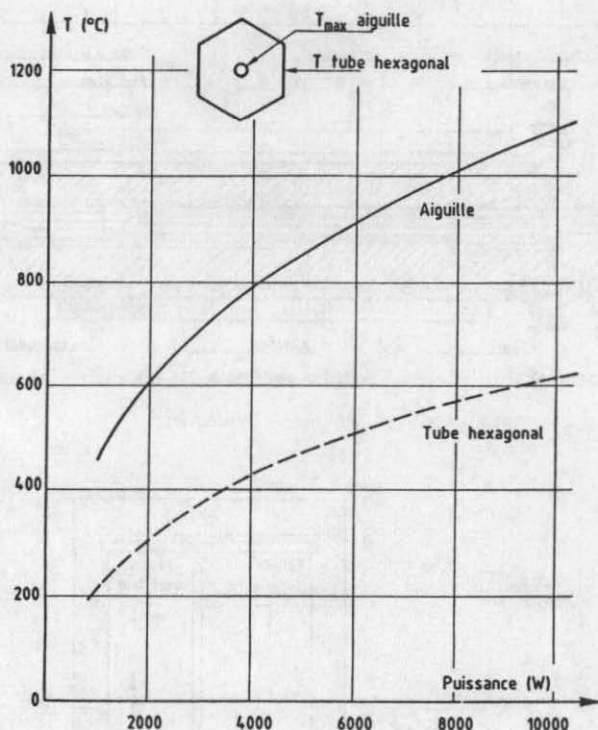


FIG. 3. Montée en température de l'assemblage en gaz.

En effet, on sait qu'en atmosphère gazeuse, la configuration très confinée de la zone de dégagement de chaleur induit une montée rapide des températures d'aiguilles (fig. 3).

Au préalable, dans la cellule inférieure (fig. 2), l'étui contenant le sodium a été accosté à la cellule supérieure. L'étui, avec sodium froid, est obturé par un bouchon fretté thermiquement. Après accostage, ce bouchon est ouvert par défrettage thermique à l'aide d'un petit four à induction entourant la tête de l'étui.

Un autre four à induction, entourant le corps de l'étui, permet de liquéfier le sodium, puis de le porter à une température d'environ 200°C.

L'assemblage est alors déposé dans l'étui. L'étui est ensuite obturé par frettage thermique du bouchon.

L'étui est déposé dans l'alvéole de l'emballage de transport, accosté verticalement à l'orifice de chargement pratiqué dans le plancher de la cellule inférieure. L'emballage est ensuite fermé par ses tapes d'étanchéité. Un contrôle d'étanchéité est fait par test hélium. Après basculement sur le véhicule de transport, les capots amortisseurs sont fixés aux extrémités de l'emballage. Le transport est effectué et les opérations de déchargement à la cellule d'accueil se retrouvent dans l'ordre inverse de celles du chargement.

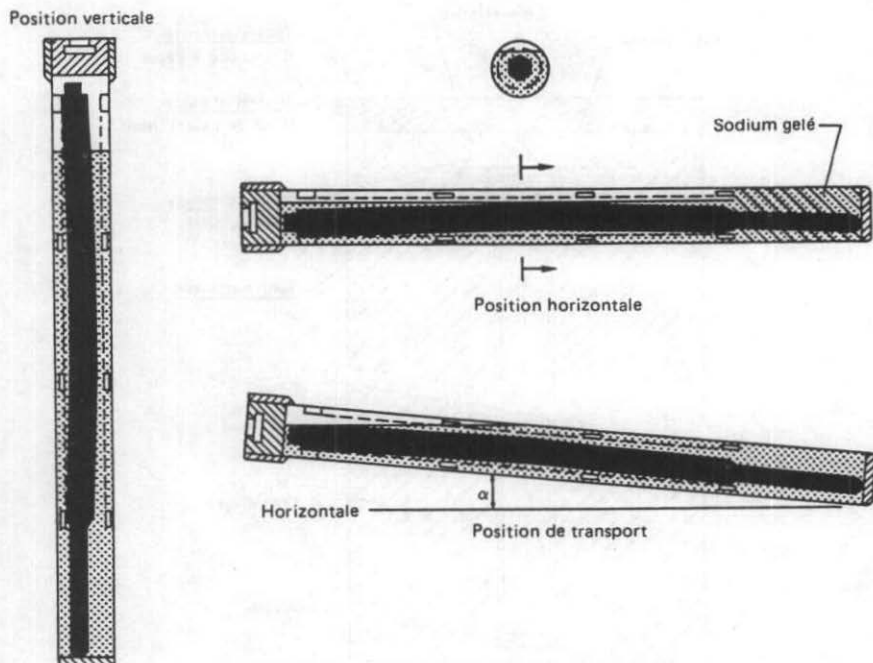


FIG. 4. Principe de dimensionnement de l'étui.

3. PRINCIPES DU DIMENSIONNEMENT FONCTIONNEL DE L'ETUI ET DE L'EMBALLAGE

3.1. Etui

Le choix du sodium comme fluide caloporteur ayant été fait par suite du très mauvais refroidissement en gaz, on s'est donc attaché en priorité à dimensionner l'étui et l'alvéole de l'emballage pour éviter le dénoyage des parties fissiles en toutes circonstances.

Pour cela, on a tenu compte:

- des déformations maximales possibles des assemblages après irradiation;
- de la rupture de la totalité des gaines des aiguilles;
- des positions verticales, horizontales et inclinées rencontrées dans les diverses manutentions;
- de la rupture éventuelle de l'étui dans l'emballage, résultant d'un choc;
- de la possibilité de gel de sodium dans la zone du pied de l'assemblage.

A l'intérieur de l'étui, chargé de l'assemblage et du sodium, on ménage un espace gazeux.

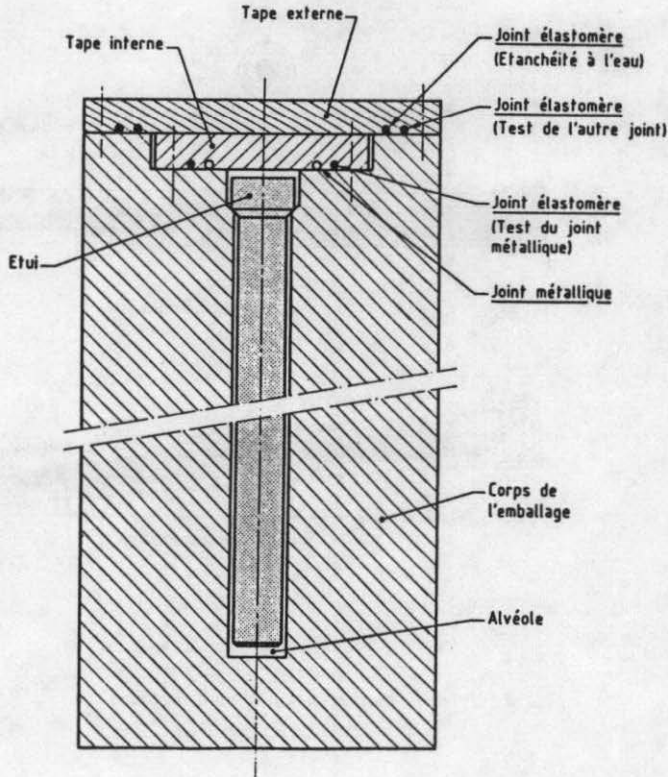


FIG. 5. Principe du confinement de l'emballage.

Cet espace est nécessaire pour limiter les variations de pression liées aux variations de température, aux dilatations du sodium et à la libération des gaz de fission s'échappant des gaines rompues.

Son volume a été conçu pour ne pas excéder une pression de 15 bar en cas de rupture totale des gaines. De plus, ce volume est conçu pour qu'en position verticale, la tête de l'assemblage se trouve toujours hors sodium, afin de faciliter les manutentions de l'assemblage.

En position horizontale, les volumes du sodium et de l'étui sont tels que la surface liquide de sodium reste toujours au-dessus des aiguilles (fig. 4). On a, dans ce cas, fait les hypothèses conservatrices suivantes:

- l'assemblage est placé dans sa plus mauvaise position (arcure vers le haut et sur angles);
- le sodium entourant le pied est gelé;
- du sodium a remplacé les gaz de fission dans les chambres d'expansion des aiguilles supposées rompues;
- la température du sodium est à la limite du gel (100°C).

La position horizontale entraîne une dissymétrie des températures entre les génératrices haute et basse de l'étui, donc une légère arcure. Ceci est pris en compte dans le calcul de la tenue mécanique des structures.

On considère toutefois que la position horizontale ne doit pas être la position normale de transport. En effet, les sollicitations dynamiques au cours du transport agiteraient continuellement la surface libre de sodium liquide, et ceci aurait pour conséquence de provoquer des petits cyclages thermiques, par dénoyages aléatoires des aiguilles proches de la surface, ainsi que des sollicitations mécaniques sur l'assemblage. Tout ceci serait préjudiciable aux examens des assemblages. On a donc choisi de transporter l'emballage en position inclinée par rapport à l'horizontale. Dans cette position, la surface libre de sodium est réduite et les clapotis ne peuvent plus dénoyer d'aiguille.

3.2. Emballage

L'alvéole de l'emballage est conçu pour ne former qu'un faible volume gazeux entre sa cavité et l'étui. Ainsi, dans le cas éventuel d'une fuite de l'étui consécutif à un accident, le volume global occupable par le sodium assurerait toujours un niveau suffisant dans l'étui pour ne pas dénoyer des aiguilles.

Par ailleurs, pour reculer l'apparition du gel de sodium, l'alvéole de l'emballage est entouré de calorifuge dans ses parties extrêmes.

L'enceinte de confinement de l'emballage est constituée par l'alvéole obturé par deux tapes d'étanchéité (fig. 5). La plus près de l'étui (ou la tape interne) assure l'étanchéité au sodium et aux gaz de fission par un joint métallique. La tape externe, venant coiffer la tape interne, assure l'étanchéité à l'eau extérieure par un joint élastomère.

La procédure du contrôle d'étanchéité aux gaz de fission est basée sur le test hélium.

Ce test aura lieu à la centrale avant chaque expédition de l'emballage chargé.

4. ETUDE DU FONCTIONNEMENT THERMIQUE

L'étude thermique a été réalisée à l'aide du programme de calcul par éléments finis DELFINE du CEA.

L'évacuation thermique s'effectue essentiellement par:

- conduction et convection naturelle dans l'étui rempli de sodium;
- conduction et rayonnement dans les jeux entre étui et alvéole;
- conduction dans le corps acier de l'emballage et la coque composite externe contenant des ailettes et la protection neutronique;
- convection naturelle vers le milieu ambiant par des ailettes donnant un coefficient d'échange d'environ $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/^{\circ}\text{C}$ et par apport de rayonnement solaire;
- par convection et rayonnement d'un environnement à 800°C en cas d'incendie.

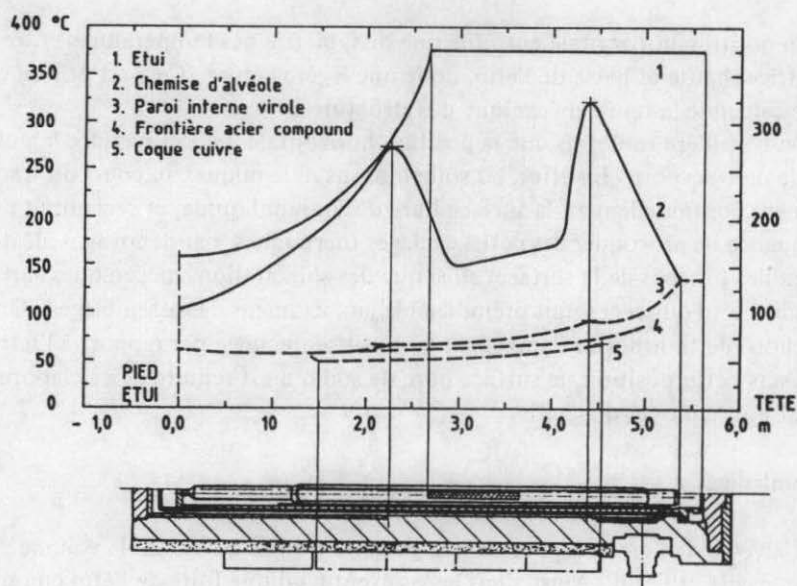


FIG. 6. Répartition des températures en régime normal.

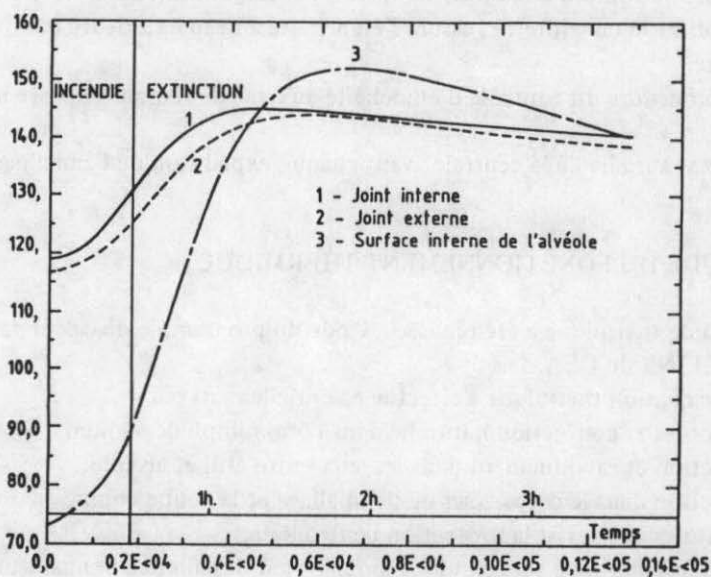


FIG. 7. Evolution des températures des joints après extinction de l'incendie.

On donne (fig. 6) une répartition des températures sur les différentes structures du colis chargé d'un assemblage irradié dissipant 10 kW dans les conditions normales de transport.

La température de l'étui est de 375°C.

Le calcul correspond à la position inclinée (ou verticale). Dans ces conditions, la zone de sodium située sous la partie fissile se comporte comme une ailette dissipant la chaleur par conduction du haut vers le bas.

La zone de sodium située vers le haut à partir du début de la zone fissile transporte de la chaleur par convection naturelle, ce qui aboutit à une température d'étui quasi uniforme dans cette zone.

La distribution de la température interne de l'alvéole comporte deux pointes qui correspondent à la présence du calorifuge. Des essais thermiques sur l'emballage en fin de construction ont confirmé ces valeurs.

Les calculs des régimes transitoires avec un incendie aboutissent à une température maximale d'étui de 410°C. Cette valeur est atteinte environ 1 h30 après l'extinction de l'incendie. Le calcul de la température des joints, dans ces conditions, montre que, pour l'élastomère choisi, il n'y aura pas détérioration de l'étanchéité (fig. 7).

En ce qui concerne la connaissance de la température maximale de la gaine de l'aiguille centrale de l'assemblage, nous avons utilisé pour le calcul un modèle de transfert thermique par conduction pure dans les isthmes de sodium liquide. Ce type de calcul est un peu majorant puisqu'il ne prend pas en compte les mouvements de convection naturelle qui ont tendance à homogénéiser les températures dans la section droite.

Pour une puissance de 10 kW, ce modèle de calcul donne un Δt de 69°C entre l'aiguille centrale et l'étui, soit pour les températures maximales de gaine:

- 445°C en conditions normales,
- 480°C en conditions d'incendie.

Des expériences sont en cours pour préciser tous ces échanges thermiques. Elles sont réalisées avec un assemblage chauffant à l'échelle 1 dans un étui avec sodium.

5. PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS

5.1. Rayonnements γ

Le transport d'un assemblage fortement irradié a conduit à entourer l'alvéole d'une virole d'acier forgé de grande épaisseur.

5.2. Rayonnements neutroniques

La virole d'acier est ceinturée d'une couronne de compound neutrophage boré pour assurer l'absorption des rayonnements neutroniques émis par l'assemblage.

Le compound est coulé en place dans les alvéoles ménagés par les ailettes de conduction thermique entre le corps et les ailettes de dissipation.

L'ensemble de ces protections assure le respect des normes de débit de dose imposées, pour le transport, par la réglementation.

6. DIMENSIONNEMENT MECANIQUE DE L'EMBALLAGE ET DE L'ETUI

L'emballage, et son étui, doivent résister aux épreuves réglementaires auxquelles sont soumis les emballages de transport, dont la plus sévère est la chute d'une hauteur de 9 mètres sur sol indéformable, dans la position la plus dommageable.

Pour limiter les effets de cette épreuve, l'emballage a été doté de deux capots amortisseurs d'extrémité, d'une couronne d'amortissement latérale, et les tourillons de manutention ont été conçus pour procurer un certain amortissement lors d'un choc latéral.

Des essais de chute, exécutés à l'aide d'une maquette à l'échelle 1/5, ont permis de montrer que les décélérations, lors d'une chute de 9 mètres, seraient limitées à environ 70g, dans le sens longitudinal et à 250g dans le sens transversal.

La maquette renfermait, lors de ces essais, un étui maquette réalisé à la même échelle et contenant un assemblage maquette et une quantité d'eau représentative du sodium transporté. A l'issue des essais, aucune fuite ni déformation n'ont été constatées.

Pour compléter ces informations et pour s'assurer de la tenue du système fretté de fermeture de l'étui, des essais sur étui en grandeur réelle ont été effectués. Une chute avec décélération de 70g, dans l'axe longitudinal de l'étui, a montré la nécessité d'un verrouillage de sécurité. Une chute latérale, simulant le basculement de l'emballage autour de son pied, a montré la bonne tenue de la fermeture et du corps de l'étui.

D'autre part des essais systématiques en grandeur réelle ont permis de s'assurer de la bonne étanchéité au sodium de la fermeture frettée, tant en pression qu'en température, et pour des cycles de frettage-défrettage répétés. La configuration de la fermeture frettée est donnée sur la figure 8.

7. CONFINEMENT DES GAZ ET DES MATIERES RADIOACTIVES

La robustesse de l'emballage et de l'étui, et leurs modes de fermeture ne permettent pas la dispersion de matière radioactive solide ou liquide. Seuls les gaz de fission, contenus dans les gaines des éléments irradiés et pouvant être libérés lors d'un choc accidentel, sont susceptibles d'être dispersés. Pour la qualification du joint d'étanchéité aux gaz de fission, nous avons considéré la rupture de la totalité des gaines de l'assemblage lors du cas accidentel de transport et l'étui non étanche.

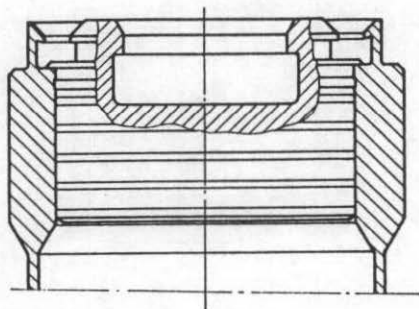


FIG. 8. Coupe de la fermeture frettée.

Dans ces conditions, la pression à l'intérieur de l'enceinte de confinement serait d'environ 5 bar.

Un test hélium, de l'étanchéité du joint, est effectué avant chaque transport. Pour respecter les règles de l'AIEA, le taux de fuite admissible lors de ce test, pratiqué avec la cavité à la pression atmosphérique, est de 4×10^{-3} Lusec d'hélium. Des essais des joints, effectués dans des conditions représentatives, ont permis de garantir une telle étanchéité.