

EVALUATION DES MARGES DE SECURITE DES EMBALLAGES DE TRANSPORT DE MATIERES RADIOACTIVES DANS DES CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT DE FEU SEVERES

P. GILLES, C. RINGOT, P. WARNIEZ,
L. GRALL, J. PERROT
CEA, Institut de protection et
de sûreté nucléaire (IPSN),
Fontenay-aux-Roses, France

Abstract-Résumé

EVALUATION OF THE SAFETY FACTORS FOR RADIOACTIVE MATERIAL TRANSPORT PACKAGINGS UNDER SEVERE FIRE CONDITIONS.

The international Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials guarantee a high level of safety, achieved mainly by a packaging design which is suited to the potential risk inherent in the materials being transported. In fact, many of the packages used at present are designed so that they behave satisfactorily in environmental conditions which are much more severe than the regulatory conditions. Any risk evaluation should be made with data which are as realistic as possible, including the behaviour of the packaging in relation to the nature of the accident (fire, collision, immersion and so on) and the associated source term. This is a basic objective for the validation of codes such as INTERTRAN developed by the IAEA. For all these reasons, a databank is needed on the behaviour of the main packagings used. Fire is an example of an accident environment which should be considered for two reasons: the probability of fires occurring with durations and temperatures greater than the conditions applied to Type B packages (800°C for 30 min) is not insignificant, particularly in the case of air and sea transport, and the associated risk may be considerable (transfer by inhalation). Studies have been conducted to identify safety factors for the packagings. These studies have been carried out in some cases by calculations and in others by tests. The paper presents the results obtained for different types of packagings; they show a high safety factor by comparison with regulatory fire conditions (800°C for 30 min).

EVALUATION DES MARGES DE SECURITE DES EMBALLAGES DE TRANSPORT DE MATIERES RADIOACTIVES DANS DES CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT DE FEU SEVERES.

Le Règlement international de transport des matières radioactives garantit un degré de sûreté élevé obtenu principalement par une conception de l'emballage adaptée au risque potentiel présenté par la matière transportée. En réalité, beaucoup de colis couramment utilisés sont conçus de telle sorte qu'ils présentent un état satisfaisant dans des conditions d'environnement beaucoup plus sévères que les conditions réglementaires. Toute évaluation de risque doit être faite avec des données aussi réalistes que possibles, concernant notamment le comportement des emballages en fonction de la nature de l'accident (feu, choc, immersion, etc.) et le terme-source associé. Ceci est un objectif fondamental pour valider des codes tels que le code INTERTRAN développé par l'AIEA. Pour l'ensemble de ces raisons, il est nécessaire de disposer d'une banque

de données sur le comportement des principaux emballages utilisés. L'incendie est un cas d'environnement accidentel important à considérer pour deux raisons: la probabilité d'occurrence d'incendies ayant des durées et des températures supérieures aux conditions appliquées aux colis de type B (800°C, 30 min) n'est pas négligeable, en particulier pour le transport par voie aérienne et maritime, et le danger associé peut être important (voie de transfert par inhalation). Des études ont été entreprises dans le but de connaître les marges de sécurité des emballages. Ces études ont été réalisées, dans certains cas par des calculs, dans d'autres cas par des essais. Ce mémoire présente les résultats obtenus pour différents types d'emballage, résultats qui font apparaître une grande marge de sécurité par rapport aux conditions de feu réglementaires (800°C, 30 min).

1. INTRODUCTION

Les réglementations internationales concernant le transport des matières radioactives garantissent un haut niveau de sûreté. Ceci est principalement obtenu en adaptant la conception de l'emballage au risque potentiel. Néanmoins, il y a lieu de considérer que certains accidents sont plus sévères que ceux représentatifs des critères de référence; la probabilité annuelle de rencontrer de telles conditions, compte tenu du trafic concerné, peut être de l'ordre de grandeur des probabilités d'accidents qui sont prises en compte dans la conception des installations nucléaires.

Les emballages de type B disposent généralement de marges de sécurité par rapport aux accidents représentatifs des tests B, marges qui, malheureusement, ne peuvent être appréciées à partir des seuls tests réglementaires. La connaissance de ces marges de sécurité, du mode de ruine et du terme-source associés est un élément indispensable à l'évaluation du risque. L'utilisation de codes d'évaluation de risques pour le transport, tel que le code INTERTRAN développé sous l'égide de l'AIEA, n'a de sens que si elle est basée sur des valeurs réalistes du comportement des colis. Il en est de même pour l'utilisation de méthodes telles que les méthodes coût-bénéfice, ou l'analyse multicritère couplée avec les méthodes d'évaluation de risque, en vue de sélectionner les options les plus avantageuses pour diminuer le risque.

Toutes ces raisons conduisent à disposer d'une banque de données du comportement des colis allant jusqu'à la ruine. Un des scénarios important à considérer est le comportement à l'incendie des colis pour les deux raisons principales suivantes: la probabilité d'occurrence d'incendie de sévérité plus grande que celle prise en compte dans la réglementation (800°C, 30 min) n'est pas négligeable, notamment pour les transports par voie maritime et aérienne, et le terme-source en cas d'ouverture (formation d'aérosols) constitue une des sources d'atteinte à l'individu les plus dangereuses.

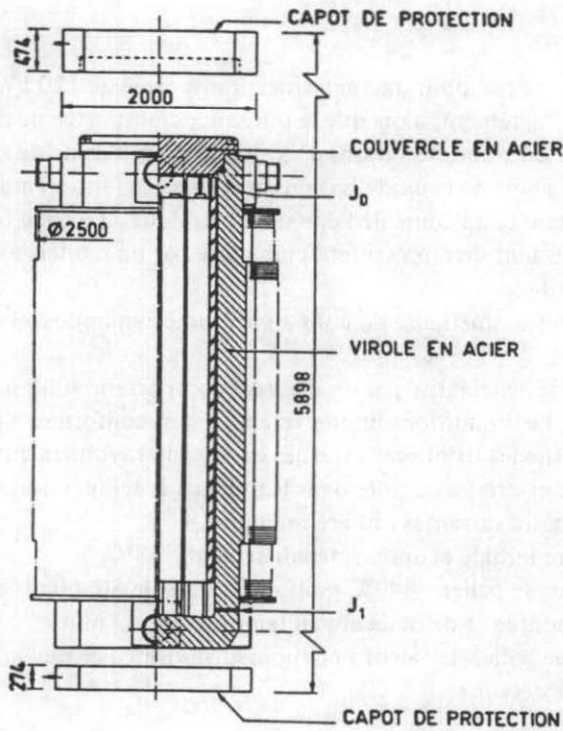


FIG. 1. Emballage TN-12.

2. COMPORTEMENT A L'INCENDIE D'UN EMBALLAGE DE TRANSPORT D'ELEMENTS COMBUSTIBLES IRRADIES

2.1. Introduction

Un certain nombre de colis de combustibles irradiés sont transportés par voie maritime. La question ayant été posée du comportement des emballages dans l'hypothèse d'un incendie non maîtrisé en mer, on a évalué la marge de sécurité dont on dispose sur un emballage de type TN-12 (fig. 1) couramment utilisé en France pour le transport des éléments combustibles de REP.

L'évaluation a été faite par calcul. On a établi la carte des températures dans les différentes parties du colis et notamment au niveau du joint en fonction du temps. Les joints utilisés sont en Viton dont l'intégrité est garantie par le constructeur jusqu'à 316°C.

2.2. Calculs

Le calcul a été fait pour une puissance transportée de 120 kW, puissance prise en compte dans l'agrément, alors que la puissance transportée ne dépasse pas actuellement 80 kW pour des raisons d'exploitation de l'usine de retraitement.

La mise au point de la modélisation du colis a été faite à l'aide des mesures de référence obtenues au cours de l'épreuve thermique. Le code bidimensionnel DELFINE permettant de représenter l'emballage par un modèle axisymétrique a été à cette fin utilisé.

Seule la moitié supérieure du colis a été étudiée en imposant un flux nul sur le plan médian.

Le colis a été schématisé par un maillage comportant 3030 nœuds et 2720 éléments. Les conditions limites retenues sont conformes à la réglementation. En ce qui concerne les frontières externes en plus du rayonnement, les phénomènes de convection sont pris en compte dans le milieu à la température de l'incendie.

Les hypothèses suivantes ont été retenues:

- température initiale et après refroidissement: 38°C;
- température de palier: 840°C pour des durées de 30, 60 et 90 min;
- durée de montée et de descente en température: 3 min.

Pour chaque palier, le calcul a été poursuivi jusqu'à ce que la température au niveau des joints décroisse.

2.3. Résultats

2.3.1. Phase de l'incendie

Le balsa ne commence à être traversé par le flux de chaleur qu'à la fin d'un incendie de 90 min et seulement dans ses parties les moins épaisses. La chaleur pénètre par les parties métalliques exposées à l'incendie (ailettes) et se propage à travers le corps en acier à la fois radialement vers le centre et axialement vers les joints (les isothermes montrent le contournement du balsa).

2.3.2. Phase de refroidissement

a) Comportement général:

Les parties internes du balsa, le bouchon et les zones du corps protégées par le balsa voient des variations de température infimes par rapport aux variations externes. L'acier a une bonne diffusivité et les phénomènes externes se propagent très rapidement dans la direction radiale.

b) Comportement du joint supérieur (J_0 sur la figure 1):

Le joint est situé dans la région protégée par le balsa. Dans les cas étudiés, le joint n'atteint pas la limite de 316°C. La durée de l'incendie a peu d'influence

sur le temps à partir duquel la température du joint diminue. Par contre, une prolongation de feu de 30 min produit une augmentation de température au niveau du joint de 15°C environ.

c) Comportement du joint inférieur (J_1 sur la figure 1):

Les temps pour atteindre les températures maximales sont plus courts que pour le joint supérieur (environ 6 h après l'extinction de l'incendie).

2.4. Durée maximale de l'incendie pour atteindre la température limite admissible

Il est difficile de donner une idée précise de la durée d'incendie pour laquelle le joint atteint une température de 316°C lors du refroidissement de la structure.

En effet, aux phénomènes étudiés, s'ajoute en cas d'incendie prolongé le flux radial à travers le balsa. Ce flux correspond au transfert dans l'acier de la quantité de chaleur jusque là accumulée dans le balsa.

Les résultats montrent que la température du joint croît au cours de l'incendie d'environ 15°C toutes les 30 min. C'est à cette valeur que nous estimons l'effet du flux dans le balsa.

Considérant que le flux dans l'acier n'intervient pas dans cette approche, son effet propre ne change pas: il est de 15°C par 30 min. L'effet global est donc de 30°C par 30 min.

Cette évaluation pessimiste conduit à une durée d'incendie admissible de 3 h. Par contre, si on néglige l'apport de chaleur dans le balsa, l'augmentation de température reste de 15°C par 30 min. La durée maximale est alors de 5 h (ce qui donne une température de 319°C). La véritable limite se situe entre 3 et 5 h.

2.5. Conclusion

Les joints principaux de l'enveloppe de confinement ne sont pas très sensibles à la durée d'un incendie à 800°C; la température n'atteint pas la valeur limite de 316°C avant au moins 3 h d'incendie.

Au cours de l'incendie prévu par la réglementation pour les études de feu (800°C pendant 30 min), la température atteint seulement 183°C. Les températures maximales au niveau du joint sont atteintes environ 10 h après l'extinction de l'incendie.

3. COMPORTEMENT DE L'EMBALLAGE FS-47 DE TRANSPORT DE PuO_2 A UN INCENDIE DE LONGUE DUREE

3.1. Introduction

L'emballage FS-47 (type B fissile) a été développé en France pour le transport d'oxyde de plutonium sous forme de poudre. On a évalué, à l'aide du

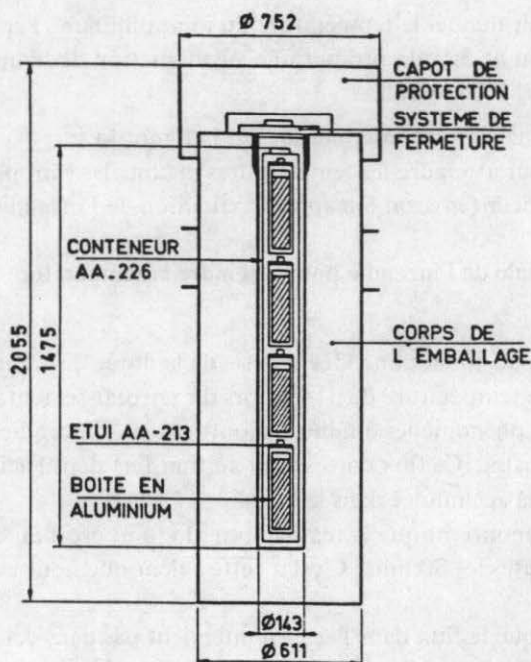


FIG. 2. Emballage FS-47.

code Delfine, le comportement thermique du colis soumis à un incendie de durée (30, 60, 90 min) et de température (800 et 1000°C) variables.

3.2. Description du colis

D'une hauteur de 2 m environ et d'un diamètre de 0,75 m, sa masse est, à pleine charge, de l'ordre de 1500 kg (fig. 2).

3.3. Calculs

La mise au point de la modélisation du colis a été faite à l'aide des mesures de référence obtenues au cours de l'épreuve thermique, un lest de barytine simulant le Pu O₂.

Des simplifications ont été faites. Elles sont liées à l'utilisation du code Delfine, à la nécessité d'utiliser un modèle axisymétrique et à la difficulté d'associer des matériaux de diffusivité très différentes dans un transitoire rapide.

Le maillage comprend 2626 nœuds, et 2349 éléments rectangles. La taille des mailles permet un pas de temps de 300 s lors des transitoires rapides de début et de fin d'incendie.

La principale difficulté de la modélisation est la détermination des différents jeux entre les différentes pièces constituant la partie courante. Les jeux ont été maintenus constants.

Les autres points délicats sont:

- l'incertitude sur les propriétés thermiques équivalentes de la région ailetée (compound + cuivre);
- la méconnaissance de la barytine: ce produit a été choisi pour remplacer la poudre de Pu O₂ pour l'essai de chute; il a la même masse volumique que la poudre de Pu O₂, mais ses propriétés thermiques sont mal connues.

Les conditions prises en compte sont:

- 1) Les échanges externes: toute la surface du colis échange de la chaleur avec le milieu extérieur par convection et rayonnement.
- 2) Les échanges internes: dans tous les jeux, les surfaces en regard échangent par rayonnement face à face et par conduction dans la lame d'air.
- 3) La puissance totale dégagée, égale à 77 W, répartie uniformément dans la poudre de Pu O₂.
- 4) La température initiale ambiante: 8°C.
- 5) Le palier de température d'incendie: 800°C puis 1000°C.

3.4. Résultats du comportement à l'incendie du colis FS-47

3.4.1. Incendie à 800°C (durée variable: 30 min, 60 min, 90 min)

Pendant l'incendie, le capot de balsa constitue une protection thermique très efficace. La région des joints est moyennement protégée par ce capot. En effet, si l'on considère l'incendie de 90 min, on peut retenir les températures suivantes:

- région la mieux protégée (entre capot et bouchon): moins de 60°C;
- région des joints: 100 à 150°C;
- virole interne: 150°C et plus.

Pendant le refroidissement, certains points continuent de s'échauffer pendant quelques heures après l'extinction du feu. La température maximale du joint est de l'ordre de 150°C pour un incendie de 90 min, cette température étant atteinte au bout de 2 h après arrêt de l'incendie.

3.4.2. Incendie à 1000°C (durée: 90 min)

Au niveau du joint, la température maximale atteinte au bout du même temps n'est supérieure que de 20°C, soit 170°C.

3.5. Conclusion

La température des joints, dans le cas le plus défavorable (1000°C, 90 min), n'atteint pas 170°C et reste donc très inférieure à la limite acceptable de 316°C. On dispose d'une marge importante sur l'étanchéité du colis.

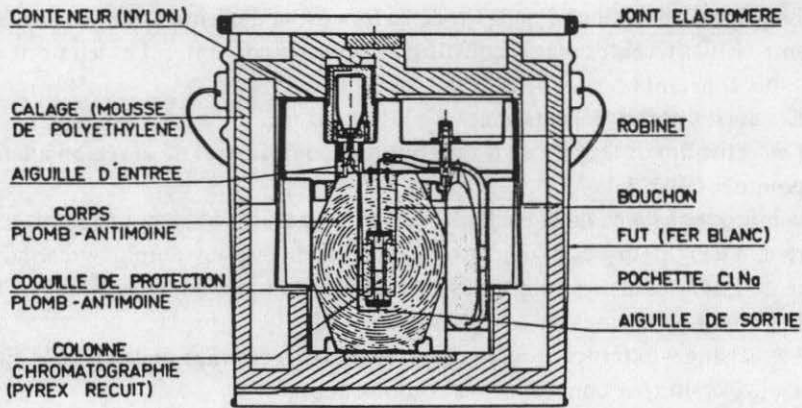


FIG. 3. Colis Elumatic III.

4. COMPORTEMENT D'UN EMBALLAGE DE TYPE A AU COURS D'UN INCENDIE: GENERATEUR DE TECHNETIUM

4.1. Introduction

Le générateur Elumatic III à usage médical est un système automatique hautement protégé qui permet d'obtenir aisément une solution stérile et apyrogène de technétium 99m sous forme de pertechnétate de sodium. Cette solution est éluée à partir d'une colonne chromatographique d'alumine sur laquelle est fixé le ^{99}Mo de fission ($T = 66$ h), parent de ^{99m}Tc ($T = 6,02$ h).

L'Elumatic III est livré en fût métallique étanche: c'est un colis de type A (fig. 3).

Dans le cadre de l'exportation vers l'Italie, un trafic important de ces générateurs a lieu en empruntant le tunnel du Mont-Blanc d'une longueur de 12 km. La prise en considération de l'éventualité d'accidents provoquant un incendie a conduit à évaluer le risque résultant de ce trafic. Dans ce but, des essais ont été entrepris pour connaître le comportement de ces colis à un incendie. On a considéré l'incendie de référence de la réglementation AIEA pour l'emballage de type B (800°C , 30 min).

4.2. Programme d'étude

Une préétude a été faite et a permis de montrer que le produit ne se décompose pas au cours d'un incendie. L'analyse thermogravimétrique et l'analyse thermique différentielle ont donné les résultats suivants: changement de phase à

l'état solide: $T_f = 690^\circ\text{C}$; pas de décomposition du produit jusqu'à 800°C ; pas de perte de poids du produit à cette température pendant toute la durée du palier (2 h).

Un essai de tenue à l'incendie a été fait sur le colis Elumatic III instrumenté de 11 thermocouples.

4.3. Résultats et observations

Après une minute d'exposition au feu, on observe l'ouverture du couvercle du fût due à la surpression interne: les pièces en polystyrène composant le calage du générateur s'embrasent au contact de la flamme du foyer.

Au bout de 16 min débute la fusion du plomb, avec écoulement de ce dernier vers l'extérieur au bout de 23 min.

Après 24 min d'incendie, la température au niveau de la colonne en verre (pyrex recuit) contenant l'alumine sur laquelle est fixé le ^{99}Mo de fission a atteint 675°C ; cette température est à peu près stable jusqu'à la fin de l'essai.

Après refroidissement naturel, à l'issue des 30 min d'incendie, les observations suivantes ont été faites sur le colis. Le conteneur en nylon et le calage en mousse de polyéthylène se sont entièrement consumés, 13,3 kg de plomb se sont complètement écoulés; on note par ailleurs une légère déformation du tube en pyrex et la disparition des bouchons de caoutchouc et des capsules métalliques de fermeture de la colonne chromatographique, mais le filtre en verre fritté et le bouchon en laine de verre sont restés en place et n'ont pas été détériorés, ce qui a permis à l'alumine de rester à l'intérieur du tube, assurant le confinement du molybdate de sodium.

4.4. Conclusion

Cet essai a permis de mettre en évidence que la protection biologique de l'emballage Elumatic III n'est plus assurée au bout de 16 à 17 min pour un feu de 800°C . Par contre, il n'y a pas de risque de dispersion sous forme d'aérosols de la matière radioactive transportée.

5. COMPORTEMENT A L'INCENDIE D'UN CONTENEUR 30B, REMPLI D'UF₆, AVEC COQUE PF1 (fig. 4)

5.1. Introduction

Les essais avaient pour objectif de vérifier le comportement de l'ensemble conteneur-coque-bouteille échantillon aux épreuves réglementaires de chute et de feu prévues pour l'agrément de type B, prouvant la capacité de résister aux accidents en cours de transport, ceci dans les conditions d'un remplissage avec de l'hexafluorure d'uranium.

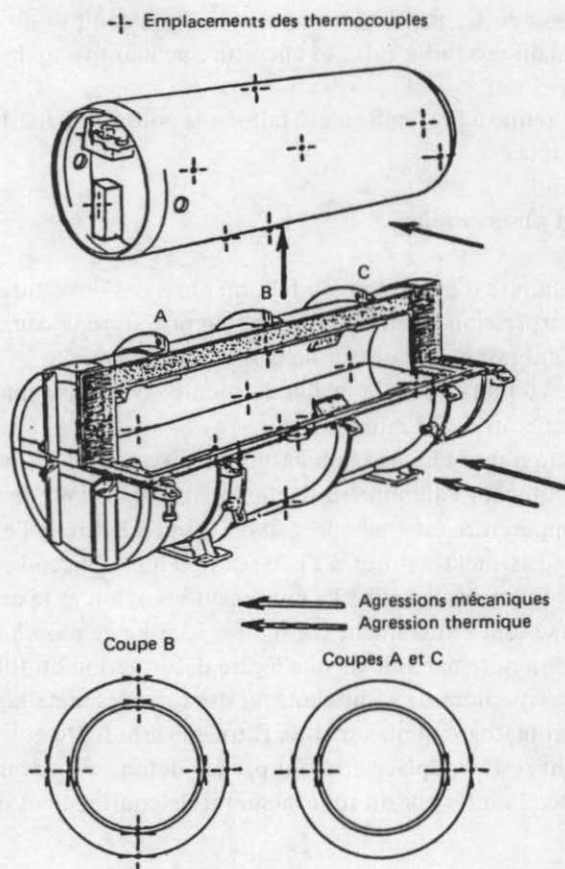


FIG. 4. Conteneur 30B avec coque PF1.

5.2. Programme et résultats des essais

Le même ensemble conteneur-coque-bouteille échantillon a subi les trois épreuves successives ci-après:

- chute libre de 9 m;
- chute de 1 m, sur poinçon;
- incendie de 30 min, le plan de joint des deux demi-coques étant placé verticalement de façon que la zone affectée par les deux épreuves précédentes soit en regard des flammes.

Le but final était de réaliser les essais sur un conteneur rempli d' UF_6 mais, pour des raisons de sécurité de l'essai, une approche méthodique par étapes a été retenue.

a) Essais avec lest inerte simulant l'UF₆

Le lest simulant l'UF₆ était constitué d'un mélange de billes d'acier de 3 mm de diamètre et de paraffine.

Les essais de chute et de poinçonnement ont permis de vérifier la bonne tenue de l'ensemble.

Pour l'essai d'incendie, l'ensemble conteneur-coque-bouteille échantillon était instrumenté de 28 thermocouples. Le feu a été prolongé jusqu'à 90 min pour estimer les marges de sécurité.

b) Transposition des résultats à l'essai avec l'UF₆

A partir des résultats précédents, un calcul a été effectué et a montré que les températures atteintes par le conteneur dans l'essai avec l'UF₆ resteraient très inférieures, au bout de 30 min, à la température maintenue au moment du remplissage ou de la vidange (115°C) et que, dans le cas le plus pessimiste, la masse d'UF₆ fondue serait très limitée.

c) Essais avec l'UF₆

Un nouvel ensemble conteneur-coque-bouteille échantillon a été utilisé. Le conteneur 30B était rempli de 2150 kg d'UF₆ appauvri. Les essais de chute et de poinçonnement ont confirmé les résultats obtenus aux essais effectués avec lest. Pour l'essai d'incendie, une aire spéciale a été construite et équipée de différents moyens pour faire face à toute fuite d'UF₆. Le conteneur a été aménagé, afin de déceler rapidement toute fuite d'UF₆, en particulier au niveau de la vanne et des bouchons, et canaliser la fuite éventuelle à l'extérieur du bac de kérosène. L'ensemble à tester était instrumenté de 32 thermocouples (fig. 4). Au terme des 30 minutes d'incendie:

- aucune fuite d'UF₆ n'a été constatée;
- la température maximale sur le conteneur est de 73°C, avec une moyenne de 43°C sur les 9 points de mesure (elle passe par un maximum de 75°C six minutes après l'arrêt du feu);
- les températures sur les collecteurs, à proximité de la vanne et du bouchon de vidange, ainsi que sur la bouteille échantillon sont respectivement de 34°C, 72°C et 16°C. Cette dernière passe par un maximum de 82°C dans la phase ultérieure, le bois contenu dans les extrémités de la coque continuant de se consumer.

Après l'essai, les parties des tôles extérieures de la coque prenant appui sur le bâti-support étaient légèrement enfoncées. Ceci est dû à un affaissement du colis sur le bâti par diminution, pendant l'incendie, des caractéristiques mécaniques de la mousse phénolique contenue dans la coque.

Après ouverture de la coque, il a été constaté que:

- le conteneur 30B n'a subi aucun dégât pendant l'essai d'incendie;
- le plan de joint de la coque, côté feu, est presque entièrement carbonisé, ainsi qu'une bonne partie du bois contenu aux extrémités des demi-coques;
- la boîte de protection en bois et la bouteille échantillon sont intactes.

5.3. Conclusion

Les résultats obtenus sont très satisfaisants. Les dégâts occasionnés par les essais de chute et de poinçonnement sont très limités et ne compromettent en rien la tenue mécanique du conteneur. Par ailleurs, au cours de l'incendie, les températures maximales relevées sur l'extérieur du conteneur 30B restent très inférieures à la température normale de remplissage et l'étanchéité de celui-ci est maintenue.

Les résultats ont permis de valider le code de calcul utilisé et d'extrapoler l'évaluation pour des durées d'incendie plus longues. Avec une durée d'incendie de 90 min, on disposerait encore d'une marge de sécurité appréciable.