




| | | | | |
|--|---|---|---|--------------------|
| Orano TN DOSSIER DE SURETE < MX8 > | Diffusion limitée Orano - Autorités | |  | |
| | ANNEXE 00-1 | | | |
| | Préparateur / signature  | Date | | |
| Vérificateur / signature  | | Date | | |
| Identification : | | DOS-19-008390-002 | Version : 1.0 | Page 1 / 19 |


TN International

CARACTERISTIQUES DES PERFORMANCES DU COLIS

Sommaire

| | |
|--|----|
| ÉTAT DES REVISIONS / VERSIONS | 2 |
| 1. INTRODUCTION | 3 |
| 2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS | 3 |
| 3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE | 5 |
| 4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE | 9 |
| 5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT | 11 |
| 6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION | 13 |
| 7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SURETE-CRITICITE | 15 |
| 8. CONDITIONS D'UTILISATION | 17 |
| 9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE | 18 |
| 10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITE | 18 |
| 11. REFERENCES | 19 |

État des révisions / versions

| Rév. ou Version | Date | Objet et historique des révisions | Préparé par / Vérifié par |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------------|---|
| 1.0 | Voir 1 ^{ère} page | Création du document |  |

1. INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du colis MX8, destiné au transport par voie routière, sous utilisation exclusive, d'assemblages combustibles neufs à base d'oxyde mixte de plutonium et d'uranium, appelé MOX, en tant que colis de type B(M) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

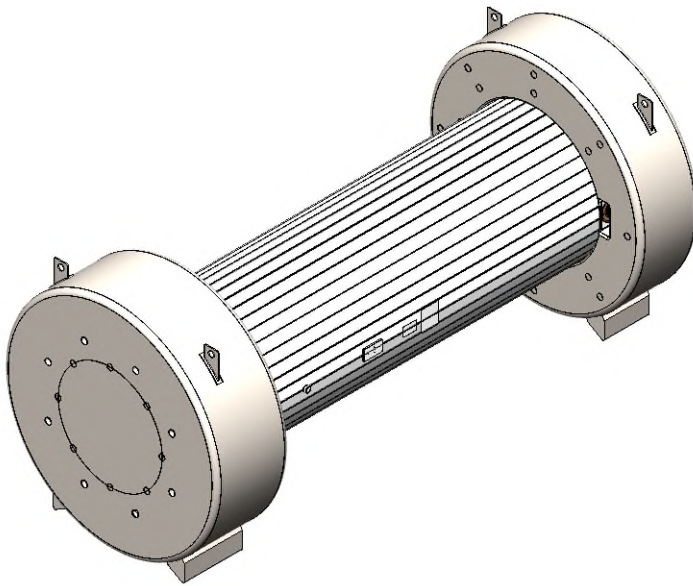
Le transport de l'emballage s'effectue en position horizontale sur un châssis. Les assemblages combustibles sont rangés dans les alvéoles d'un aménagement interne disposé dans la cavité (ci-après désigné par le terme « panier ») lui-même disposé dans la cavité de l'emballage.

2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS

2.1. Description du colis

Le combustible nucléaire est constitué à partir de crayons de combustible assemblés en réseau (crayon à base d'oxyde mixte de plutonium et d'uranium, appelé MOX et est issu de la fabrication sur l'usine ORANO MELOX à destination des réacteurs civils de puissance (CNPE EDF en France).

De forme générale cylindrique, le colis est illustré sur la figure ci-dessous tel que présenté au transport, en position horizontale.



Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

Longueur = 5 183 mm

Diamètre externe du corps = 1 379 mm

Diamètre externe des capots = 2 282 mm

Le colis MX8 est transportable par voie terrestre (transport routier).

2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage MX8 sont :

- Un corps cylindrique constitué de deux viroles coaxiales en acier inoxydable, soudées sur un fond en acier inoxydable et sur une bride de tête, également en acier inoxydable. Une portée est usinée dans la partie médiane de la bride de tête afin de recevoir le couvercle qui est fixé sur celle-ci par des vis. L'espace inter-viroles est rempli d'un absorbant neutronique, traversée radialement et longitudinalement par des raidisseurs qui assurent la conduction thermique au travers de l'absorbant neutronique. Des portées sont usinées dans la partie latérale de la bride de tête et du fond afin d'y fixer des tourillons, 2 en tête et 2 en fond, ainsi que des orifices latéraux. Ces orifices sont chacun composés d'un siège de tampon, d'un tampon et d'une tôle d'orifice. Leur étanchéité est assurée par un joint torique en élastomère.

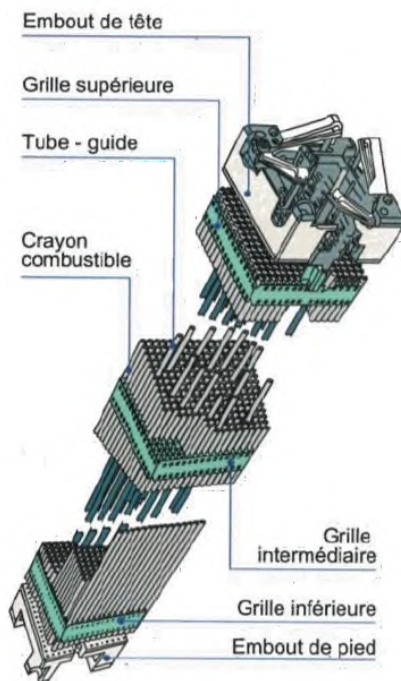
- Un système de fermeture composé d'un couvercle en alliage de titane. Le couvercle est maintenu en appui sur la bride du corps au moyen de vis. L'étanchéité du couvercle sur la bride est assurée au moyen d'un joint torique en élastomère. Le couvercle comporte aussi un orifice de vérification de la pression de la cavité et un orifice de commande de verrouillage. Ces orifices sont obturés par des tapes d'orifices. Leur étanchéité est assurée par un joint torique en élastomère.
- Deux capots amortisseurs de chocs équipant l'emballage à chaque extrémité : un capot de couvercle et un capot de fond. Ces capots ont pour but d'amortir les impacts subis en conditions accidentelles de chutes, et remplissent aussi une fonction d'isolation thermique des différents joints en conditions d'incendie. De façon générale, la structure des capots est délimitée par une enveloppe en alliage de titane, renforcée et cloisonnée par des goussets, et remplie de bois. Les capots de couvercle et de fond sont fixés, respectivement sur la bride de tête et le fond, par des vis.

2.3. Description du contenu

Le contenu est constitué par l'aménagement interne de la cavité et les assemblages combustibles neufs, et d'une plaque alvéolaire séparant de manière étanche la cavité interne de l'emballage en deux cavités.

L'aménagement interne est composé d'un panier destiné à recevoir les assemblages combustibles, le panier AA-400.

Celui-ci est constitué de tronçons en aluminium constituant le corps du panier. Le maintien axial du panier complet dans la cavité de l'emballage est assuré au moyen de 4 tirants. Cette structure délimite 8 alvéoles de section carrée destinées à recevoir les assemblages combustibles. Les parois de ces alvéoles sont recouvertes de tôles en acier inoxydable boré. Le panier AA-400 est destiné à recevoir au maximum 8 assemblages combustibles pour réacteur à eau sous pression (REP).



Le schéma de principe ci-contre illustre la constitution d'un assemblage combustible.

Un assemblage combustible comprend des crayons combustibles formant un réseau incomplet à pas carré 17x17. Les emplacements sans combustible sont occupés par des tubes qui servent à la fois d'entretoises entre les embouts d'extrémité et de guides pour les barres de contrôle.

Des grilles sont fixées sur ces tubes et assurent le positionnement transversal et longitudinal des crayons.

Le contenu autorisé limite les paramètres importants pour la sûreté et qui sont utilisés dans le dossier de sûreté ; en particulier :

- La géométrie de l'assemblage avec les caractéristiques mécaniques des matériaux.
- La teneur maximale et la composition isotopique de l'oxyde.
- La masse maximale de métal lourd.
- La puissance thermique maximale dégagée par l'assemblage ainsi que les propriétés thermiques des matériaux.

2.4. Enceinte de confinement

L'enceinte de confinement de l'emballage est délimitée par :

- la virole interne,
- le fond,
- la face interne de la bride avant du corps, contiguë à la virole interne,
- le couvercle en appui sur la portée plane usinée dans la bride et son joint d'étanchéité,
- les deux tapes d'orifices en appui sur les portées planes usinées dans le couvercle et leur joint d'étanchéité,
- les deux tampons d'orifices latéraux, leur siège respectif ainsi que les joints d'étanchéité des tampons et des sièges de tampon.

2.5. Bilan de masses

Le tableau ci-dessous présente les masses des principaux composants du colis MX8 en configuration de transport.

| Composant | Masse maximale (kg) |
|---|---------------------|
| Corps vide | 9010 |
| Couvercle | 1000 |
| Capot de couvercle | 868 |
| Capot de fond | 732 |
| Masse de l'emballage à vide | 11 610 |
| Masse maximale du contenu | 10 690 |
| Masse maximale de l'emballage chargé | 22 300 |

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE

3.1. En conditions de transport de routine

Tenue à la pression

La virole interne, la bride de tête, le fond, le couvercle et ses tapes d'orifices sont dimensionnés à une pression interne de 15 bars selon les règles du CODAP. Cette pression de dimensionnement est bien supérieure aux pressions pouvant être rencontrées en conditions réglementaires de transport.

Arrimage et manutention

La manutention du colis est réalisée par les 2 paires de tourillons vissées sur le corps.

La tenue des tourillons est justifiée pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en manutention, ainsi qu'à la fatigue suite au cumul des cycles de sollicitations en manutention.

L'arrimage du colis sur son moyen de transport est réalisé par deux berceaux sur lesquels vient reposer le corps de l'emballage ainsi que deux oreilles de verrouillage prévenant le déplacement longitudinal de l'emballage. La tenue des oreilles de verrouillage est démontrée pour un chargement statique correspondant aux efforts vus en conditions de transport en routine ainsi qu'à la fatigue suite au cumul des cycles de sollicitations en transport. La tenue de la virole externe sur les bras de berceau de transport est justifiée pour des chargements représentatifs des conditions de transport de routine.

Structures auxiliaires

Les structures auxiliaires de l'emballage sont la virole externe et les capots amortisseurs de chocs. La tenue de la virole externe du corps de l'emballage est démontrée pour une pression différentielle de 40 bars. La tenue de l'enveloppe des capots amortisseurs est démontrée pour une pression différentielle de 0,07 bars compte tenu de la présence de soupapes tarées à cette pression. La tenue de l'enveloppe des capots, des oreilles de manutention et des vis de fixation est démontrée pour une accélération représentative des conditions de manutention et des conditions normales de transport donc majorante des conditions de transport de routine.

3.2. En conditions normales de transport

Les analyses de sûreté étudient l'épreuve réglementaire de chute libre de 30 cm. Les autres épreuves réglementaires (gerbage, aspersion et pénétration d'une barre) sont sans impact sur la sûreté du modèle de colis.

Endommagements :

Les capots amortisseurs ne subissent pas de dégradation significative et le panier maintient sa géométrie lors de l'épreuve de chute libre mais le maintien axial du panier par les tirants n'est plus assuré.

3.3. En conditions accidentelles de transport

Ensemble des chutes étudiées

4 configurations de chute libre de 9 mètres et 4 de chute sur poinçon de 1 mètre sont étudiées.

Les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant les dommages possibles sur les éléments de l'enceinte de confinement.

Principe de définition de la maquette de chute

Les épreuves de chutes ont été réalisées avec une maquette du modèle de colis à l'échelle 1/2; c'est-à-dire que toutes les dimensions sont réduites de moitié.

Les règles de similitude sont appliquées afin de garantir que les contraintes mécaniques dans les composants de la maquette sont à minima les mêmes que celles dans les mêmes composants du modèle d'emballage. Le comportement mécanique en chute sera donc le même sur la maquette et sur le colis.

Les règles de similitudes amènent à définir une hauteur de chute corrigée pour tenir compte :

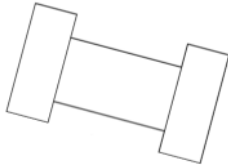
- des écarts de masse entre celle de la maquette et la masse maximale du modèle de colis,
- du complément d'énergie de chute nécessaire à apporter à la maquette en raison des différences d'échelle de la hauteur écrasée des éléments amortisseurs entre la maquette et le modèle d'emballage.

Ainsi, le principe de similitude permet de garantir que les résultats de la maquette sont valables pour le modèle d'emballage.

Conformément à la réglementation, à l'intérieur d'une séquence de chutes, aucune modification ou changement de composant n'est possible. Par contre, certains composants sont changés entre deux séquences (capots, vis, joint d'étanchéité ...).

Les séquences de chutes ont été réalisées tel que décrit ci-après.

Première séquence



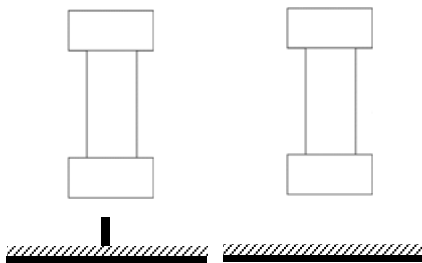
La 1^{ère} séquence est composée d'une chute quasi horizontale de 9 mètres avec incidence de 20°. Cette séquence permet d'évaluer les dommages causés sur l'emballage et le panier et de vérifier la capacité d'amortissement des capots.



Lors de la chute : Diverses déchirures de soudures sur des couronnes des capots de fond et de couvercle ont été constatées. Aucune déformation du couvercle et du corps de l'emballage n'est constatée.

A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que l'enceinte de confinement conserve un bon niveau d'étanchéité.

Deuxième séquence



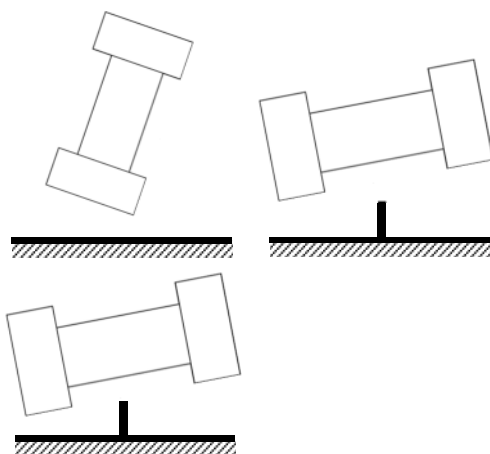
La 2^{ème} séquence se compose d'une chute verticale de 1 mètre sur poinçon côté capot de couvercle et d'une chute verticale de 9 mètres sur capot de couvercle. Cette séquence permet de tester la résistance du couvercle, de ses vis de fixation ainsi que la conservation de l'étanchéité des joints, et de vérifier la tenue de l'aménagement interne

Lors de la 1^{ère} chute : Le poinçon a pénétré le capot de couvercle et impacté la protection radiologique fixée sur le couvercle. La protection radiologique est enfoncée et la tôle de confinement de celle-ci est ouverte.

Lors de la 2nd chute : On constate un enfoncement du corps de l'emballage dans le capot et une déchirure de la soudure de la couronne de fermeture du capot de couvercle. Aucune déformation du couvercle n'est observée.

A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que l'enceinte de confinement conserve un bon niveau d'étanchéité.

Troisième séquence



La 3^{ème} séquence est composée d'une chute oblique de 9 mètres sur le capot de couvercle et de deux chutes quasi-horizontales sur poinçon de 1 mètre, réalisées pour 2 incidences distinctes. Cette séquence permet de tester la résistance du système de fermeture, de vérifier la capacité d'amortissement du capot en chute oblique et de valider la tenue de l'enceinte de confinement et de l'aménagement interne.

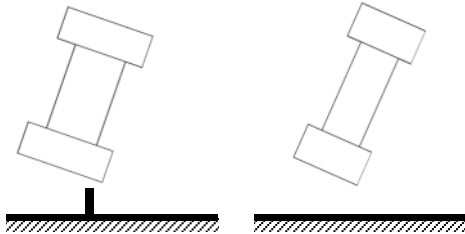
Lors de la 1^{ère} chute : On constate un écrasement de la partie inférieure du capot de couvercle ainsi que diverses déchirures de soudures sur des couronnes et disques du capot de couvercle. Aucune déformation du couvercle n'est relevée.

Lors de la 2nd chute : On constate un marquage du poinçon sur la cavité externe ainsi que le cisaillement de la virole externe avec une ouverture. Des déformations de la virole externe et interne ont été observées.

Lors de la 3^{ème} chute : On constate une rayure sur la virole externe suite au glissement du poinçon. Aucune perforation n'est constatée.

A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que l'enceinte de confinement conserve un bon niveau d'étanchéité.

Quatrième séquence



La 4^{ème} séquence est composée d'une chute oblique de 1 mètre sur poinçon sur protection de tôle de l'orifice latéral et d'une chute oblique sur capot de fond de 9 mètres. Cette séquence permet de tester la résistance des vis de capot et la capacité d'amortissement du capot ainsi que la résistance de la protection de la tôle de l'orifice latéral.

Lors de la 1^{ère} chute : Le poinçon a pénétré le capot de fond.

Lors de la 2nd chute : Le capot de fond s'est écrasé dans les limites de sa capacité d'amortissement. La protection de la tôle d'orifice a conservé son emplacement. Une légère déformation de la tôle de l'orifice latéral a été constatée.

A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité par gaz traceur Hélium normalisées montrent que l'enceinte de confinement conserve un bon niveau d'étanchéité.

Compléments basés sur les essais

Des analyses complémentaires ont été réalisées sur la base des chutes pour :

- analyser analytiquement et numériquement le comportement mécanique de l'emballage pour les températures représentatives des conditions normales de transport,
- analyser numériquement le comportement mécanique de l'aménagement interne.

Une modélisation numérique permet de reproduire le comportement mécanique des capots observé sur la maquette lors de la chute à l'aide du logiciel de calcul LS-DYNA.

Cette étape de recalage du modèle permet en particulier de reproduire correctement l'accélération globale lors de la chute et la déformation du capot mesurées lors de la chute.

Par la suite, les principes de modélisation du modèle numérique de la maquette, validés par la chute réalisée sont appliqués au modèle de colis afin de réévaluer, aux températures représentatives des conditions normales de transport et lors du cumul des chutes de 0,3 mètre et 9 mètres précédées d'une chute de 1 mètre sur poinçon, les accélérations agissant sur l'emballage et son contenu mesurées initialement sur la virole externe de l'emballage lors de l'essai.

Des modélisations numériques permettent de reproduire le comportement mécanique de l'aménagement interne lors de la chute horizontale à l'aide du logiciel de calcul I-DEAS. Ces analyses concluent sur la tenue mécanique de l'aménagement interne suite à la chute horizontale.

La tenue de fond est justifiée de façon analytique ou numérique selon les conditions aux limites employées, aux températures représentatives des conditions normales de transports.

La tenue du couvercle ainsi que des vis de fixation du couvercle et des capots amortisseurs est démontrée de façon analytique en prenant en compte les températures représentatives des conditions normales de transport.

Conclusions

L'emballage maintient son étanchéité lors de toutes les configurations de chutes.

Les tourillons de l'emballage MX8 ne risquent pas d'être impactés en configuration de chutes de 9 mètres.

Les oreilles de verrouillage de l'emballage MX8 ne risquent pas d'être impactées en configuration de chutes de 9 mètres.

L'état du corps de l'emballage MX8 suite aux épreuves relatives aux conditions accidentelles de transport est pris en compte en vue des évaluations de thermique, de radioprotection, de confinement et de criticité.

L'état de l'aménagement interne AA-400 suite aux épreuves relatives aux conditions accidentelles de transport est pris en compte en vue des évaluations de thermique, de radioprotection et de criticité.

4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE

4.1. En conditions de routine et conditions normales de transport

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les principales caractéristiques du contenu influant sur les études thermiques sont :

- la puissance thermique maximale,
- la position dans la cavité de la longueur active des assemblages.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques de l'emballage influant sur les études thermiques sont :

- les matériaux, la géométrie et la position du panier,
- les matériaux et la géométrie de l'emballage.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- la température ambiante réglementaire,
- l'ensoleillement réglementaire.

Méthode de calcul

L'analyse est réalisée à l'aide du logiciel I-DEAS utilisant un modèle numérique représentant le colis (emballage et panier). Le calcul thermique est réalisé selon la méthode des volumes finis avec le module TMG interfacé avec I-DEAS.

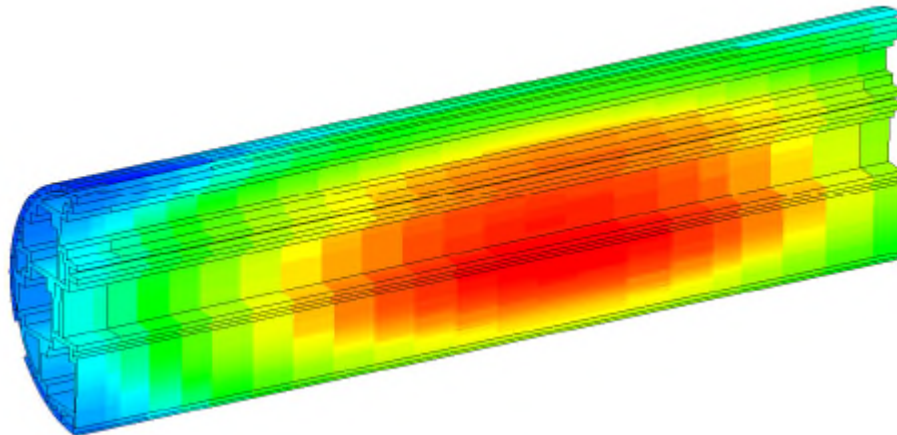
Les principales hypothèses et simplification du modèle sont :

- Un demi-modèle est réalisé compte tenu de la symétrie du modèle de colis.
- La puissance des assemblages combustibles est directement appliquée sur les parois des alvéoles. Le calcul de la température des crayons des assemblages est réalisé par un modèle spécifique tenant compte des températures dans la section la plus chaude du colis et propriétés d'émissivité des gaines et des parois de panier.

- Le panier étant majoritairement en aluminium, il se dilate plus que le corps sous l'effet de la température ce qui a tendance à réduire le jeu radial de montage du panier dans la cavité. Cette réduction du jeu est favorable pour l'évacuation de la puissance. Par un calcul itératif, le jeu à chaud est déterminé en considérant le jeu à froid le plus grand.

Résultats de l'étude

Le champ de températures (exemple représenté sur la figure ci-après) dans le colis est utilisé dans les différentes parties du dossier de sûreté.



La température des constituants sensibles à la température sont compatibles avec leur critère d'intégrité sont ; en particulier :

- Joint d'étanchéité : la température maximale des joints permet de justifier le non-endommagement des joints. Par ailleurs, la dilatation du joint dans sa gorge vérifie un taux de remplissage inférieur à 100%.
- Protection neutronique : la température maximale de la résine neutrophage reste inférieure à sa limite d'utilisation hormis dans certaines zones. Le cas échéant, elle n'est pas prise en compte dans les autres analyses.

4.2. En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- Désaxage des capots de tête et de fond résultant des chutes présentées en paragraphe 3.3.
- Endommagement du capot de fond issu des chutes présentées en paragraphe 3.3 :
 - Ecrasement du capot ;
 - Arrachement d'un quartier de la partie radiale du capot de tête (pénalisant par rapport aux résultats de chute).
- Endommagement du capot de tête issu des chutes présentées dans le paragraphe 3.3 :
 - Ecrasement du capot ;
 - Suppression du bois et de la protection au droit de la tige d'orifice (pénalisant par rapport aux résultats de chute).

Pour le refroidissement après feu, le colis est considéré en position la plus pénalisante vis-à-vis des échanges dans la partie courante, c'est-à-dire en position horizontale.

Méthode d'analyse

Cette étude a été réalisée avec le code de calcul I-DEAS/TMG.

Le calcul est réalisé en régime transitoire selon le synoptique suivant :

- A. Le champ de température initial du colis est celui des conditions normales de transport ayant conduit aux températures les plus élevées sur les joints d'étanchéité du système de fermeture du colis.
- B. Pendant la période réglementaire de 30 minutes, le feu est simulé par :
 - a. une température ambiante réglementaire de 800°C.
 - b. un coefficient d'échange convectif autour de l'emballage égal au coefficient recommandé par la réglementation de 10 W/m²/K représentatif d'une convection forcée dans un incendie englobant.
 - c. l'émissivité des flammes de 0,9 et l'émissivité des surfaces externes de 0,85 pour les surfaces peintes et de 0,8 pour les autres surfaces conformément à la réglementation.
- C. Après feu,
 - a. l'ensoleillement est appliqué pour un colis en position horizontale (position plus pénalisante pour l'ensoleillement).
 - b. l'émissivité de l'ensemble des surfaces externes est à 0,8.

Résultats de l'étude

L'exposition des joints à :

- 4 ans en continu à la température maximale obtenue en conditions normales de transport,
- puis 7 jours à un profil de température pénalisant obtenu en conditions accidentelles de transport,

conduit à des endommagements cumulés très inférieurs à l'endommagement admissible.

Par ailleurs, suite à l'épreuve de feu, la protection neutronique radiale est réduite de par sa combustion partielle.

Enfin, les taux de remplissage des joints aux températures maximales en conditions accidentelles de transport sont inférieurs à 100 %.

5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT

L'analyse de confinement du modèle de colis MX8 tient compte du colis chargé du contenu défini au paragraphe 2.3. L'enceinte de confinement est définie au paragraphe 0.

Les critères réglementaires de relâchement d'activité sont vérifiés par calcul analytique en suivant la méthodologie décrite dans la norme ISO 12807. Cette étude tient compte des fuites de particules aérosols radioactives.

5.1. En conditions de transport de routine

L'analyse de confinement en conditions de transport de routine est couverte par celle effectuée en conditions normales de transport.

5.2. En conditions normales de transport

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- la teneur et composition isotopique des assemblages combustibles,
- la pression à l'intérieur des crayons combustibles et le volume libre maximal par crayon,
- les températures maximales des gaines des crayons combustibles issues de l'analyse thermique.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Le taux de fuite maximal de l'enceinte de confinement vérifié avant expédition.
- Les températures maximales des gaz et des joints, issues de l'analyse thermique.
- Le volume libre de la cavité.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Le taux de crayons ruptés en conditions normales de transport est de 2%.
- La pression externe minimale du colis est la pression ambiante réglementaire minimale de 0,6 bar.

Méthode de calcul

La méthodologie est décrite dans la norme ISO 12807 et est basée sur une phase de relâchement d'activité : la pression atmosphérique de 0,6 bar entraîne une surpression dans le colis. Le flux de fuite se fait donc de l'intérieur vers l'extérieur, entraînant un relâchement d'activité à l'extérieur. Le relâchement d'activité reste inférieur au critère réglementaire de $10^{-6} A_2/h$.

Résultats de l'étude

Le critère réglementaire est respecté.

5.3. En conditions accidentelles de transport

Les différences principales avec le calcul en CNT sont les suivantes :

- Le taux de crayons ruptés en conditions accidentelles de transport est de 100%.
- Les températures maximales des gaines de crayons, des gaz et des joints sont issues des calculs thermiques en conditions accidentelles de feu (paragraphe 4.2).

Les résultats montrent une marge significative par rapport au critère réglementaire de 1 A_2 cumulé sur une semaine.

6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION

Les critères retenus de débit d'équivalent de dose couvrant les conditions réglementaires de transport sont les suivants :

- Conditions de transport de routine (CTR): 10 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis.
- Conditions normales de transport (CNT) : augmentation de l'intensité de rayonnement maximale sur toute surface externe du colis inférieure à 20%.
- Condition accidentelles de transport (CAT): 10 mSv/h à 1 mètre de la surface externe du colis.

6.1. En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- les dimensions des assemblages combustibles,
- la masse de métal lourd,
- la masse des différents isotopes de l'oxyde de plutonium,
- le vieillissement des sources radioactives,
- la position dans la cavité de la longueur active des assemblages.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La protection contre les rayonnements est assurée par la nature et l'épaisseur des matériaux de l'emballage.

Le blindage radial est principalement formé par :

- la virole interne en acier,
- la couche de résine de blindage neutronique, traversée par des raidisseurs,
- les plats externes et de fermeture en acier.

Le blindage axial en tête est principalement formé par :

- le couvercle en alliage de titane,
- la couche de résine neutronique contenue dans le couvercle et son enveloppe en acier,
- le bois du capot de tête et son enveloppe en titane,

Le blindage axial en fond est principalement formé par :

- le fond en acier,
- la couche de résine neutronique contenue dans le fond et son enveloppe en acier,
- le bois du capot de fond et son enveloppe en titane.

Hypothèses importantes pour l'étude

De manière pénalisante au regard des résultats du paragraphe 4.1, la protection neutronique est supposée déshydrogénée en coté fond (couche de résine contenue dans le fond) et coté tête (couche de résine contenue dans le couvercle) ainsi qu'en partie radiale de l'emballage sous le capot de fond.

Méthode de calcul

Les débits d'équivalent de dose neutron et gamma ont été évalués avec le code TRIPOLI 4.3 pour un contenu de référence. Il permet de résoudre l'équation du transport des particules dans une géométrie à trois dimensions par la méthode de Monte Carlo. Les débits d'équivalent de dose pour le contenu radioactif maximal dit « contenu enveloppe » ont été évalués à partir de ces résultats par comparaison des sources en tenant compte d'éventuelles différences entre la configuration du contenu enveloppe et la configuration du calcul de référence. Les calculs de débits d'équivalent de dose neutron tiennent compte de la CIPR60 (facteur de qualité neutron égal à 20).

Les sources induites (sources secondaires) créées par les réactions des neutrons sur les éléments de la résine neutrophage sont prises en compte.

Résultats de l'étude

Le respect des critères de débits d'équivalent de dose en conditions de transport de routine est garanti pour le contenu enveloppe.

6.2. En conditions normales de transport

La géométrie de l'emballage est conservée en conditions normales de transport, mais divers points sont pris en compte pour l'évaluation du débit de dose :

- l'impact de l'endommagement de l'emballage et du déplacement du contenu sur les débits d'équivalent de dose par rapport aux conditions de transport de routine est évalué analytiquement ;
- l'impact de l'écartement possible entre 2 tronçons du panier sur les débits d'équivalent de dose par rapport aux conditions de transport de routine est évalué par calcul numérique pour le contenu de référence.

Résultats de l'étude

Le respect des critères de débits d'équivalent de dose en conditions normales de transport est garanti pour le contenu enveloppe.

6.3. En conditions accidentelles de transport

Deux scénarios sont considérés pour cette étude :

- Scénario 1 : colis à l'issue des épreuves réglementaires de chute et thermique,
- Scénario 2 : colis à l'issue de l'épreuve d'immersion.

Ainsi suivant le scénario, les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- Scénario 1 :
 - Disparition de la résine suite à l'épreuve de feu,
 - Assemblages combustibles endommagés,
 - Panier décentré dans la cavité suite à l'écrasement des profilés.
- Scénario 2 :
 - Etat de la résine identique à son état en conditions normales de transport,
 - Cavité remplie d'un brouillard d'eau de densité 0,5, enveloppe d'une pénétration d'une très faible quantité d'eau.

Résultats de l'étude

Il est justifié que le contenu enveloppe respecte le critère réglementaire de débit d'équivalent de dose à 1 m en conditions accidentelles de transport.

7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SURETE-CRITICITE

La sûreté-criticité doit être assurée, suivant la réglementation pour :

- le colis isolé en conditions de transport de routine (c'est-à-dire tel que présenté au transport),
- le colis isolé en conditions normales de transport (c'est-à-dire résultant des épreuves réglementaires des conditions normales de transport),
- le colis isolé en condition accidentelles de transport (c'est-à-dire résultant du cumul des épreuves des conditions normales et conditions accidentelles de transport),
- l'agencement de 5 N colis (N étant le nombre permettant de définir la valeur du coefficient réglementaire – Criticality Safety Index CSI) en conditions normales de transport,
- l'agencement de 2 N colis en conditions accidentelles de transport.

Le nombre N est considéré comme étant infini pour les analyses concernant l'emballage chargé du contenu.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

$k_{eff} \leq 0,95$ pour le colis isolé ; toutes incertitudes comprises.

$k_{eff} \leq 0,98$ pour le colis en réseau ; toutes incertitudes comprises.

7.1. En conditions de transport de routine et conditions normales de transport

Les résultats en conditions de transport de routine et en conditions normales de transport sont couverts par les résultats en conditions accidentelles de transport.

7.2. En conditions accidentelles de transport

7.2.1. Colis isolé

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- la longueur active des assemblages combustibles,
- le diamètre des pastilles,
- la densité des pastilles,
- la géométrie des gaines des crayons combustibles et leur nombre,
- la teneur maximal en plutonium fissile.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Le système d'isolement est constitué par :

- pour l'emballage MX8 : les plats externes en acier inoxydable, l'espace inter-viroles (composé de résine, de cuivre et d'acier inoxydable), la virole interne en acier inoxydable, le fond en acier inoxydable et le couvercle en titane.
- pour le panier AA-400 : les profilés en aluminium, les tôles en acier boré, les tronçons de panier en aluminium, les tirants en aluminium et les systèmes de bridage des assemblages (latéral et axial).

- pour les assemblages de combustibles : les gaines et les pastilles.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- la réduction de l'épaisseur de résine,
- le taux de bore considéré dans les parois des logements correspond au taux de bore minimal.

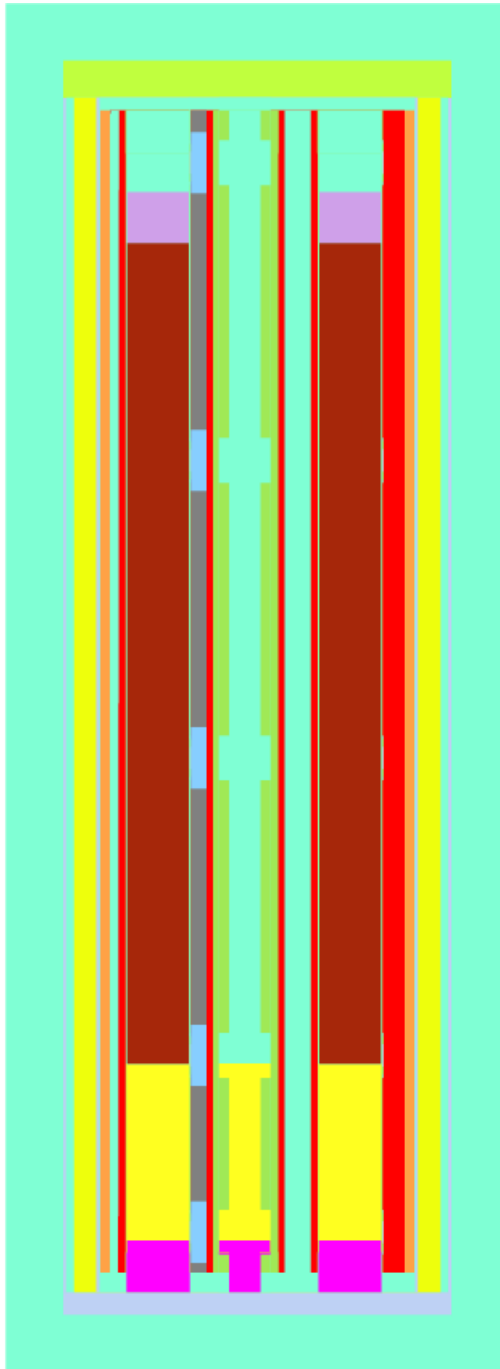
Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- la disparition d'une partie de la résine suite à l'épreuve de feu,
- l'endommagement des assemblages combustibles sans dispersion de la matière,
- le glissement des assemblages combustibles vers la tête ou le fond de l'emballage.

Méthode de calcul

Les calculs ont été effectués avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (standard du formulaire CRISTAL).

Le modèle est illustré sur la figure ci-après :



Résultats

La réactivité maximale du colis est $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ ($\sigma = 0,001$) = 0,941.

Ainsi, la sous-criticité du colis isolé en transport est assurée.

7.2.2. Réseau de colis

La réactivité maximale du colis $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ ($\sigma = 0,001$) = 0,949.

Ainsi, la sous-criticité du réseau de colis est assurée.

8. CONDITIONS D'UTILISATION

L'emballage MX8 est conçu pour être chargé verticalement à sec. Il peut être déchargé verticalement à sec ou bien sous eau.

Les analyses de sûreté décrites ci-avant nécessitent notamment d'exécuter les étapes, les vérifications et critères ci-dessous avant l'expédition du colis :

- Les combustibles chargés doivent respecter l'ensemble des caractéristiques techniques définies par le contenu autorisé.
- La bonne fermeture (couple de serrage des vis) et le niveau d'étanchéité (taux de fuite) de tous les composants constituant l'enceinte de confinement.
- La mise en place des scellés.
- La vérification de la non contamination de l'emballage en conformité avec les limites réglementaires.
- Le contrôle des débits d'équivalent de dose autour du colis en conformité avec les limites réglementaires.
- La mise en place de l'étiquetage réglementaire.

9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE

Le programme d'entretien prévu au cours de l'utilisation de l'emballage est défini en fonction de deux types de périodicités suivant les composants importants pour la sûreté : le nombre de cycles de transport réalisés et la durée d'utilisation.

Le programme d'entretien comprend notamment :

- le remplacement des joints de l'enceinte de confinement pour une durée compatible avec sa durée de vie,
- le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés (couvercle, tapes d'orifices, capots et tourillons) afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté,
- le contrôle des éléments assurant la manutention et l'arrimage du colis et des capots,
- le contrôle de l'étanchéité des capots et de soudures de l'enceinte de confinement.

Tout emballage présentant un ou des composants ne satisfaisant pas aux critères spécifiés dans le programme d'entretien est mis hors service jusqu'à ce que l'action corrective appropriée soit effectuée.

Tout composant devenu non conforme peut être réparé ou accepté en l'état si une analyse complémentaire démontre que cela ne remet pas en cause les conclusions du dossier de sûreté. Dans le cas contraire, le composant doit être remplacé.

10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITE

Les réglementations de transport en vigueur à la date du présent chapitre font obligation d'appliquer des programmes d'assurance de la qualité pour :

- la conception,
- la fabrication et les épreuves,
- l'utilisation,
- la maintenance,
- le transport

des colis de matières radioactives.

Ces activités sont réalisées par différents acteurs (concepteur, maître d'ouvrage, maître d'œuvre, constructeurs, utilisateurs, expéditeurs, transporteurs, sociétés de maintenance...) qui doivent tous établir des programmes d'assurance de la qualité adaptés à celles-ci, et produire et conserver les documents justificatifs (enregistrements) de leur activité.

11. REFERENCES

<1> « Règlement de transport des matières radioactives » de l'AIEA – Prescription, SSR-6, Edition de 2012.

Les règles de conception et d'épreuves de l'édition 2012 du Règlement de l'AIEA englobent celles des règlements applicables suivants :

- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) ;
- Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté TMD).