

<p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">Orano NPS</p> <p style="margin: 5px 0;">DOSSIER DE SURETE</p> <p style="margin: 20px 0 0 40px;">< MX6 ></p>	<p style="color: #0070C0; font-weight: bold;">Diffusion limitée Orano - Autorités</p> <p style="font-weight: bold; font-size: 1.1em;">CHAPITRE 00 – ANNEXE 2</p>			
	Préparation	Date	Signature	
	Vérification	Date	Signature	
<p>Identification : DOS-20-030343-003</p>		<p>Vers. 2.0</p>	<p>Page 1 / 24</p>	

CARACTÉRISTIQUES DES PERFORMANCES DU COLIS

Sommaire

État des révisions	2
1. Introduction	3
2. Description et définitions	3
3. Performances d'un point de vue mécanique	6
4. Performances d'un point de vue thermique	11
5. Performances d'un point de vue confinement	14
6. Performances d'un point de vue radioprotection	15
7. Performances d'un point de vue sûreté-criticité	18
8. Conditions d'utilisation	23
9. Programme d'entretien périodique	23
10. Programme d'assurance qualité	24
11. Références	24

État des révisions

Rév.	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
		[REDACTED]	
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
		[REDACTED]	
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
		[REDACTED]	
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du colis MX6, destiné au transport par voie routière ou maritime, sous utilisation exclusive, d'assemblages combustibles neufs à base d'oxyde mixte de plutonium et d'uranium, appelé MOX, et d'oxydes d'uranium et de gadolinium (U/U-Gd), en tant que colis de type B(U) ou B(M) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

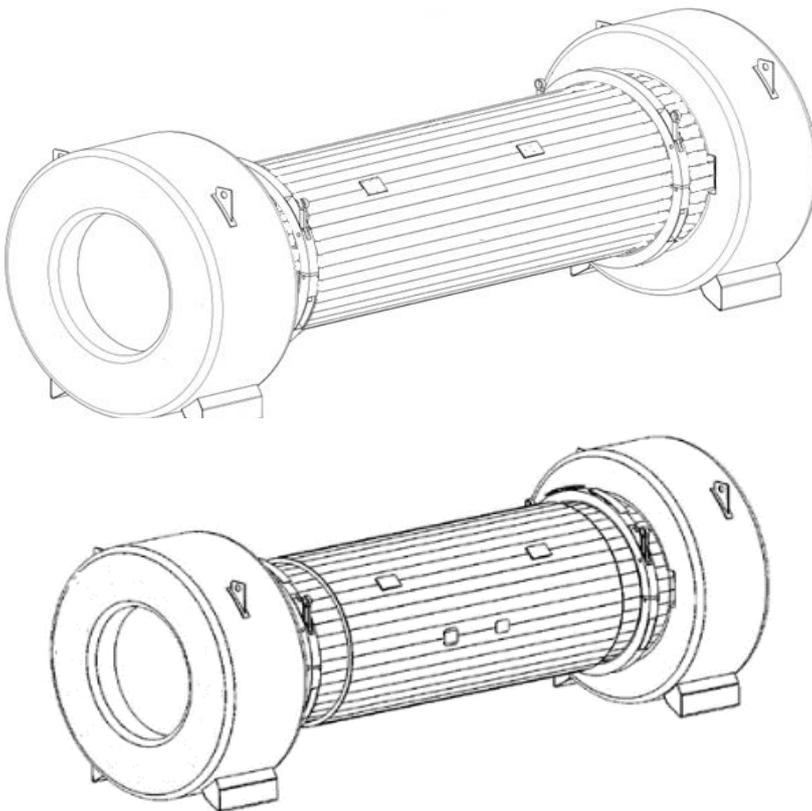
Le transport de l'emballage s'effectue en position horizontale sur un châssis. Les assemblages combustibles sont rangés dans les logements d'un aménagement interne disposé dans la cavité (ci-après désigné par le terme « panier ») lui-même disposé dans la cavité de l'emballage.

2. Description et définitions

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 d'oxydes d'uranium et de gadolinium (U/U-Gd)) et est issu de la fabrication sur l'usine ORANO MELOX à destination des réacteurs civils de puissance (CNPE EDF en France, réacteurs à eau pressurisée au Pays-Bas et au Japon et réacteurs à eau bouillante au Japon).

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 MX6 de référence sont :

Longueur = 5 974 mm

Diamètre externe du corps = 1 337 mm

Diamètre externe des capots = 2 125 mm

Les dimensions générales hors-tout du colis MX6 version MX JP sont :

Longueur = 5 589 mm

Diamètre externe du corps :

- Ø 1337 mm hors de la zone de surblindage
- Ø 1417 mm au niveau de la zone de surblindage central

Diamètre externe des capots = 2 125 mm

Le colis MX6 est transportable par voie terrestre (routier ou ferroviaire) ou maritime ou fluviale.

2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage MX6 sont :

- Un corps cylindrique constitué de deux viroles coaxiales en acier, soudées sur un fond en acier et sur une bride de tête, également en acier. 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. De plus, le corps de l'emballage en version MX JP présente en partie centrale une surépaisseur permettant d'augmenter localement l'épaisseur d'absorbant neutronique. Des portées sont usinées dans la partie latérale de la bride de tête et du fond afin d'y fixer des tourillons, 4 en tête dont 2 optionnels et 2 en fond.
- Un système de fermeture composé d'un couvercle. 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 optionnel d'accès annexe au panier. Ces orifices sont obturés par des tapes d'orifices. Leur étanchéité est assurée par un joint torique 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 acier inoxydable, renforcée et cloisonnée par des goussets, et remplie de bois. Le capot amortisseur de fond dédié à l'emballage MX6 version MX JP possède dans sa partie centrale en plus du bois, une épaisseur d'absorbant neutronique. Les capots de couvercle et de fond sont fixés, respectivement sur la bride de tête et le fond, par des vis.
- Deux ceintures de manutention optionnelles positionnées sur la virole externe. Ces ceintures ont pour but d'assurer la manutention de l'emballage. Les demi ceintures sont fixées entre elles au moyen de vis.

2.3. Description du contenu

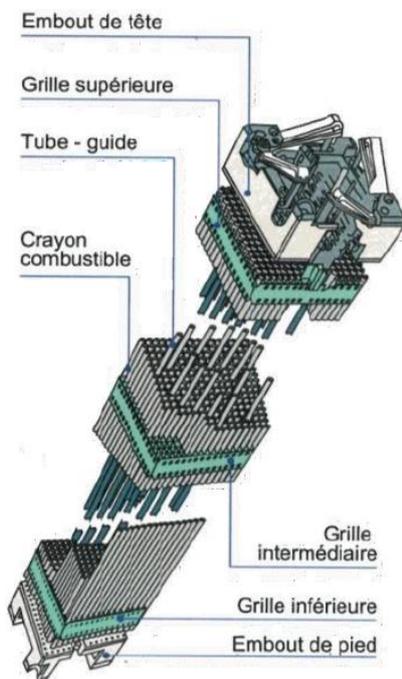
Le contenu est constitué par l'aménagement interne de la cavité et les assemblages combustibles neufs.

L'aménagement interne est composé d'un panier et d'aménagements destinés à recevoir les assemblages combustibles. Il existe trois types de paniers :

- Le panier AA-414 est constitué de 6 logements de section carrée destinés à recevoir les assemblages combustibles. Ces logements sont constitués de tôles en acier inoxydable boré et sont maintenus par une structure constituée de galettes en aluminium liées les unes aux autres par des entretoises. Le maintien axial du panier complet dans la cavité de l'emballage est assuré au moyen de tirants. Le panier AA-414 est destiné à recevoir au maximum 6 assemblages combustibles pour réacteur à eau sous pression (REP) et se place dans l'emballage MX6 de référence.
- Le panier AA-440 est constitué de 10 logements de section carrée destinés à recevoir les assemblages combustibles. Ces logements sont constitués de tôles en acier inoxydable boré et sont maintenus par une structure constituée de plaques d'aluminium liées entre elles grâce à des entretoises. Un système d'expansion est utilisé afin de réduire le jeu entre le panier et la virole interne de l'emballage MX6. Le maintien axial

du panier complet dans la cavité de l'emballage est assuré au moyen de tirants. Le panier AA-440 est destiné à recevoir au maximum 10 assemblages combustibles pour réacteur à eau bouillante (REB) et se place dans l'emballage MX6 de référence.

- Le panier TN[®]9500 est constitué de 6 logements de section carrée destinés à recevoir les assemblages combustibles. Un amortisseur interne est placé en tête du panier entre le couvercle et le panier. Ces logements sont constitués de tôles en acier inoxydable doublées de tôles en aluminium boré et sont maintenus par une structure constituée de galettes en aluminium liées les unes aux autres par des entretoises. Le maintien axial du panier complet dans la cavité de l'emballage est assuré au moyen de tirants. Le panier TN[®]9500 est destiné à recevoir au maximum 6 assemblages combustibles pour réacteur à eau sous pression (REP) et se place dans l'emballage MX6 version MX JP.



Chaque assemblage est calé dans le logement, éventuellement au moyen d'un aménagement en acier inoxydable (chemise pour les assemblages combustibles REP ou « fuel holder » pour les assemblages combustibles REB).

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 8x8, 15x15 ou 17x17 suivant les contenus. 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.
- La teneur maximale et la composition isotopique de l'oxyde.
- La masse maximale de métal lourd.
- La puissance thermique maximale dégagée par l'assemblage.

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 (dont une optionnelle) en appui sur les portées planes usinées dans le couvercle et leurs joints d'étanchéité.

2.5. Bilan de masses

Le tableau ci-dessous présente les masses des principaux composants du colis MX6 en configuration de transport.

Composant	Masse maximale (kg) MX6 de référence	Masse maximale (kg) MX6 version MX JP
Corps vide	8 900	9 490
Couvercle	710	710
Capot de couvercle	790	790
Capot de fond	710	780
Masse de l'emballage à vide	11 110	11 770
Masse maximale du contenu	8 350	
Masse maximale de l'emballage chargé	19 400	

3. Performances d'un point de vue mécanique

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 relative de 5,5 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 3 paires de tourillons (dont une optionnelle) vissées sur le corps et par deux ceintures de manutention optionnelles. L'arrimage du colis sur son moyen de transport est réalisé par deux berceaux sur lesquels vient reposer le corps de l'emballage.

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. La tenue des ceintures de manutention est justifiée pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en manutention.

Structures auxiliaires

Les structures auxiliaires de l'emballage sont la virole externe et les capots amortisseurs de chocs. La tenue de la virole externe est démontrée pour une pression différentielle 8 bars et pour des efforts exercés par les bras des berceaux de transport et des ceintures de manutention. La tenue de l'enveloppe des capots est démontrée pour une pression différentielle de 0,03 bars compte tenu de la présence de soupapes tarées à cette pression et une accélération 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 de hauteur avec une chute horizontale de 0,3 mètre et une chute oblique de 0,3 mètre. Les autres épreuves réglementaires (gerbage, aspersion et pénétration d'une barre) sont sans impact sur la sûreté du colis.

Endommagements

Les capots amortisseurs ne subissent pas de dégradation significative et le panier maintient sa géométrie lors de l'épreuve de chute libre.

3.3. En conditions accidentelles de transport

Ensemble des chutes étudiées

5 configurations de chute libre de 9 mètres et 2 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.

Un modèle numérique a été construit afin de simuler une configuration de chute à l'aide du solveur de calcul non linéaire MARC.

Un modèle numérique complémentaire a été construit afin de simuler une configuration de chute de l'emballage MX6 version MX JP à l'aide du logiciel de calcul numérique LS-DYNA.

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.

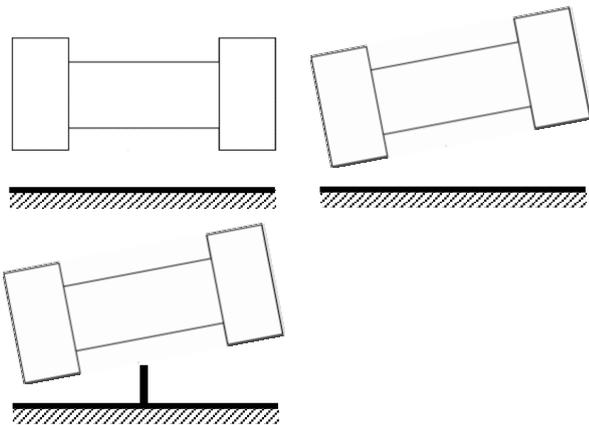
Les règles de similitudes amènent à définir une hauteur de chute corrigée pour tenir compte :

- 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

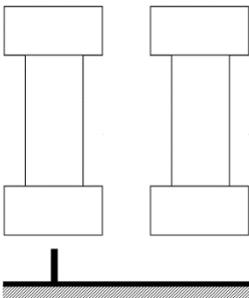
La 1^{ère} séquence est composée d'une chute horizontale de 0,3 mètre suivie d'une chute quasi-horizontale de 9 mètres et d'une chute de 1 mètre sur poinçon sur la virole externe. Cette séquence permet de tester l'étanchéité du système de fermeture, de vérifier la tenue de l'aménagement interne et d'évaluer l'efficacité des capots amortisseurs.

Lors de la 1^{ère} et 2^{ème} chute : Les capots présentent un écrasement inférieur à la capacité d'écrasement du bois. Aucun bâillement entre les capots et le corps n'est

constaté. Aucune déformation n'est observée sur le corps de l'emballage ni le couvercle, aucune déformation significative n'est observée sur l'aménagement interne.

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.

Lors de la dernière chute : La virole est déformée au niveau du point d'impact avec la tôle de la virole externe cisailée à ce point. Le logement de l'aménagement interne au droit du point d'impact est déformé, entraînant une réduction de sa section. 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.

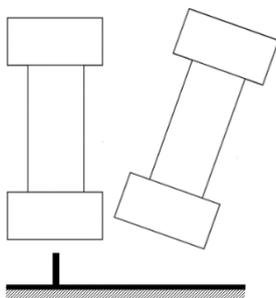
Deuxième séquence

La 2nd séquence est composée d'une chute verticale d'1 mètre sur poinçon suivie d'une chute verticale de 9 mètres sur le capot de couvercle. Cette séquence permet de tester la résistance du couvercle et 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 fixé sur le couvercle. La protection radiologique fixée sur le couvercle est enfoncée et une tôle de confinement de résine est ouverte. Le couvercle n'est pas déformé.

Lors de la 2nd chute : Le capot de couvercle présente un écrasement inférieur à la capacité d'écrasement du bois. Aucune déformation n'est observée sur le corps ni sur le couvercle.

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.

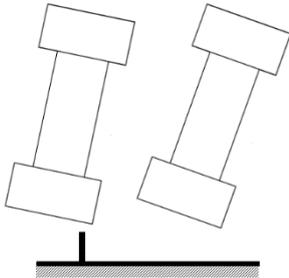
Troisième séquence

La 3^{ème} séquence est composée d'une chute oblique de 9 mètres sur le capot de couvercle précédée la même chute sur poinçon que pour la deuxième séquence. Cette séquence permet de tester la résistance du système de fermeture et de vérifier la capacité d'amortissement du capot.

Lors de la chute : Le capot de couvercle présente un écrasement inférieur à la capacité d'écrasement du bois. Un bâillement non significatif apparait entre le capot et le corps. Aucune déformation n'est observée sur le corps ni le

couvercle. Aucune déformation significative n'est observée sur l'aménagement interne. 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

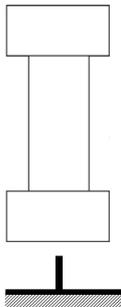


La 4^{ème} séquence est composée d'une chute oblique de 1 mètre sur poinçon suivie d'une chute oblique de 9 mètres sur le capot de fond. Cette séquence permet de tester la résistance de la protection de la tôle d'orifice et des vis de fixation du capot de fond, et de vérifier la capacité d'amortissement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

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

Lors de la 2nd chute : Le capot de fond présente un écrasement supérieur à la capacité d'écrasement du bois mais seulement pour une faible partie du bois sollicité. Aucune déformation n'est observée sur le corps de l'emballage. Aucun bâillement significatif n'apparaît entre le capot et le corps.

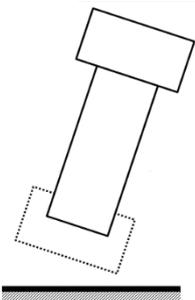
Cinquième séquence



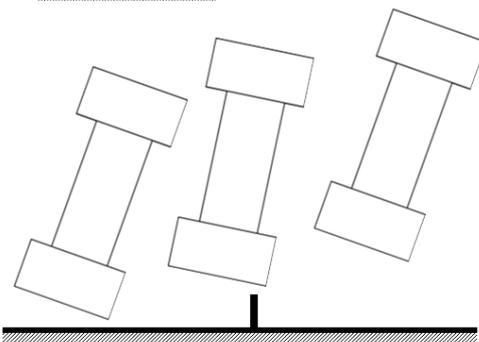
La 5^{ème} séquence est composée d'une chute verticale de 1 mètre sur poinçon le capot de fond. Cette séquence permet de tester la résistance du fond.

Lors de la chute : Le poinçon a pénétré le capot de fond et a déformé sans déchirement la tôle de la protection radiologique du fond. 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.

Essais complémentaires



Une chute complémentaire oblique sur fond a été réalisée pour tester la résistance du fond en conditions représentatives des conditions accidentelles de transport pour un écrasement maximal du bois du capot de fond. Lors de la chute, le fond s'est déformé et une déchirure s'est produite sur la virole externe au droit d'un raidisseur. A la fin de la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que l'enceinte de confinement conserve un bon niveau d'étanchéité.



Une séquence de chute supplémentaire sur capot de couvercle a été réalisée, composée d'une chute oblique de 0,3 mètre suivie d'une chute oblique de 1 mètre sur poinçon et d'une chute oblique de 9 mètres. Cette séquence permet de tester la résistance du système de fermeture et le maintien de l'étanchéité du couvercle. A la fin de la séquence, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que l'enceinte de confinement conserve un bon niveau d'étanchéité.

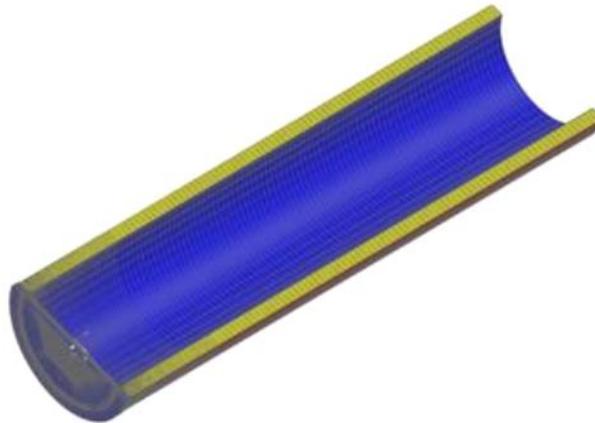
Des essais complémentaires de poinçonnement sur des tronçons de maquette, représentatifs des températures extrêmes du colis (de -40°C à la température maximale en conditions normales de transport) ont été réalisés pour analyser la déformation de la virole interne et externe et du contenu sous l'effet du poinçonnement. Ces essais concluent à une déformation de la virole sans perte d'étanchéité.

Compléments basés sur les essais

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

- le traitement des signaux accélérométriques issus des chutes,
- une analyse numérique de la chute complémentaire sur fond,
- une analyse numérique de la chute sur capot de tête spécifique à l’emballage MX6 version MX JP,
- des analyses numériques du comportement mécanique des aménagements internes.

La modélisation numérique permet de reproduire le comportement observé sur la maquette lors de la chute.



Cette étape de recalage du modèle permet en particulier de reproduire correctement l’accélération globale lors de la chute et la déformation des zones impactées, 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 les accélérations agissant sur l’emballage et son contenu mesurées initialement sur la virole externe de l’emballage lors de l’essai.

Enfin, ces analyses valident :

- le comportement de l’emballage lors d’une chute sur fond, ainsi que les accélérations à prendre en compte lorsque le contenu est au contact du fond.
- le comportement de l’emballage MX6 version MX JP lors d’une chute côté capot de tête.

Conclusions

L’emballage MX6 maintient son étanchéité lors de toutes les configurations de chutes.

Les tourillons de l’emballage MX6 ne risquent pas d’être impactés en configuration de chutes de 9 mètres.

Les ceintures optionnelles de manutention ne sont également pas impactées en configuration de chute de 9 mètres.

L'état du corps de l'emballage MX6 est sa géométrie initiale (non déformé) suite aux épreuves relatives aux conditions accidentelles de transport en vue des évaluations de thermique, de radioprotection, de confinement et de criticité.

L'état des aménagements internes sont leur géométrie initiale suite aux épreuves relatives aux conditions accidentelles de transport en vue des évaluations de thermique, de radioprotection et de criticité.

4. Performances d'un point de vue thermique

4.1. En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu important pour l'étude

Les principales caractéristiques des différents contenus 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 et la géométrie 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 :

Suivant les contenus, un demi-modèle ou un modèle complet est réalisé compte tenu de la symétrie du modèle de colis.

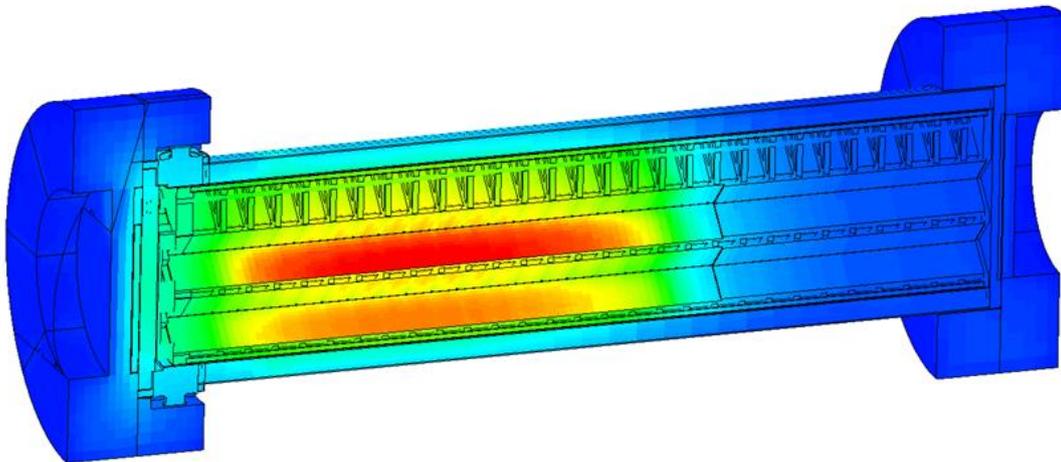
La puissance des assemblages combustibles est directement appliquée sur les parois des logements.

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

- Joint d'étanchéité : la température maximale des joints permet de justifier le non-endommagement des joints sur un nombre de cycles de transport compatible avec la fréquence de remplacement en maintenance (voir paragraphe 4.3). Par ailleurs, la dilatation du joint dans sa gorge vérifie un taux de remplissage inférieur à 100%.
- Résine neutrophage : la température maximale de la résine reste inférieure à sa limite d'utilisation.

4.2. En conditions normales de transport

Des études d'influence, basées sur un mouvement des contenus dans l'emballage, permettant de tenir compte de positions possibles du contenu dans la cavité, sont présentées ci-dessous :

- Configuration 1 = paniers et assemblages positionnés côté fond de l'emballage,
- Configuration 2 = paniers et assemblages positionnés côté tête de l'emballage.

Résultats de l'étude

Les critères cités au paragraphe 4.1 sont toujours respectés.

4.3. En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- Ecrasement du capot de tête résultant des chutes présentées en paragraphe 3.3.
- Bâillement situé à entre le capot de tête et l'emballage résultants des chutes présentées en paragraphe 3.3.
- Arrachement d'un quartier de la partie radiale du capot de tête (endommagement pénalisant par rapport aux résultats de chute présentés en paragraphe 3.3.
- 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.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- application d'une température ambiante de 800°C pendant 30 minutes autour du colis conformément à la réglementation.

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 de transport de routine ayant conduit aux températures les plus élevées concernant les joints d'étanchéité 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'absorptivité des surfaces externes de 0,8 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 des surfaces externes reste à 0,8.

Résultats de l'étude

L'exposition des joints à :

- 1 an en continu à la température maximale obtenue en conditions normales de transport,
- puis 7 jours au profil de température le plus pénalisant obtenu en conditions accidentelles de transport (supposée constante sur 7 jours de manière pénalisante),

conduit à des endommagements cumulés très inférieurs à 1.

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 MX6 tient compte du colis contenant les différents contenus définis au paragraphe 2.3. L'enceinte de confinement est définie au paragraphe 2.4.

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 important 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,
- les températures maximales des gaines des crayons combustibles issus 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 issus 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.
- La durée de transport est de 1 an.

Méthode de calcul

La méthodologie est décrite dans la norme ISO 12807 et est basée sur une phase de relâchement d'activité : pendant un an, 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 4.3).

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 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,
- le disque de fermeture en acier.

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,
- la couche de résine neutronique du capot de fond de l'emballage MX6 version MX JP,
- le disque de fermeture en acier.

Hypothèses importantes pour l'étude

Dans cette étude, l'effet du vieillissement de la résine a été pris en compte sur une durée d'utilisation de l'emballage de 30 ans en continu (chargement de la puissance maximale dans l'emballage pendant 30 ans).

Méthode de calcul

Les calculs de débits d'équivalent de dose ont été menés à l'aide du code ORIGEN2.1 pour un contenu dit « 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 calculs de débits de dose propres à chaque contenu sont effectués par comparaison aux résultats obtenus pour ce contenu de référence.

Les coefficients de conversion de flux en dose sont issus de l'évaluation ICRP 74, recommandation CIPR 60.

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 débit d'équivalent de dose en conditions de transport de routine est garanti pour le contenu radioactif maximal de chacun des contenus.

6.2. En conditions normales de transport

La géométrie de l'emballage est conservée en conditions normales de transport (voir paragraphe 3.2). L'intégrité de la protection radiologique n'est pas remise en cause, et il n'y a pas de modification de la position du contenu en conditions normales de transport. Par conséquent, le débit d'équivalent de dose en conditions normales de transport n'augmente pas de plus de 20%, par rapport au débit d'équivalent de dose en conditions de routine.

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 ou déplacés.
- Scénario 2 :
 - Etat de la résine identique à son état en conditions de transport de routine,
 - Cavité pleine d'eau.

Résultats de l'étude

Il est justifié que le contenu radioactif maximal de chaque contenu prévu pour le colis 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 sûreté-criticité

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 d'un des 3 contenus.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

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

$k_{\text{eff}} \leq 0,98$ 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,
- la teneur maximal en plutonium fissile.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Le système d'isolement est constitué par :

- pour l'emballage MX6 : 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-414 : les 6 logements en acier inoxydable boré, les 30 galettes en aluminium et la chemise en acier au droit des assemblages de combustible, placé dans chaque logement.
- pour le panier AA-440 : les 10 logements en acier inoxydable boré, les 21 galettes en aluminium, le blindage additionnel en aluminium et la rehausse du panier,
- pour le panier TN[®]9500 : les 6 logements en acier inoxydable doublés de tôles en aluminium boré et les 27 galettes en aluminium .
- 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 :

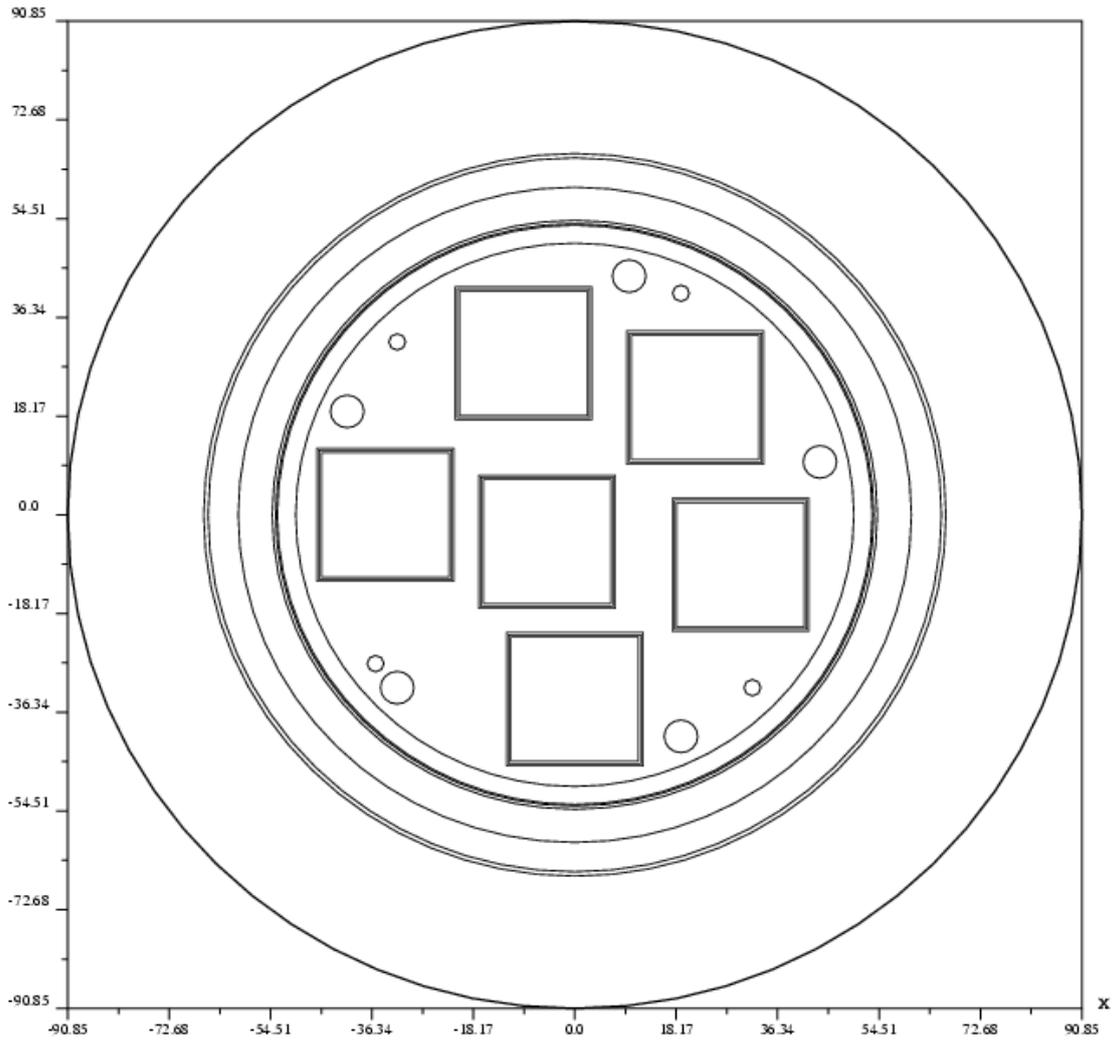
- la disparition d'une partie de la résine suite à l'épreuve de feu,
- l'endommagement des assemblages combustibles sans dispersion de la matière pour les contenus REP et avec dispersion partielle de la matière pour le contenu REB,
- le glissement des assemblages combustibles vers la tête ou le fond de l'emballage.

Méthode de calcul

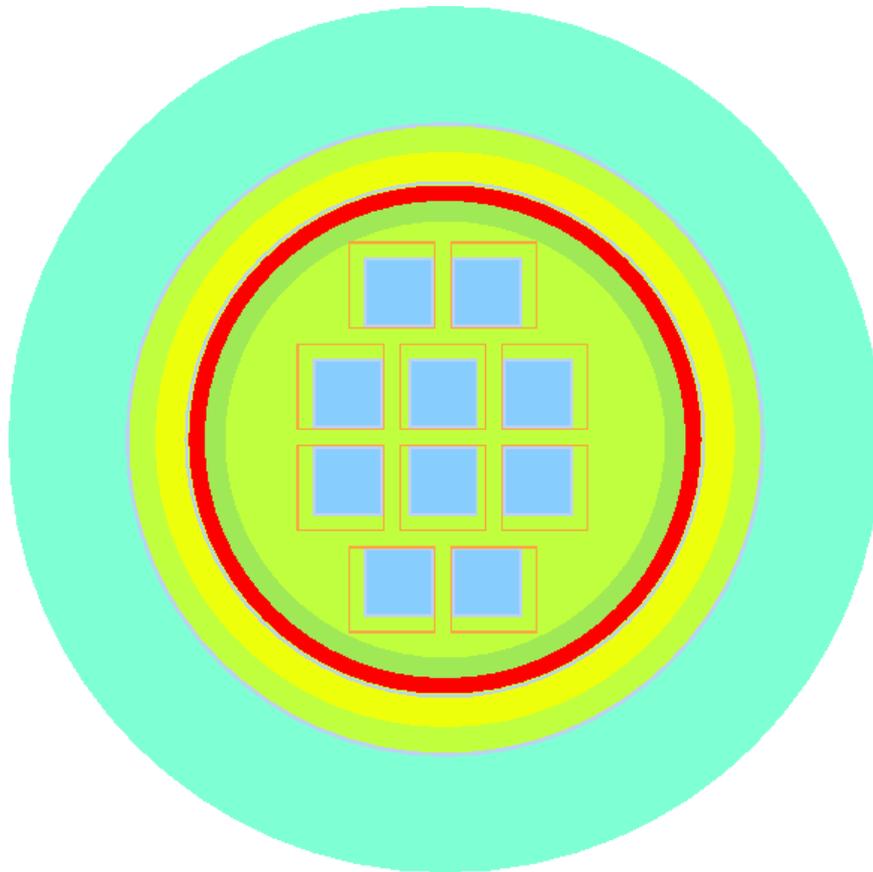
Les calculs ont été effectués avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (standard du formulaire CRISTAL).

Les modèles sont illustrés sur les figures ci-après pour chacun des paniers.

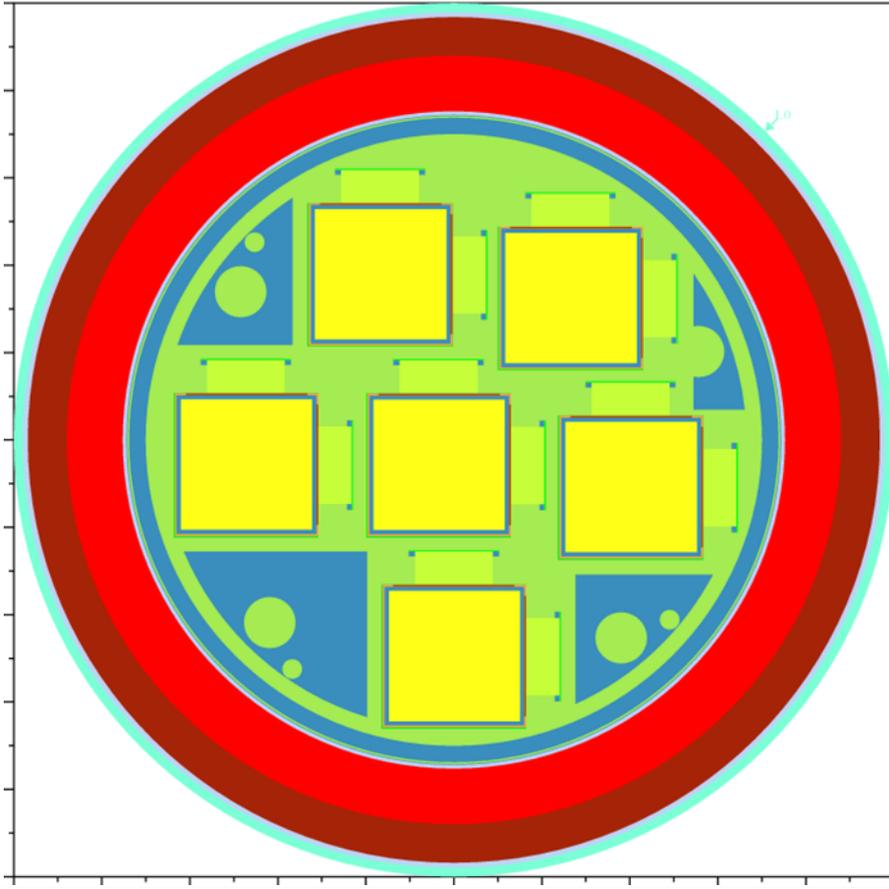
Panier AA-414 :



Panier AA-440 :



Panier TN[®]9500 :



Résultats

La réactivité maximale du colis :

- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,002) = 0,917$ pour le contenu REP 15x15,
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,001) = 0,902$ pour le contenu REP 17x17 (transporté dans le panier AA-414),
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,0005) = 0,941$ pour le contenu REP 17x17 (transporté dans le panier TN[®]9500).
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,002) = 0,886$ pour le contenu REB 8x8.

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

7.2.2. Réseau de colis

La réactivité maximale du colis est de :

- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,002) = 0,917$ pour le contenu REP 15x15,
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,001) = 0,902$ pour le contenu REP 17x17 (transporté dans le panier AA-414),
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,0005) = 0,941$ pour le contenu REP 17x17 (transporté dans le panier TN[®]9500),
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma(\sigma = 0,002) = 0,885$ pour le contenu REB 8x8.

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

8. Conditions d'utilisation

L'emballage est conçu pour être chargé et déchargé verticalement à sec.

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 périodique

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 qualité

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. Références

<1> « Règlement de transport des matières radioactives » de l'AIEA – Prescription, SSR-6 (Rev.1), Edition de 2018.

Les règles de conception et d'épreuves de l'édition 2018 du Règlement de l'AIEA englobent celles des règlements applicables suivants :

- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) ;
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID) ;
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigations intérieures (ADN) ;
- Code maritime international des marchandises dangereuses de l'Organisation Maritime Internationale (code IMDG de l'OMI) ;
- Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté TMD) ;
- Règlement de sécurité des navires (RSN), annexé à l'arrêté du 23 novembre 1987 modifié relatif à la sécurité des navires, division 411 ;